UDK/UDC: 621.791 **EISSN 3042-3163 ISSN 0354-7965**

ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE

WELDING & WELDED STRUCTURES

God. 71	Br. 2	49-96	Beograd	Srbija	2026.
Vol. 71	No. 2	49-96	Belgrade	Serbia	2026.

ČASOPIS DRUŠTVA ZA UNAPREĐIVANJE ZAVARIVANJA U SRBIJI I TEHNOLOŠKO-METALURŠKOG FAKULTETA UNIVERZITETA U BEOGRADU

SERBIAN WELDING SOCIETY AND FACULTY OF TECHNOLOGY AND METALLURGY OF THE UNIVERSITY OF BELGRADE QUARTERLY REVIEW

PERIODIČNOST IZLAŽENJA – ČETIRI PUTA GODIŠNJE

PUBLISHED IN FOUR ISSUES ANNUALLY

IZDAVAČI / PUBLISHERS

DUZS - Društvo za unapređivanje zavarivanja u Srbiji
Grčića Milenka 67, Beograd, Srbija
TMF - Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu
Karnegijeva 4, Beograd, Srbija

Za izdavača / For Publisher
Branislav Lukić, dipl.ing, predsednik DUZS

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)
Dr Tushar Sonar, dipl.ing. (Rusija)

UREDNIŠTVO / EDITORIAL

Glavni i odgovorni urednik / Editor-in-Chief
Dr Zoran Odanović, dipl.ing.
duzs011@gmail.com, zoranodanovic@gmail.com

Tehnički urednici / Technical Editors
Branislav Lukić, dipl.ing
štampano izdanje / printed edition
Dr Bojan Gligorijević, dipl.ing
internet izdanje / online edition

Redakcijski odbor / Editorial Board
Dr Nenad Radović, dipl.ing.
Dr Radomir Jovičić, dipl.ing.
Dr Srđan Bulatović, dipl.ing.
Dr Stefan Dikić, dipl.ing.
Mr Miloš Pavlović, dipl.ing.

REDAKCIJA I MARKETING / EDITORIAL OFFICE AND MARKETING

Vesna Jović
Grčića Milenka 67, I sprat
11000 Beograd

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

duzs011@gmail.com
www.wwsjournal.org.rs

CIP - Каталогизација у публикацији
Народна библиотека Србије, Београд
621.791

ZAVARIVANJE i zavarene konstrukcije : časopis Društva za unapređivanje zavarivanja u Srbiji i Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu = Welding & welded structures : Serbian welding society and Faculty of Technology and metallurgy of theUniversity of Belgarde quarterly review / glavni i odgovorni urednik Zoran Odanović. - Vol. 41, no. 1 (1996)- . - Beograd : DUZS - Društvo za unapređivanje zavarivanja u Srbiji : TMF - Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu, 1996- (Beograd : RIC grafičkog inženjerstva Tehnološkometalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu). - 29 cm

Tromesečno. - Je nastavak: Zavarivač = ISSN 0513-8523. - Drugo izdanje na drugom medijumu: Zavarivanje i zavarene konstrukcije (Online) = ISSN 3042-3163 ISSN 0354-7965 = Zavarivanje i zavarene konstrukcije COBISS.SR-ID 105396743

CENE I NARUDŽBINA ZA 2026.
Cena pojedinačnog broja 1.150,00 dinara
Godišnja pretplata 3.520,00 dinara
Tekući račun: 325-9500600002588-46

PRICE AND ORDER
Annual subscription: EUR 100
Account No. RS35325960160000041546
OTPVRS22 (VOJVOĐANSKA BANKA AD)
IBAN RS35325960160000041546

ŠTAMPA / PRINT
RIC grafičkog inženjerstva
Tehnološko-metalurški fakultet Beograd
Karnegijeva 4, Beograd
Tiraž / Circulation: 150

Časopis sufinansira Ministarstvo nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije

Na osnovu mišljenja Ministarstva za nauku, tehnologije i razvoj Republike Srbije br. 413-00-2272/2001-01, časopis ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE je publikacija od posebnog interesa za nauku

2/2026

SADRŽAJ CONTENTS

NAUKA•ISTRAŽIVANJE•RAZVOJ | SCIENCE•RESEARCH•DEVELOPMENT

51 **RELAKSACIJA ZAOSTALIH NAPONA METODOM EKSPLOZIJE** / **RELAXATION OF RESIDUAL TENSIONS BY THE EXPLOSION METHOD**

Mića Đorđević, Dragan Đorđević, Vladimir Đorđević, Nenad Gačić, Tomaž Vuherer

NAUKA•ISTRAŽIVANJE•RAZVOJ | SCIENCE•RESEARCH•DEVELOPMENT

64 **MODELIRANJE UTICAJA UNOSA TOPLOTE NA GEOMETRIJU UGAONIH SPOJEVA PRI MAG ZAVARIVANJU U RAZLIČITIM POZICIJAMA** / **MODELLING INFLUENCE OF HEAT INPUT ON FILLET WELD GEOMETRY DURING MAG WELDING IN DIFFERENT POSITIONS**

Petar Tasić, Ismar Hajro

PRAKSA | PRACTICE

71 **BITNE VARIJABLE PRI ZAVARIVANJU KOTLOVSKOG NISKOLEGIRANOG I VATROOTPORNOG VISOKOLEGIRANOG ČELIKA** / **ESSENTIAL VARIABLES AT WELDING BOILER LOW-ALLOY AND FIRE-RESISTANT HIGH-ALLOY STEEL**

Monika Cinkl, Tihomir Marsenić, Iva Deanović, Ivan Samardžić, Božo Despotović, Dejan Marić, Jadranka Eržišnik

MIZ | IIW

81 **ELEKTROHEMIJSKO KOROZIONO PONAŠANJE SUČEONIH ZAVARA NERĐAJUĆIH ČELIKA 1.4404 I 1.4435 IZVEDENIH AUTOGENIM GTAW POSTUPKOM** / **ELECTROCHEMICAL CORROSION BEHAVIOUR OF STAINLESS STEEL GRADES 1.4404 AND 1.4435 BUTT WELDS BY AUTOGENOUS GTAW**

David Large, David Plélan, Nadege Ducommun, Lauriane Guilmois, Laurent Jubin

VESTI | NEWS

80 **73. GODIŠNJA SKUPŠTINA DUZS**

93 **TAKMIČENJE MLADIH ZAVARIVAČA, INTERNATIONAL WELDING COMPETITION - 2025**

96 **MARKETING**

Mića Đorđević [1,a], Dragan Đorđević [1], Vladimir Đorđević [1], Nenad Gačić [2], Tomaž Vuherer [3]

RELAKSACIJA ZAOSTALIH NAPONA METODOM EKSPLOZIJE

RELAXATION OF RESIDUAL TENSIONS BY THE EXPLOSION METHOD

Originalni naučni rad / Original scientific paper

Rad primljen / Paper received:

Jul 2024.

Rad prihvaćen / Paper accepted:

Mart 2026.

Adresa autora / Author's address:

[1] Tehweld d.o.o. Loznica, Italijanskih dobrovoljaca 7, 15300 Loznica, Srbija

[2] Eniko d.o.o., Loznica, Srbija

[3] Fakultet za strojarstvo, Maribor, Slovenija

email / ORCID ID:

[a] tehweld@yahoo.com / 0009-0005-7891-1853

Ključne reči: relaksacija zaostalih napona eksplozijom, detonirajući štapin, merenje zaostalih napona

Keywords: relaxation of residual stress by explosion, detonating rod, measurement of residual stress

Rezime

U radu će biti detaljno prikazana nekonvencionalna metoda relaksacije zaostalih napona primenom energije eksplozije koja je primenjena prvi put pri izradi posuda – dekantera, dekompozera i cevovoda u fabrici za dobijanje glinice „Birač“ Zvornik. Fabrika je građena sedamdesetih godina prošlog veka. Za potrebe relaksacije zaostalih napona nakon zavarivanja u E.O.Paton AN (Akademija nauka) u saradnji sa Institutom za zavarivanje „Energoinvest“ Sarajevo, patentiran je postupak relaksacije zaostalih napona eksplozijom na zavarenim spojevima 1976. godine. Ukupna dužina zavara koja je tretirana eksplozijom bila je preko 20.000 m.

Abstract

The paper will present in detail the unconventional method of residual stress relaxation using explosion energy, which was used for the first time during the production of vessels - decanters, decomposers, and pipelines at the "Birač" alumina factory in Zvornik. The factory was built in the seventies of the last century. For the purposes of relaxation of residual stresses after welding, in E.O. Paton AN (Academy of Sciences) in cooperation with the Institute for Welding "Energoinvest" Sarajevo, a procedure for relaxation of residual stresses by explosion on welded joints was patented in 1976. The total length of the weld, which was treated with an explosion, was over 20.000 m.

Rad je u originalnom obliku objavljen u Zborniku radova sa 33. konferencije sa međunarodnim učešćem „Zavarivanje 2024“ održanog u Vrnjačkoj Banji, Srbija od 2. do 5. oktobra 2024. godine.

1. Uvod

Energija eksplozije je najviše primenjena pri spajanju raznorodnih metala. Našla je i primenu pri oblikovanju elemenata, presovanju, rezanju, a pokazalo se i da je odlična za relaksaciju zaostalih napona nakon zavarivanja i izradu velikih objekata.

Opšte je poznato da su u procesu zavarivanja neizbežne pojave deformacija i zaostalih napona, veličine jedna drugoj suprotne, gde važi pravilo: što su veće deformacije, manji su zaostali naponi i obrnuto, što su veći naponi, manje su deformacije. Na tehnolozima zavarivanja ostaje odgovornost da pronađu kompromis između pomenutih. U praksi se uspešno sprovodi relaksacija zaostalih napona primenom **termičke obrade i mehaničkih metoda** (vibracija). Pri izgradnji fabrike glinice „Birač“ Zvornik, prvi put je primenjen nekonvencionalni postupak relaksacije zaostalih napona od zavarivanja primenom **energije eksplozije**. Prilikom izrade velikih posuda, spajaju se odgovarajuće table lima od ugljeničnog čelika nekim od postupaka zavarivanja topljenjem. Tom prilikom, zavarivano mesto je uklješteno i okruženo velikom masom hladnog lima, što dovodi do znatne pojave zaostalih napona. U samom zavaru su naponi zatezanja, a u ZUT-u naponi pritiska. Unosom određene energije, toplotne ili mehaničke, u područje sa povišenim zaostalim naponima, elastični naponi prelaze u plastične deformacije, a to rezultira smanjenjem ukupnog naponskog stanja u zavarenom spoju.

Tretiranje zavara eksplozijom ima analogiju u relaksaciji uplivom toplote. U oba slučaja vrši se širenje materijala, što dovodi do delimičnog prelaska elastičnih napona u plastično stanje. Zagrevanjem opadaju mehaničke osobine čelika, smanjuje se nivo granice razvlačenja, pa naprezanja koja su u materijalu nadvladavaju čvrstoću materijala i izazivaju pomeranje kristala u pravcu dejstva napona, što dovodi do smanjenja zaostalih napona.

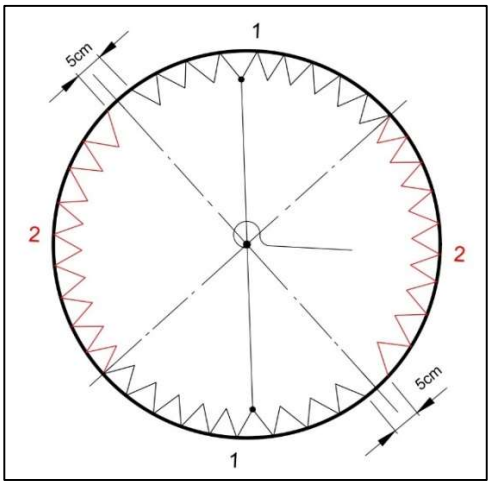
Relaksacija napona termičkom obradom je sporiji i skuplji, ali i kvalitetniji postupak. Relaksacija eksplozijom je mnogo brži i jeftiniji postupak. Karakteristično je za oba slučaja da se postižu bolja mehanička svojstva i eliminiše mogućnost tehnogene havarije usled pojave naponske korozije, što je posebno izraženo u posudama sa agresivnim medijima. Primenjena tehnologija relaksacije napona eksplozijom je uspešno dokazana u praksi tokom višegodišnje eksploatacije.

2. Eksperimentalni deo

Oko šava, zavarenog mesta (područja koja su izložena višim temperaturama od 300-400 °C u unutrašnjosti lima), postavlja se detonirajući štapin u određenoj konfiguraciji slomljene linije koja podseća na sinusoidu. Cilj je da se odredi amplituda, korak i količina eksploziva za određenu vrstu i debljinu materijala uz kontrolu drugih parametara, kao što su vlaga, temperatura, konfiguracija, pozicija (položaj), upetost konstrukcije itd.

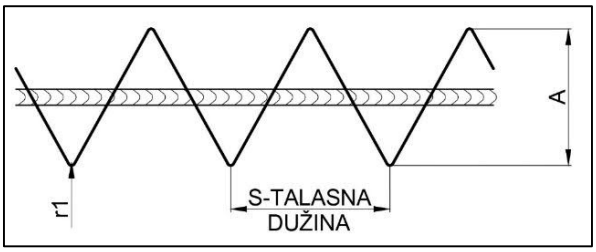
Prilikom istraživanja efekta eksplozije u laboratoriji, u baznu sredinu (NaOH) su potapane zavarene čelične ploče koje su tretirane i koje nisu tretirane eksplozivom. Netretirane ploče su već posle nekoliko sati doživljavale razaranje zavara uz prasak, usled superponiranja zaostalog naponskog stanja nakon zavarivanja i naponske korozije koju je izazvao agresivni medij.

Tretiranje eksplozivom se obavlja sa unutrašnje strane posude nakon završenog zavarivanja, predviđene kontrole i prijema zavarenih pozicija. Nakon relaksacije eksplozijom, više se ne vrši nikakvo zavarivanje, a ako je neophodno dodatno zavarivanje, to mesto se ponovo tretira eksplozijom. U svakom slučaju, treba nastojati da je što manje takvih mesta. Posle relaksacije vrši se merenje zaostalih napona ultrazvukom. Istovremeno se detoniraju dve dijametralno suprotne strane, kao na Slici 1. Na Slici 2 je prikazan detalj postavljenog eksploziva sa Slike 1.



Slika 1. *Šema postavljanja eksploziva (DŠ).*

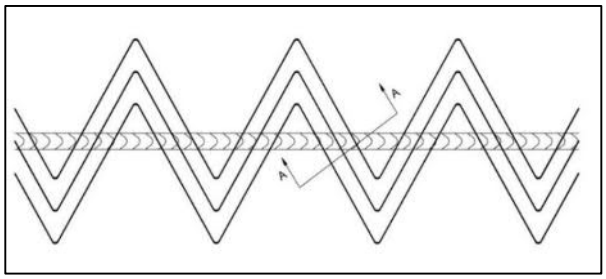
Figure 1. *Explosive placement scheme (DŠ).*



Slika 2. *Detalj postavljenog eksploziva.*

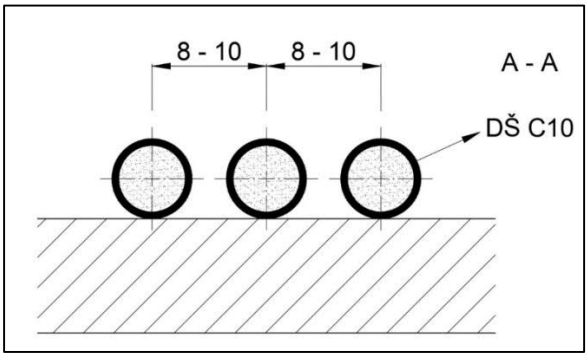
Figure 2. *Detail of the placed explosive.*

Maksimalna količina eksploziva koja istovremeno eksplodira ne sme da pređe 2 kg. Ako je potrebna veća količina eksplozivnog naboja, onda se detonirajući štapini postavljaju paralelno u određenoj konfiguraciji prema niže navedenoj šemi (Slika 3).



Slika 3. *Šema postavljanja eksploziva (tri DŠ).*

Figure 3. *Explosive placement scheme (three DŠ).*

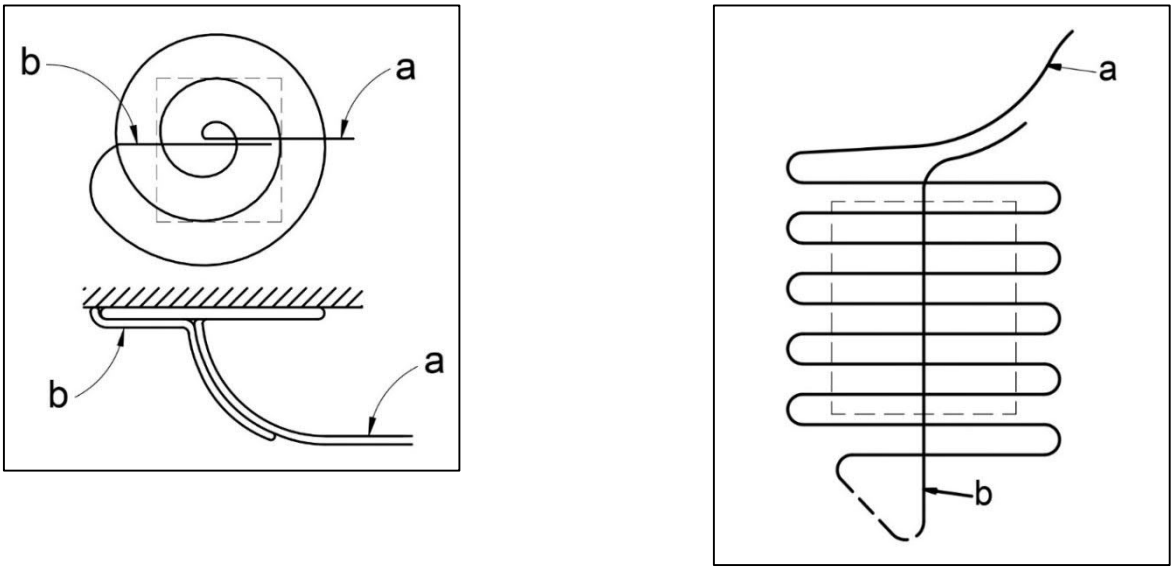


Slika 4. *Presek A-A sa Slike 3.*

Figure 4. *Section A–A from Figure 3.*

2.1. Način relaksacije zaostalih napona na mestima naknadnog zavarivanja (posle izvršene opšte relaksacije i prijema objekta)

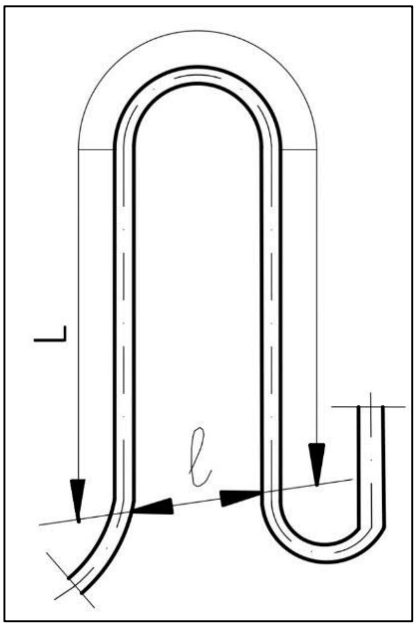
U zoni oko šavova gde su izvedena lokalna zavarivanja treba primeniti konfiguraciju spirala koja obuhvata zone termičkog uticaja, a to su zone koje su dostigle više od 300-400 °C u unutrašnjem sloju metala (Slika 5).



Slika 5. *Konfiguracija detonirajućeg štapina za relaksaciju lokalnih zavarenih spojeva.*

Figure 5*. Detonating-cord configuration for local welded-joint relaxation.*

Uslov za neprekidan prenos detonacije je korelacija (uzajamni odnos) L/l < 4 – 5 (Slika 6). Ako je odnos L/l > 5, onda je nepohodna primena provodnika detonacije. Detonirajući štapin je namotan na kalem i može da se koristi u većoj dužini.



Slika 6. *Detalj postavljanja DŠ.*

Figure 6. *Detail of detonating-cord placement.*

Priprema štapina se vrši u priručnom magacinu na gradilištu. Priprema se sastoji u obrazovanju lomljene linije koja se lepi na neki flaster, samolepivu traku ili se tako pripremljeni detonirajući

štapin lepi direktno na šav koji je pre nanošenja lepka očišćen od nečistoća (korozija, masnoća, prljavština).

Eksplozivom mogu da rade obučeni radnici koji su završili specijalni kurs ili lice koje ima rudarsko-tehničko obrazovanje.

U ovom radu nisu data uputstva za siguran i bezbedan rad sa eksplozivom.

Dekompenzatori i dekanteri su bili cilindrični sudovi prečnika 10 m i visine 33 m. Zapremina je iznosila V = 2150 m^3. Osnovni materijal je bio čelik Č.0462 (355) i Č1212 (preko 40 kom). Vertikalni zavari posuda pri ukrupnjavanju su zavarivani automatskim postupkom „VERTOMATIK“.

Horizontalni pojasevi su rađeni „CIRKOMATIK“ postupkom (zavarivanje pod praškom).

Debljine limova koji su zavarivani bile su u rasponu od 6 do 22 mm.

Kao eksplozivno sredstvo upotrebljavaju se detonirajući štapini (DŠ).

- tip detonirajućeg štapina.....npr. PENTRIT,
- brzina detonacije.....6,5 km/s,
- omotač štapina.....polivinil hlorid,
- težina dužinskog metra DŠ…..10, 12, 15, 20 i 25 g/m,
- gipkost DŠ.....do -25 °C,
- otporan na vlagu,
- detoniranje se vrši rudarskom kapislom br. 8 električnim putem.

2.2. Plan izvođenja relaksacije

Prvo se relaksiraju vertikale i to u montažnom položaju, na stendu, gde se vrši ukrupnjavanje tabli. Nakon tretiranja eksplozivom ukrupnjeni pojas se postavlja na mesto izrade posude koja se gradi.

Montirana dva plašta se spajaju horizontalnim zavarom i tek posle predviđenih kontrola varova, pristupa se relaksaciji zaostalih napona eksplozijom.

2.3. Određivanje parametara

2.3.1. Izračunavanje osnovnih veličina

Osnovne veličine za određivanje količine i konfiguracije eksploziva, DŠ za debljinu čelika lima 0,8 cm:

- A – amplituda izlomljene linije
- S – talasna dužina izlomljene linije koju čini DŠ
- n – linearni broj DŠ

Za A se usvaja vrednost *A* = 8 cm. Područje zone unutrašnje temperature lima od 300-400°C. Iz formule za koeficijent rashoda DŠ koji je dobijen eksperimentalnim putem, može se izračunati talasna dužina *S*.

$k_r = 0{,}5+\frac{2A}{S}$, k_r – koeficijent rashoda detonirajućeg štapina (DŠ)

k_r za čelični lim δ = 8 mm je 1,83.

S = 11,86 cm

Usvaja se S = 12cm.

Talasnu dužinu S moguće je izračunati i putem formule:

$S = \frac{2K}{\beta\varepsilon_t} \cdot \frac{q_o}{\delta_1}\ [cm]$

gde su:

K – koeficijent OM (osnovnog materijala) i eksplozivne materije

$K = \frac{\alpha\sqrt{2Q_0}}{\gamma_1 C_0}$

α – koeficijent odraza $1 \le \alpha \le 2$

Q_0 – specifični energetski kapacitet (1400 kkal/kg)

γ_1 – specifična težina čelika

C_0 – brzina zvuka u čeliku

$K \approx 0{,}175\ \frac{cm^3}{g}$.

$\beta = (0{,}7 \div 1{,}5)\frac{cm^3}{g}$ – parametar spoljašnjeg opterećenja

$\varepsilon_t\ \left[\frac{1}{cm}\right]$ – varijabilni koeficijent – zavisi od dužine koja se relaksira

$q_o\ [cm]$ – dužina DŠ

$\delta_1\ [cm]$ – debljina vara zavarenog spoja: $\delta_1 = 1{,}2cm$

$\delta\ [mm]$ – 8 debljina osnovnog materijala (lima)

$n_h = 0{,}1\delta+0{,}2$ – broj niti det.štap.za horizontalne šavove

n_v = 0,25δ-1 – broj niti det.štap.za vertikalne šavove

Prikazani račun za A i S važi za DŠ C10. Primenom DŠ C15 bilo bi S = 20 cm.

2.3.2. Izračunavanje linijskog opterećenja Δσ koje ostvaruje dejstvo eksplozije DŠ C10

$\Delta\sigma = \frac{Q_0}{PK_r\delta} m_0$ – linearno opterećenje

$Q_0 = 0{,}42\frac{Ncm}{g}$ – energetski kapacitet

$P = 20 \div 50$ – koeficijent linearnog naboja (manji iznos P odnosi se na veći broj niti DŠ)

$K_r = 0{,}5 + \frac{2A}{S} = 0{,}5 + \frac{2\cdot 8}{12} = 1{,}83$ – koeficijent rashoda DŠ

$\delta = 0{,}8\ cm$ – debljina osnovnog materijala

$m_0 = \frac{2L}{S} \cdot q_0$ – parametar dužinskog kačanja

L = r A – r < 1 – radijus loma spirale DŠ

A = 8 cm - amplituda DŠ

L = 1·8 = 8 cm

q_0 = K_r C10

C10 – DŠ sa 10g eksploziva po 1m

q_0 = 1,83·10g/m = 18,3g/m

$m_0 = \frac{2\cdot 8}{12} \cdot 0{,}183\ \frac{g}{cm} = 0{,}244\ \frac{g}{cm}$

$$\Delta\sigma = \frac{0{,}42\frac{Ncm}{g} \cdot 0{,}244\frac{g}{cm}}{50 \cdot 1{,}83 \cdot 0{,}8cm}$$

$$\Delta\sigma = \frac{0{,}1N}{73{,}2\ cm} = 0{,}014\frac{N}{cm} = 1{,}4 \cdot 10^{-4}\frac{N}{mm}$$

3. Rezultati i diskusija

3.1. Merenje zaostalih napona

Za potrebe relaksacije i merenja naponskog stanja zavarene su dve ploče dimenzija 2000 mm x 8 mm x 500 mm. Osnovni materijal od koga su ploče izrađene je bio čelik S355. Zavarivanje je izvršeno REL-postupkom (111). Dodatni materijal je bila bazična elektroda EVB 50 prečnika Ø 3 mm i dužine 25 cm.

Zavar je tretiran eksplozijom koju je izazvao detonirajući štapin (DŠ C10), postavljen po varu u određenoj konfiguraciji koja je prethodno izračunata.



Slika 7. *Postavljanje DŠ na ploču.*

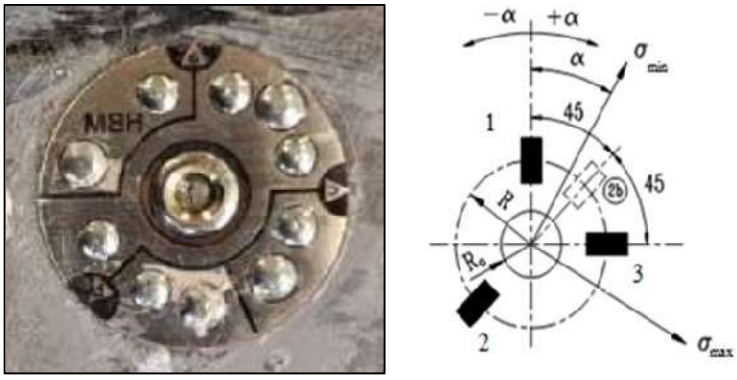
Figure 7. *Placement of the detonating cord on the plate.*

Nakon dejstva eksplozije pristupilo se merenju zaostalih napona metodom zabušivanja rupa i metodom MPM (magnetno pamćenje metala). Merenja su obavljena u ZUT-u.

3.1.1. Merenje naponskog stanja metodom zabušivanja rupa

Metoda merenja zaostalih napona sa zabušivanjem rupe je standardizovana po ASTM

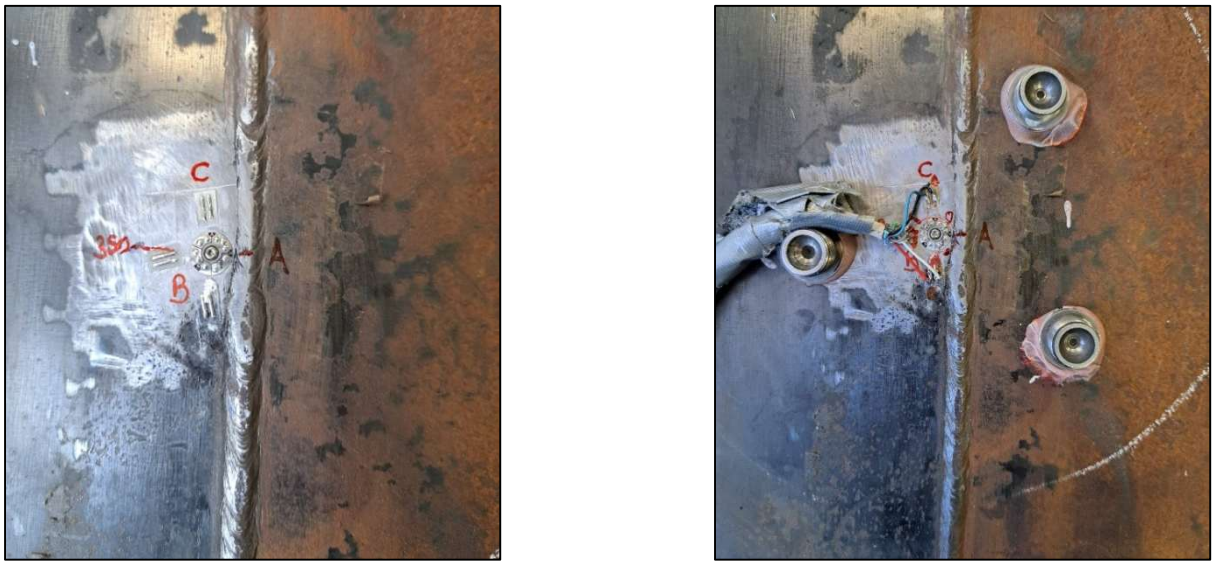
E837 (Slika 8). Prilikom merenja zalepi se merna rozeta, koja se sastoji od 3 merne trake pod uglovima 0°, 90° i 225° ili 0°, 45° i 90°, zavisi od konfiguracije merne rozete. Kod merenja, bila je upotrebljena merna rozeta sa mernim trakama pod uglovima 0°, 90° i 225°. Merne trake su na slici označene sa 1, 2 i 3 (A, B, C). Rezultat mjerenja su glavni naponi S_{min} i S_{max}, koji su takođe označeni na Slici 8b. Za merenje je bila upotrebljena Hottingrova 120-omska merna rozeta RY61 sa mernom površinom pojedine merne trake u rozeti 1,5 x 0,8 mm. Mesto merenja je bilo na sredini zavarenog spoja na ploči dimenzija 1500 mm x 8 mm x 500 mm. Lokacija merenja zaostalih napona bila je u zoni uticaja toplote (ZUT), pored metala šava na sredini zavarene ploče (Slika 9).



a) b)

Slika 8. *Zalepljena merna rozeta RY61 i prikaz merenja sa zabušivanjem rupa.*

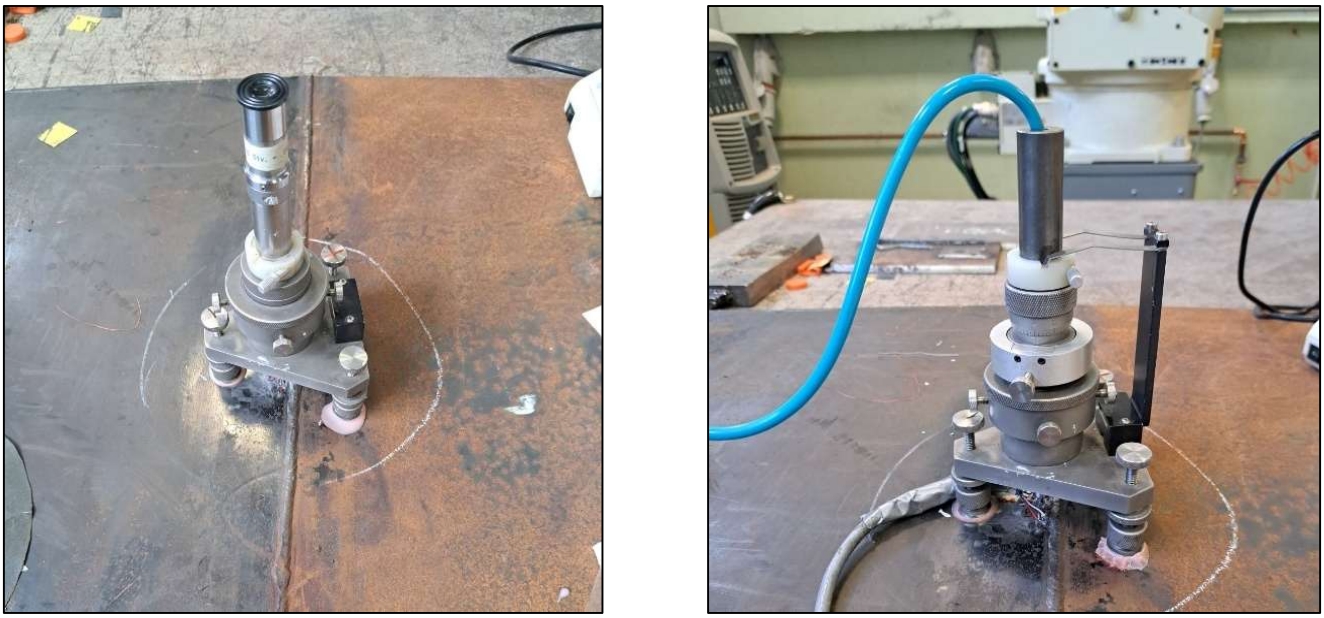
Figure 8. *Bonded RY61 strain-gage rosette and measurement by the hole-drilling method.*



a) b)

Slika 9. *(a) Mesto merenja zaostalih napona zabušivanjem rupe na sredini zavarene ploče u ZUT-u i (b) orijentacija zalepljene merne rozete i ožičavanje merne rozete.*

Figure 9. *(a) Measurement location for residual stresses by the hole-drilling method at the center of the welded plate in the HAZ and (b) orientation of the bonded strain-gage rosette and rosette wiring.*



a) b)

Slika 10. *Pojedine faze merenja zaostalih napona sa metodom zabušivanja rupe, centriranje postolja i merne rozete sa mikroskopom (a) i zabušivanje rupe (b). Uređaj za zabušivanje rupice – VISHAY RS 200.*

Figure 10. *Individual stages of residual-stress measurement by the hole-drilling method: centering of the support and strain-gage rosette using a microscope (a) and hole drilling (b). Hole-drilling device: VISHAY RS 200.*

U svakoj mernoj traci u mernoj rozeti se mere deformacije $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ *i* ε_3 prilikom zabušivanja rupice, što se vrši postepeno sa korakom po 0,1 mm od 0 do 2 mm.

$$\sigma_{max} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{4A} - \frac{1}{4B}\sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2}$$

$$\sigma_{min} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{4A} + \frac{1}{4B}\sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2}$$

$$\tan 2\alpha = \frac{\varepsilon_1 - 2\varepsilon_2 + \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}$$

gde su ε_1, ε_2 i ε_3 - deformacije u pojedinim mernim trakama u mernoj rozeti, *A i B* - kalibracijski koeficijenti koji zavise od modula elastičnosti, Poisson-ovog broja, tipa merne rozete, promera izbušene rupe i dubine izbušene rupe, α - pravac glavnih zaostalih napona i σ_{max} *i* σ_{mim} – glavni zaostali naponi.

Uzdužne poprečne komponente zaostalih napona i komponente napona na smicanje može da se izračuna korišćenjem Mohreve teorije (Tabela 1).

$$\sigma_{longitudinal} = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} + \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}\cos\alpha$$

$$\sigma_{transversal} = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} - \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}\cos\alpha$$

$$\tau = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}\sin\alpha$$

gde su $\sigma_{longitudinal}$ – uzdužna komponenta zaostalih napona uzduž zavarenog spoja, $\sigma_{transversal}$ – poprečna komponenta zaostalih napona poprečno na zavareni spoj i τ – komponenta zaostalih napona na smicanje.

Tabela 1. *Automatska obrada podataka nakon merenja naponskog stanja.*

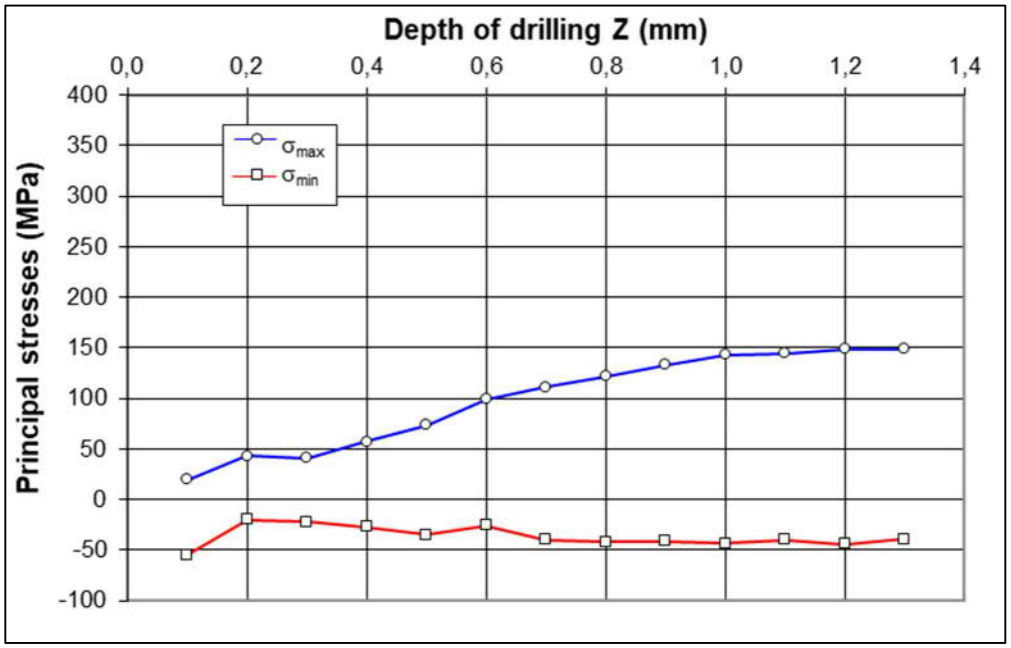
Table 1. *Automatic data processing after measurement of the stress state.*

Specimen: T - weld - DARC
Measurement: M1
$R_{p0,2}$: 355 (MPa)

Data:
Diametre of the rosete (D): 5,13 (mm)
Diametre of the hole (Do): 1,60 (mm)
Poisson ratio (ν): 0,30 (-)
Young modulus (E): 210000 (MPa)
Do/D 0,3119 (-)

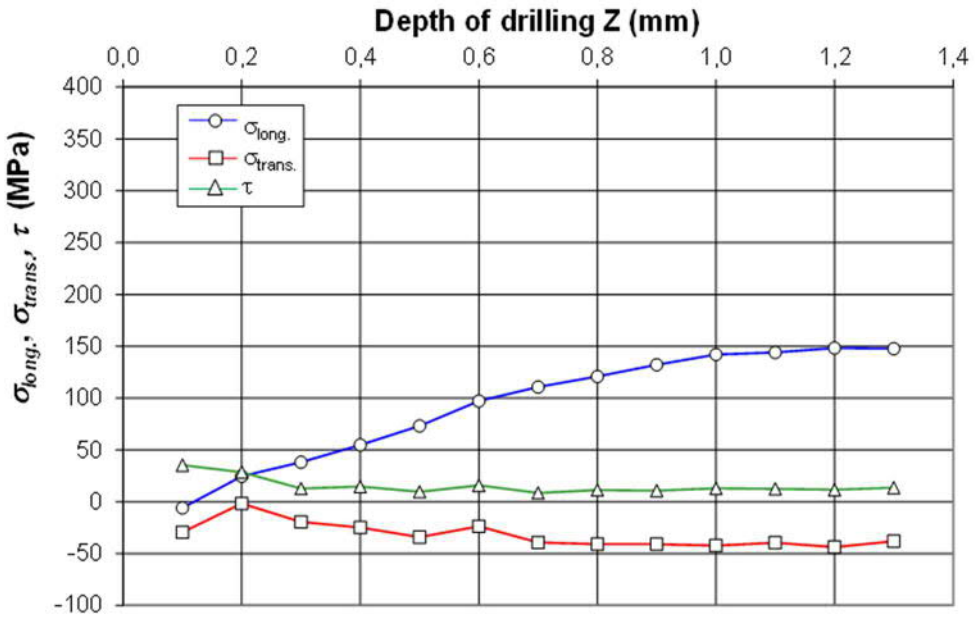
Depth	Deformation			Angle	Principal stesses		Transv, long. and shear stress		
Z	ε1	ε2	ε3	α	σ_{min}	σ_{max}	$\sigma_{transversal}$	$\sigma_{longitudinal}$	τ
(mm)	(μm)	(μm)	(μm)	(°)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
0,0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,1	0	4	2	-35,8	-54,7	19,7	-29,3	-5,8	35,3
0,2	-4	4	1	-32,8	-20,0	42,9	-1,6	24,5	28,6
0,3	-11	2	7	-12,0	-22,1	40,8	-19,4	38,1	12,8
0,4	-22	2	13	-10,2	-27,4	57,3	-24,7	54,7	14,7
0,5	-38	-2	23	-5,1	-34,9	73,9	-34,0	73,1	9,7
0,6	-59	-6	25	-7,3	-25,6	99,3	-23,6	97,2	15,8
0,7	-80	-12	42	-3,3	-39,7	111,3	-39,2	110,8	8,6
0,8	-98	-13	51	-4,0	-41,8	121,6	-41,0	120,8	11,4
0,9	-117	-18	59	-3,6	-41,5	132,8	-40,9	132,2	10,8
1,0	-135	-19	68	-4,1	-43,2	143,1	-42,3	142,1	13,2
1,1	-144	-22	71	-3,8	-40,2	144,8	-39,3	144,0	12,4
1,2	-156	-23	81	-3,5	-44,5	148,9	-43,8	148,2	11,7
1,3	-161	-23	80	-4,1	-39,0	148,7	-38,0	147,7	13,5
1,4	-167	-24	91	-3,1	-45,3	145,5	-44,7	145,0	10,3
1,5	-174	-25	94	-3,2	-43,3	146,2	-42,8	145,6	10,5
1,6	-180	-25	101	-2,9	-45,6	144,6	-45,1	144,1	9,8
2,0	-196	-78	108	6,3	-39,5	139,9	-37,4	137,8	-19,6

U nastavku su dati dijagrami glavnih zaostalih napona u izmerenom mernom mestu u zavisnosti od dubine bušenja (Slika 11) i uzdužne, poprečne komponente zaostalih napona, kao i komponente zaostalih napona na smicanja (Slika 12).



Slika 11. *Glavni zaostali naponi.*

Figure 11. *Principal residual stresses*



Slika 12. *Uzdužne i poprečne komponente zaostalih napona i komponete zaostalih napona na smicanje.*

Figure 12. *Longitudinal and transverse residual-stress components and residual shear-stress components.*

Maksimalna izmerena uzdužna komponenta relaksiranih napona je σ_{max}=150 MPa, a u poprečnom pravcu skoro -50 MPa.



Slika 13. *Način merenja zaostalih napona.*

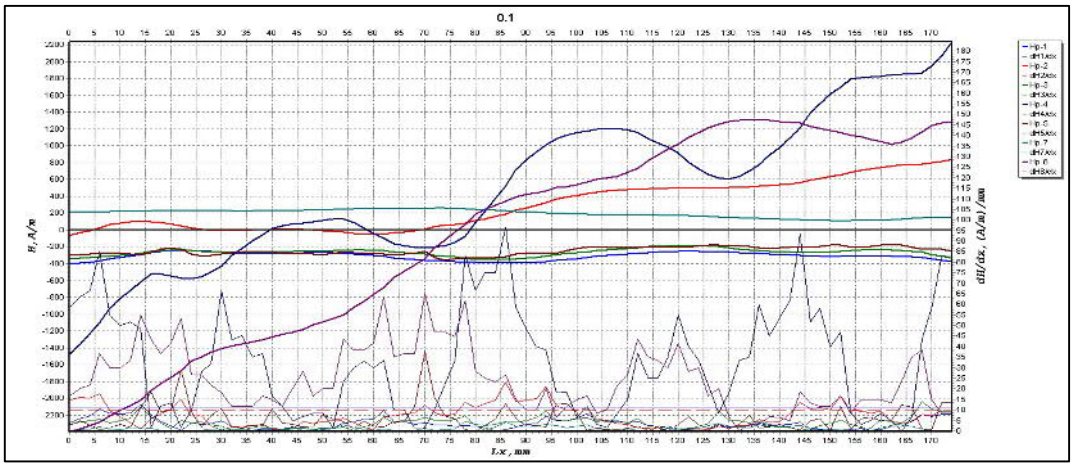
Figure 13. *Residual-stress measurement method.*

3.1.2. Merenje naponskog stanja metodom MPM

Metodom MPM izvršeno je uporedno merenje zaostalih napona (Slika 13) pre (Slika 14, Tabela 2) i posle (Slika 15, Tabela 3) dejstva eksplozije, K_{gr1} i K_{gr2}, respektivno, gde je K_{gr} – granična vrednost gradijenta.

Principi MPM metode. Mehanički naponi izazivaju magnetnu anizotropiju koja se po pravcu podudara sa vektorom maksimalnog momenta. Uticaj opterećenja na izmenu namagnetisanosti poznat je kao MAGNETOMEHANIČKI EFEKAT. Magnetomehanički efekat se pojavljuje u uslovima kada je energija deformacije viša od energije magnetnog polja Zemlje. Ovaj efekat je prikazan formulom:

$$m = \frac{K_{gr}}{K_{sr}} = \left[\frac{\sigma_v}{\sigma_{0,2}}\right]^2$$



Slika 14. *Magnetogram pre relaksacije.*

Figure 14. *Magnetogram before relaxation.*

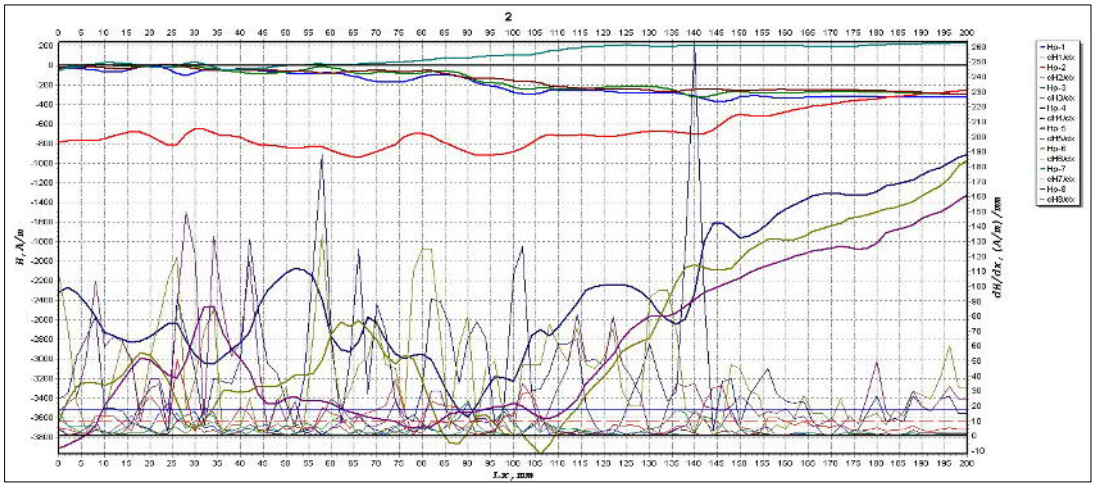
Tabela 2. *Automatska obrada podataka pre relaksacije.*

Table 2. *Automatic data processing before relaxation.*

Analysis of the file "0 1.mms" on all length.

Gradient H
Maximum value of gradient H on the segment : K(x,z)max = **608.261**
Point coordinates with maximum value of gradient H : X = **71.0** Z = **100.0**
Medium value of gradient H on the segment : K(x,z)med = **62.414**
Coefficient of a limit metal state : m = **9.746**

Channel Name	H min	H max	H med	S(H)	K med	K max	m max	S(K)
Hp-1	-400.8	-240.9	-311.2	53995.9	3.518	12.813	3.642	607.2
Hp-2	-65.6	837.3	287.7	51502.4	7.244	23.188	3.201	1250.4
Hp-3	-353.1	-184.1	-264.6	45900.4	3.989	13.813	3.462	689.3
Hp-4	-1476.5	2236.4	479.1	139328.3	33.479	96.625	2.886	5750.6
Hp-5	-358.9	-169.9	-249.2	43297.8	5.518	37.625	6.819	954.9
Hp-6	-2485.0	2335.0	340.9	247703.3	79.176	490.000	6.189	13815.0
Hp-7	109.5	257.6	194.8	33925.8	1.434	5.438	3.792	251.9
Hp-8	-2399.8	1313.1	-74.7	186741.5	24.371	65.000	2.667	4264.4



Slika 15. Magnetogram nakon relaksacije.

Figure 15. Magnetogram after relaxation.

Tabela 3. *Automatska obrada podataka nakon relaksacije.*

Table 3. *Automatic data processing after relaxation.*

Analysis of the file "2.mms" on the segment from 0 mm to 200 mm.

Gradient H
Maximum value of gradient H on the segment : K(x,z)max = **291.043**
Point coordinates with maximum value of gradient H : X = **107.0** Z = **110.0**
Medium value of gradient H on the segment : K(x,z)med = **105.553**
Coefficient of a limit metal state : m = **2.757**

Channel Name	H min	H max	H med	S(H)	K med	K max	m max	S(K)
Hp-1	-372.3	-0.9	-198.6	39767.6	5.225	22.125	4.234	1050.8
Hp-2	-938.0	-250.5	-664.8	133252.4	10.340	51.375	4.968	2078.8
Hp-3	-329.4	11.4	-160.8	32232.7	4.621	23.813	5.153	917.7
Hp-4	-3592.9	-909.9	-2303.0	461979.6	42.571	263.313	6.185	8559.4
Hp-5	-297.0	10.4	-151.5	30387.9	2.884	13.813	4.789	576.4
Hp-6	-3970.0	-965.0	-2744.3	549735.0	40.149	135.000	3.363	7970.0
Hp-7	-50.4	235.9	105.1	22527.4	3.077	15.625	5.078	607.4
Hp-8	-3909.5	-1326.5	-2855.8	571642.3	30.262	150.000	4.957	6071.4

Na Slikama 14 i 15, kao i Tabelama 2 i 3, važi sledeće:

m – dijagnostički parametar magneto-mehaničkog efekta

K_{gr} – granična vrednost gradijenta (Ako je K_{gr} približno jednako K_{max} – maksimalna vrednost gradijenata, onda se ispitivani predmet nalazi pred havarijom)

K_{sr} – srednja vrednost gradijenata u datom segmentu kontrole

σ_v – prekidna čvrstoća

$K_{gr} = m\ K_{sr}$

K_{sr} se očitava iz analize snimljenih magnetograma, a takođe i vrednosti **m**. Obe vrednosti se daju kroz automatsku obradu podataka.

$K_{1sr} = 62{,}414$ [A/m/mm] (pre relaksacije)

$K_{2sr} = 105{,}55$ [A/m/mm] (nakon relaksacije)

$m_1 = 9{,}746$

$m_2 = 2{,}757$

$$K_{gr1} = m_1 \cdot K_{1sr} = 9{,}746 \cdot 62{,}414 = 608{,}35 \text{ [A/m/mm]},$$ pre relaksacije

$$K_{gr2} = m_2 \cdot K_{2sr} = 2{,}757 \cdot 105{,}55 = 291 \text{ [A/m/mm]},$$ posle relaksacije

Zaostali naponi su se smanjili za 608,35/291 = 2,09 puta ili ako je početna vrednost σ_{02} za datu marku čelika 355MPa, onda su relaksirani zaostali naponi jednaki 355/2,09 = 169,86 MPa.

Uporednim merenjem se dokazalo da se izmerene vrednosti približno podudaraju.

Kvalitetnom relaksacijom zaostali naponi ne bi trebalo da pređu vrednost od 60MPa i to se u praksi dokazalo pri relaksaciji posuda (merenja su obavljana ultrazvučnom metodom prema odgovarajućoj šemi merenja).

Razlog kvalitetnije relaksacije na objektu je zbog dejstva eksplozije u zatvorenoj konstrukciji posude jer u tim uslovima eksplozija izaziva odgovarajuće vibracije koje se prostiru duž celog zavarenog spoja i te vibracije čine da se zaostali naponi znatno relaksiraju. Eksperiment na ograničenoj ploči nije imao dovoljan efekat razvijanja vibracija.

3.2. Prijem šavova obrađenih eksplozijom

Osnovni pregled je vizuelna kontrola, pri čemu se zapažaju tragovi eksplozivnog dejstva na metal u obimu 100%.

Ultrazvučnom tenzometrijom ocenjuje se stanje zaostalih napona nakon dejstva eksplozije.Veličina pratećih napona ne bi trebalo da pređe 60 MPa (60 N/mm^2).

Kontrola ultrazvučnom tenzometrijom je obavljana na materijalima debljine 10, 14, 18 i 22 mm. Mereno je jedno mesto na vertilanom i dva na prstenastom šavu, od čega je obavezno ukrsno mesto vertikale i horizontale.

Merenje je vršeno na prva četiri u seriji od 10 dekompenzatora, na 3 od 10 drugih i na jednom od sledećih dekompenzatora.

Podaci o eksplozivnom opterećenju i ultrazvučne tenzometrije pratećih napona zapisuju se u sertifikat dekompenzatora.

4. Zaključak

Relaksacija zaostalih napona primenom energije eksplozije se pokazala vrlo uspešnom na objektima Fabrike glinice „Birač“ u Zvorniku. Prednosti u odnosu na druge metode su značajne. Pre svega, cena je znatno niža, vreme izvođenja mnogo kraće, a eksplozijom se može vršiti i relaksacija austenitnih materijala. Nedostatak je u tome što je primena uglavnom moguća prilikom izgradnje velikih objekata..

Metoda najverovatnije nije naišla na širu primenu zbog specifičnih zahteva po pitanju sigurnosti i obuci operatera, a moguće je i da zbog svoje „zatvorenosti“ tehnologije nije dovoljno promovisana i prezentovana javnosti.

Izloženi podaci bi trebalo da animiraju stručnjake iz oblasti zavarivanja da primene ovu metodu u praksi. U ovom tekstu su dati osnovni podaci za operativnu tehnologiju, a detalje bi trebalo dodatno razraditi prilikom primene u konkretnom slučaju.

5. Zahvalnica

Osnovna saznanja o radu sa eksplozivom stekli smo od pok. Zorana Gligorića koji je bio višegodišnji član TEHWELD-a i na tome smo mu veoma zahvalni.

Neizmerno smo zahvalni i pok. dr. Brani Beatoviću na ostavljenoj literaturi u vezi sa primenom eksplozije pri relaksaciji zaostalih napona nakon zavarivanja.

Dr Brano Beatović je neposredno zaslužan što je bivši Energoinvest stekao pravo da paralelno sa Patonom AN iz Kijeva patentira relaksaciju napona primenom energije eksplozije. U Patonu su već vršili eksperimente po pitanju relaksacije tako što su detonirajuće štapine postavljali paralelno sa varom, u ZUT-u. Neki efekti su bili evidentni, ali je postojala nehomogenost po pitanju prisutnih, zaostalih napona.

Dr Brano Beatović je predložio da se promeni paralelna konfiguracija u sinusoidalnu i to se pokazalo kao delotvorno i odmah je bilo prihvaćeno.

Ovo je kratak istorijat koji je dr Brano Beatović ispričao članovima Tehweld-a.

U ime zahvalnih članova Tehweld-a,
Mića Đorđević

4. Conclusion

Residual-stress relaxation using explosive energy proved highly successful on structures at the “Birač” Alumina Factory in Zvornik. This method offers significant advantages over other techniques. Above all, the cost is much lower, the execution time is much shorter, and explosive treatment can also be used to relax residual stresses in austenitic materials. Its main limitation is that its application is generally feasible during the construction of large structures.

The method has most likely not achieved wider application because of specific safety requirements and the need for operator training. It is also possible that, due to the restricted nature of the technology, it has not been sufficiently promoted or presented to the professional public.

The presented data should encourage welding specialists to apply this method in practice. This text provides the basic information needed for operational technology, while the details should be further developed for each specific application.

5. Acknowledgements

We gained our basic knowledge of working with explosives from the late Zoran Gligorić, who was a long-standing member of TEHWELD, and we are very grateful to him for this.

We are also deeply grateful to the late Dr. Brano Beatović for the literature he left concerning the use of explosive energy for residual-stress relaxation after welding.

Dr. Brano Beatović was directly responsible for enabling the former Energoinvest to obtain the right, in parallel with the Paton Institute of Electric Welding from Kyiv, to patent stress relaxation using explosive energy. At the Paton Institute, experiments on stress relaxation had already been carried out by placing detonating cords parallel to the weld, in the HAZ. Some effects were evident, but inhomogeneity remained in the existing residual stresses.

Dr. Brano Beatović proposed replacing the parallel configuration with a sinusoidal one. This proved effective and was immediately accepted.

This is a brief historical account that Dr. Brano Beatović shared with the members of TEHWELD.

On behalf of the grateful members of TEHWELD,
Mića Đorđević.

Literatura / References

[1] „Projekat proizvodnje eksplozivnih radova i uklanjanja propratnih napona u zavarenim spojevima korpusa dekompenzatora obima 2,150m3 preduzeća glinice „BIRAČ“ (grad Zvornik), 1976.god.

[2] Muncaster, Peter W. A Practical Guide to TIG (GTA) Welding. Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 1991

Petar Tasić [1,a], Ismar Hajro [1,b]

MODELIRANJE UTICAJA UNOSA TOPLOTE NA GEOMETRIJU UGAONIH SPOJEVA PRI MAG ZAVARIVANJU U RAZLIČITIM POZICIJAMA

MODELLING INFLUENCE OF HEAT INPUT ON FILLET WELD GEOMETRY DURING MAG WELDING IN DIFFERENT POSITIONS

Originalni naučni rad / Original scientific paper

Rad primljen / Paper received:

Septembar 2024.

Rad prihvaćen / Paper accepted:

April 2026.

Adresa autora / Author's address:

[1] Univerzitet u Sarajevu – Mašinski fakultet, Vilsonovo šetalište 9, Sarajevo, BiH

email / ORCID ID:

[a] tasic@mef.unsa.ba / 0000-0002-3349-6116

[b] / 0000-0001-6148-895X

Ključne reči: unos toplote, MAG, ugaoni spoj, geometrija zavara, nelegirani čelik

Keywords: heat input, MAG welding, fillet weld, weld geometry, unalloyed steel

Rezime

Jedan od najčešće korištenih postupaka za zavarivanje nelegiranih konstrukcionih čelika je MAG, s obzirom da je relativno jednostavan i ima veliku brzinu deponovanja. Sa druge strane, postoje standardi koji definišu kvalitet zavarenih spojeva s obzirom na njegove geometrijske karakteristike. Ovaj rad opisuje uticaj unosa toplote na geometriju ugaonih spojeva pri MAG zavarivanju limova od nelegiranog čelika debljine 8 mm u položenoj i nadglavnoj poziciji. Parametri koji su nezavisno varirani su jačina struje i brzina zavarivanja. Uticaj je predstavljen pomoću modela koji se baziraju na linearnoj regresionoj analizi. Izvršeno je međusobno poređenje modela razvijenih za različite pozicije, kao i poređenje sa modelima dostupnim u literaturi.

Abstract

One of the most often used welding processes for unalloyed structural steels is MAG, which is relatively simple, yet achieving high deposition rates. On the other side, there are standards describing weld quality based on weld geometry. This paper describes influence of heat input on weld geometry for MAG fillet welds of unalloyed steel with thicknesses of 8 mm, in horizontal and overhead position. Independently varied parameters were welding current and speed. Influence is described through models based on linear regression analysis. Comparison is made between models developed for different positions, as well as with those available in literature.

Rad je u originalnom obliku objavljen u Zborniku radova sa 33. konferencije sa međunarodnim učešćem „Zavarivanje 2024“ održanog u Vrnjačkoj Banji, Srbija od 2. do 5. oktobra 2024. godine.

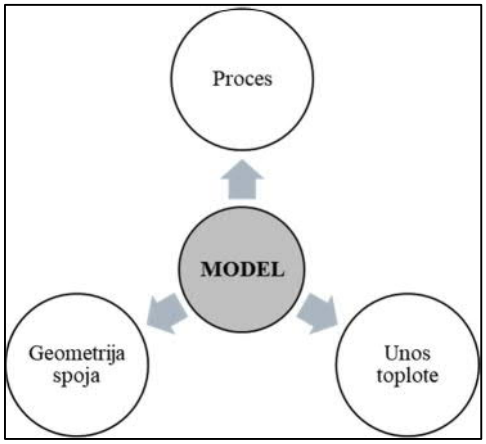
1. Uvod

Zavarivanje u zaštitnog atmosferi gasa je široko rasprostranjen postupak za spajanje u metalnoj industriji. Koristi se za nelegirane i niskolegirane čelike (MAG, sa aktivnim gasom), kao i visokolegirane čelike i legure aluminija (MIG, sa inertnim gasom). Ovaj postupak ima visoku brzinu deponovanja, stoga i značajno veću produktivnost nego TIG ili REL postupak [1]. Sam proces se može jednostavno modificirati ili prilagođavati, uključujući automatizaciju i robotizaciju [2]. Međutim, ovo je postupak koji se u značajnoj mjeri još uvijek koristi kao potpuno ručni. To znači da još uvijek postoji mogućnost pojave nesavršenosti i grešaka uzrokovanih ljudskim faktorom, odnosno zavarivačem [3,4].

Sa druge strane, velika brzina proizvodnje, koja je posljedica visoke brzine deponovanja MAG postupka, predstavlja izuzetan izazov za kontrolu kvaliteta spojeva, posebno ako se uzme u obzir da se kvalitet spojeva ne kontroliše samo u jednom koraku, i to nakon što su izvedeni. Jedan od suštinski najjednostavnijih pristupa je da se vrši kontrola unosa toplote, odnosno esencijalnih parametara zavarivanja (jačina struje, napon električnog luka i brzina zavarivanja) [5]. Naravno, da bi se ostvario kvalitetan spoj potrebno je kontrolisati i sve ostale neesencijalne parametre (na primjer protok zaštitnog gasa, uglove vođenja pištolja, dužinu slobodnog kraja žice). Ukoliko se ostvari ovakva kontrola, onda se cijelom dužinom spoja mogu postići iste geometrijske karakteristike (profil šava i dimenzije), odnosno indirektno i klasa kvaliteta [6]. Sami kriteriji prihvatljivosti za različite klase kvaliteta spojeva su definisani preko njihovih geometrijskih karakteristika, i definišu ih standardi kao što je na primjer EN ISO 5817. Neke od njih se mogu utvrditi bez razaranja (vizuelnim pregledom i mjerenjem), a neke sa razaranjem (mjerenjem na prethodno pripremljenom presjeku).

Kontrola parametara je posebno važna u slučaju da se MAG/MIG postupak koristi za aditivnu proizvodnju (WAAM, eng. *Wire Arc Additive Manufacturing*), s obzirom da se tada na osnovni materijal nanosi (navaruje) sloj po sloj metala. Tada kontrola geometrijskih karakteristika navarâ zapravo predstavlja kontrolu geometrijskih karakteristika konačnog proizvoda [7].

Koncept završne kontrole kvaliteta zavarenog spoja ili navara kroz kontrolu njegovih geometrijskih karakteristika nije nepoznat, a korišten je u većini slučajeva za hibridne postupke, zavarivanje laserom i elektronskim mlazom, kao i postupke zavarivanja upotrebom mehaničke energije. Upotreba takvog koncepta za kontrolu zavarenih spojeva i navara izvedenih elektrolučnim postupcima, pa tako i MAG/MIG postupkom, je tek nedavno privukla pažnju. Razlog za ovo je jednostavan, a to je široka dostupnost preporuka za izbor svih parametara zavarivanja u literaturi, ali i od strane proizvođača dodatnog materijala i izvora struje (posebno digitalno kontrolisanih) [8]. U mnogim slučajevima cilj je povećanje proizvodnje, održanje visokog kvaliteta i smanjenje troškova. Ovakav koncept se oslanja na matematički ili statistički model koji ima ključnu ulogu u povezivanju kontrole procesa zavarivanja, praćenja unosa toplote, i geometrije zavarenog spoja ili navara, kako je prikazano na Slici 1.



Slika 1. Šematski prikaz modela koji povezuje proces, unos toplote i geometriju spoja [8].
Figure 1. Schematic of the model linking the process, heat input, and joint geometry [8].

Interesantno je da su ovakvi modeli razvijani neuporedivo češće za ugaone spojeve nego za sučeone, što je razumljivo s obzirom da je oko 80% svih spojeva izvedeno kao ugaoni [9]. Neki od najstarijih modela daju jednostavnu vezu između katete z (ili debljine a) i unosa toplote Q, a razvijeni su za grupu elektrolučnih postupaka spajanja nelegiranih konstrukcionih čelika [10,11]. Pristup koji se koristi u novije vrijeme koristi statističke alate (na primjer regresiju), a odnosi se samo na jedan osnovni metal, jedan proces i, najčešće, specifičnu poziciju zavarivanja, što povećava tačnost takvih modela i olakšava njihovu primjenu [2,12,13]. Postoje i doktorske teze u kojima su predstavljeni rezultati razvoja modela za MAG [14] i lasersko zavarivanje [15]. U zadnje vrijeme su razvijeni modeli za MAG/MIG postupak bazirani na naprednim matematičkim i statističkim alatima, sa velikim potencijalom da budu iskorišteni u metalnoj industriji [16-18]. U nekim slučajevima, ovi modeli su uvezani sa mjerenjem geometrijskih karakteristika spoja u realnom vremenu upotrebom vještačkog vida [19,20]. Ovime je veza predstavljena na Slici 1 skoro u potpunosti ostvarena, gdje eventualno jedino nedostaje podešavanje parametara tokom samog procesa zavarivanja.

2. Eksperimentalni deo

Eksperimentalna ispitivanja su izvršena u Laboratorijama za zavarivanje na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Sarajevu. Uzorci su napravljeni od čelika S235JR u obliku pločica veličine 125×125 mm, debljine 8 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% CO_2. Protok zaštitnog gasa je pratio jačinu struje i kretao se u rasponu od 15 do 22 l/min. Svi spojevi su izvedeni kao jednoprolazni. Zavarivanje je izvršeno upotrebom digitalno kontrolisanog inverterskog uređaja proizvođača OTC Daihen, model Welbee P500L.

Tokom zavarivanja su mijenjane jačina struje i brzina zavarivanja. Napon i brzina žice su automatski podešeni prema specifikaciji proizvođača uređaja za zavarivanje, a u skladu sa jačinom struje, odabranim osnovnim i dodatnim materijalom i vrstom zaštitnog gasa. Pregled parametara zavarivanja izmjerenih tokom eksperimentalnog istraživanja je dat u tabeli 1.

Tabela 1. *Parametri zavarivanja korišteni u eksperimentu.*

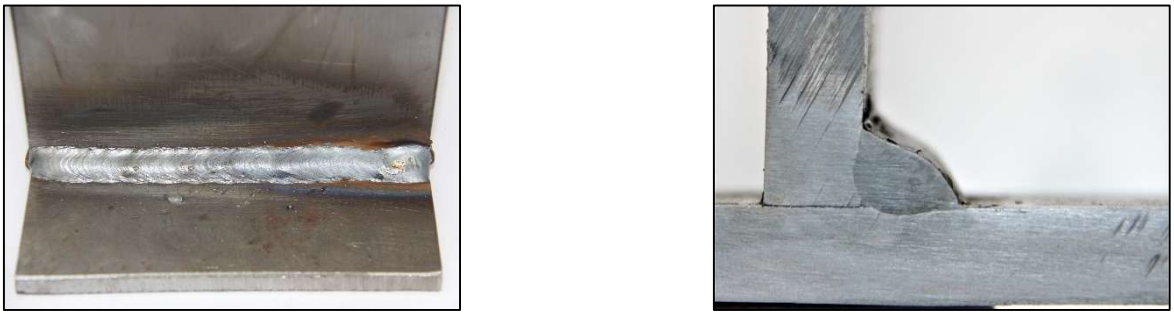
Table 1. *Welding parameters used in the experiment.*

Pozicija	Jačina struje *I* (A)	Napon *U* (V)	Brzina zavarivanja *w* (cm/min)	Unos toplote *Q* (kJ/mm)
Položena	165 – 290	22,2 – 28,5	13,9 – 60,9	0,6 – 1,3
Nadglavna	160 – 290	22 – 28,6	15,9 – 53,6	0,7 – 1,3

Unos toplote je izračunat primenom sledeće relacije:

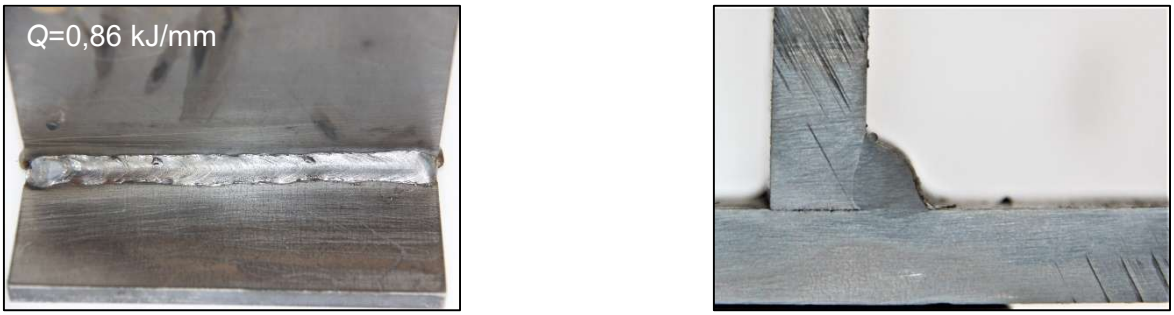
$$Q = \frac{I \cdot U}{w} \cdot \eta \qquad (1)$$

gde su I (A) jačina struje, U (V) napon električnog luka, w (cm/min) srednja brzina zavarivanja, a η termički stepen iskorištenja postupka koji iznosi između 0,80 i 0,85 [21]. Primjeri uzoraka za položenu i nadglavnu poziciju su prikazani na Slikama 2 i 3, respektivno.



Slika 2. *Izgled i presjek zavara za uzorak u položenoj poziciji.*

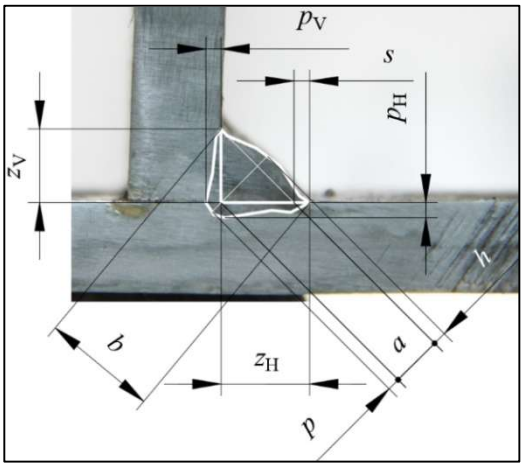
Figure 2. *Appearance and cross-section of the weld for the sample in the flat position.*



Slika 3. *Izgled i presjek zavara za uzorak u nadglavnoj poziciji.*

Figure 3. *Appearance and cross-section of the weld for the sample in the overhead position.*

Nakon zavarivanja su svi uzorci vizuelno ispitani, i oni koji nisu imali zadovoljavajući izgled (provare, preveliko prskanje i slično) su odbačeni. Za sve ostale spojeve izvršeno je presijecanje, te brušenje, poliranje i nagrizanje nitalom, nakon čega je izvršeno makroskopsko ispitivanje u skladu sa standardom ISO 17639. Nakon fotografisanja tako obrađenih zavara, upotrebom aplikacije AutoCAD je izvršeno mjerenje geometrijskih karakteristika, kako je šematski prikazano na Slici 4.



Slika 4. *Šematski prikaz mjerenje geometrijskih karakteristika na obrađenim zavarima.*

Figure 4. *Schematic of the measurement of geometric characteristics on the processed welds.*

Na presjeku su izmjerene veličine kateta (z_H i z_V) i penetracije (p_H i p_V) u horizontalnom i vertikalnom pravcu, i na osnovu njih su izračunate srednje vrijednosti zsr i psr, prema izrazima (2) i (3), respektivno.

$$z_{sr} = \frac{z_H + z_V}{2} \tag{2}$$

$$p_{sr} = \frac{p_H + p_V}{2} \quad (3)$$

3. Rezultati i diskusija

Nakon što su tokom eksperimentalnog dijela istraživanja prikupljeni svi podaci o ulaznim (jačina struje i brzina zavarivanja, odnosno unos toplote) i izlaznim (geometrijske karakteristike spojeva, odnosno kateta, širina lica šava, nadvišenje i penetracija) parametrima, upotrebom aplikacije Microsoft Excel je izvršena linearna regresiona analiza i uspostava veze ulaznih sa izlaznim parametrima. Glavni pokazatelji regresionih modela za položenu i nadglavnu poziciju su dati u Tabelama 2 i 3, respektivno. Na osnovu koeficijenta determinacije R^2 i značajnosti modela F se može donijeti ocjena o adekvatnosti razvijenih modela, odnosno njihovoj pouzdanosti i upotrebljivosti.

Tabela 2. *Pregled ključnih parametara regresionih modela za položenu poziciju.*

Table 2. *Overview of the key parameters of the regression models for the flat position.*

Geometrijska karakteristika	z_{sr}	b	h	p_{sr}
Koeficijent determinacije R^2	0,6871	0,6932	0,0303	0,0935
Značajnost F	$1{,}53\cdot10^{-8}$	$1{,}16\cdot10^{-8}$	0,3578	0,1004
Standardna greška	0,7838	1,0933	0,3940	0,5933
Broj opservacija	30	30	30	30

Tabela 3. *Pregled ključnih parametara regresionih modela za nadglavnu poziciju.*

Table 3. *Overview of the key parameters of the regression models for the overhead position.*

Geometrijska karakteristika	z_{sr}	b	h	p_{sr}
Koeficijent determinacije R^2	0,3772	0,3721	0,2149	0,0000
Značajnost F	0,0008	0,0009	0,0171	0,9690
Standardna greška	0,6697	0,9462	0,5513	0,7009
Broj opservacija	26	26	26	26

Kako se može vidjeti iz tabele 2, modeli za nadvišenje h i srednju penetraciju p_{sr} nisu upotrebljivi jer je značajnost modela F veća od 0,05. Model za p_{sr} u nadglavnoj poziciji nije upotrebljiv iz istog razloga, dok onaj za h ima koeficijent determinacije od svega 21%, što ga čini praktično neupotrebljivim. Polja sa ovim vrijednostima su radi lakšeg raspoznavanja u tabelama 2 i 3 označena sivom bojom. Modeli za srednju katetu z_{sr} i širinu lica šava b u nadglavnoj poziciji daju relativno niske vrijednosti koeficijenta determinacije od 37%, što ove modele čini nepouzdanim.

Od svih modela, samo dva, koja se odnose na z_{sr} i b u položenoj poziciji imaju vrijednosti R^2 od oko 70%, i to ih čini relativno pouzdanim i stoga upotrebljivim. Pregled koeficijenta regresionih modela za ove dvije geometrijske karakteristike je dat u Tabelama 4 i 5.

Tabela 4. *Pregled koeficijenata regresionog modela $z_{sr}=f(Q)$.*

Table 4. *Overview of the coefficients of the regression model $z_{sr} = f(Q)$.*

	Koeficijent	Standardna greška	P-vrijednost
Odsječak	2,38	0,60	0,0004
Q (kJ/mm)	5,11	0,65	$1{,}53\cdot10^{-08}$

Tabela 5. *Pregled koeficijenata regresionog modela b=f(Q).*

Table 5. *Overview of the coefficients of the regression model b = f(Q).*

	Koeficijent	Standardna greška	*P*-vrijednost
Odsječak	3,43	0,83	0,0003
Q (kJ/mm)	7,23	0,91	$1{,}16\cdot10^{-08}$

Kako se vidi iz Tabela 4 i 5, za oba modela su relevantni i odsječak i unos toplote *Q*, što je vidljivo na osnovu njihove *P*-vrijednosti, koja je manja od 0,05. Sada je moguće napisati i izraze (4) i (5) koji opisuju kako geometrijske karakteristike zavise od unosa toplote.

$$z_{sr}=2{,}38+5{,}11\cdot Q \quad (4)$$

$$b=3{,}43+7{,}23\cdot Q \quad (5)$$

Kako se vidi, upotrebljivi modeli su dobiveni samo za položenu poziciju. U literaturi su dostupni modeli za druge pozicije, uključujući i nadglavnu, i/ili za druge osnovne metale i/ili za druge postupke zavarivanja. Stoga nije moguće direktno poređenje dobijenih modela sa njima. Dodatno, u ovom radu je iskorištena linearna regresiona analiza, koja je najjednostavnija, dok se u drugim radovima umjesto nje često koristi i linearni i nelinearni *trendline*.

4. Zaključak

U ovom radu su predstavljeni rezultati istraživanja koje ima za cilj ispitati uticaj unosa toplote na geometrijske karakteristike MAG zavarenih spojeva na pločama nelegiranog čelika debljine 8 mm, izvedenih ručno kao jednoprolaznih, u položenoj i nadglavnoj poziciji. Kao ulazni parametar je iskorišten unos toplote *Q*, izračunat na osnovu mjerenja jačine struje *I* , napona *U* i brzine zavarivanja *w*. Kao izlazni parametri odabrane su srednja veličina katete z_{sr}, širina lica šava *b*, nadvišenje h i srednja penetracija psr, izmjerene na presjecima spojeva koji su dobijeni sječenjem, poliranjem i nagrizanjem zavarenih uzoraka.

Na osnovu dobijenih rezultata izvršena je regresiona analiza i uspostava osam modela veze ulaznih i izlaznih parametara. Dva od njih, za z_{sr} i *b* u položenoj poziciji, su se pokazala relativno pouzdanim i upotrebljivim, sa koeficijentom determinacije od oko 70%. Za ostale modele se ispostavilo da nemaju potrebni nivo pouzdanosti i relevantnosti. Općenito veoma niska vrijednost R^2 modela je sasvim sigurno posljedica toga što je u pitanju ručno zavarivanje. Značajno je primijetiti da modeli koji mogu biti ocijenjeni kao relativno pouzdani daju vezu unosa toplote sa veličinom katete i širinom lica šava, što su geometrijske karakteristike koje se mogu mjeriti bez razaranja zavarenog spoja, za razliku od nadvišenja i penetracije.

4. Conclusion

This paper presents the results of a study aimed at examining the effect of heat input on the geometric characteristics of MAG-welded joints in 8 mm-thick unalloyed steel plates. The joints were produced manually as single-pass welds in the flat and overhead positions. Heat input, Q, was used as the input parameter and was calculated based on measurements of current intensity, I, voltage, U, and welding speed, w. The selected output parameters were the mean leg size, zsr; weld-face width, b; reinforcement, h; and mean penetration, psr. These parameters were measured on joint cross-sections obtained by cutting, polishing, and etching the welded samples.

Based on the obtained results, regression analysis was performed, and eight models describing the relationship between the input and output parameters were established. Two of these models, for zsr and b in the flat position, proved to be relatively reliable and applicable, with coefficients of determination of approximately 70%. The remaining models did not show the required level of reliability or relevance. In general, the very low R^2 values of the models were most likely a consequence of manual welding. It is important to note that the models that can be considered relatively reliable describe the relationship between heat input and leg size, as well as between heat input and weld-face width. These geometric characteristics can be

Na osnovu ovoga iznesenog, moguće je opravdano zaključiti da je uzrok nepouzdanosti većine modela razvijenih u ovom radu uticaj zavarivača. Da bi se ovo potvrdilo potrebno je izraditi seriju uzoraka potpuno mehaniziranim ili automatiziranim MAG postupkom i izvršiti poređenje rezultata, budući da će u tim slučajevima uticaj čovjeka biti u potpunosti izbjegnut.

measured without destroying the welded joint, unlike reinforcement and penetration.

Based on the above, it can reasonably be concluded that the unreliability of most models developed in this study was caused by the influence of the welder. To confirm this, a series of samples should be produced using a fully mechanized or automated MAG process, and the results should be compared, since human influence would be completely eliminated in those cases.

Literatura / References

[1] Girón-Cruz, J. A., Pinto-Lopera, J. E., Alfaro, S. C. A., Weld bead geometry real-time control in gas metal arc welding processes using intelligent systems, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 123, 2022, pp. 3871-3884.

[2] Yaakub, M. Y., et al., Prediction of Welding Parameters and Weld Bead Geometry for GMAW Process in Overhead T-Fillet Welding Position (4F), *Advanced Materials Research*, 686 (2013), pp. 320-324.

[3] Popescu, M., Welding Ergonomics – Elements, Proceedings of the 21st International DAAAM Symposium, Zadar, Croatia, October 20-23, 2010

[4] Czifra, J., Vicikova, J., Szabo, P., Automated production system for pipelines of vessels, Proceedings of the 21st International DAAAM Symposium, Zadar, Croatia, October 20-23, 2010

[5] Tham, G., et al., Predicting the GMAW 3F T-Fillet Geometry and Its Welding Parameter, Procedia Eng., 41 (2012), pp. 1794-1799.

[6] Filho, C. A. M. D., et al., Weld bead geometry prediction using artificial neural networks and genetic algorithm hybrid model in GMAW, Proceedings of 27th International Congress of Mechanical Engineering, Florianopolis, Brazil, December 4-8, 2023

[7] Maraki, M. R., et al., Prediction and optimization of weld geometry in gas metal arc welding (GMAW) using least squares support vector machine, Journal of Welding Science and Technology of Iran, 8 (2023), ISSN: 2676-6787

[8] Tasic, P., et al., Prediction of Geometry of Pulsed GMAW Fillet Welded Joints of Structural Steels, Proceedings of the 31st DAAAM International Symposium, Mostar, B&H, October 21-24, 2020, pp. 444-0452

[9] Åstrand, E., Öberg, A. E., Jonsson, B., Cost Affecting Factors Related to Fillet Joints, in: Design, Fabrication and Economy of Metal Structures, Springer, 2013.

[10] Bosworth, M. R., Effective Heat Input in Pulsed Current Gas Metal Arc Welding with Solid Wire Electrodes, Welding Journal (Supplement), (1991), pp. 111-117.

[11] Miller, D. K., Funderburk R. S., Tools for reviewing Welding Procedures, Welding Journal, 80 (2001), 7, pp. 40-43.

[12] Gucwa, M., Beczkowski, R., The Effect of Heat Input on the Geometric Properties of Welded Joints, Archives of Foundry Engineering, 14 (2014), pp. 127-130., ISSN 1897-3310

[13] Ribeiro, R. A., et al., Predicting Weld Bead Geometry in the Novel CWGMAW Process, Welding Journal, 94 (2015) 9, pp. 301-311., ISSN 0043-2296

[14] Khalaf, G. H., Neuro-fuzzy control modelling for gas metal arc welding process, Ph. D. thesis, Department of Manufacturing Engineering, Loughborough University, Loughborough, UK, 1998

[15] 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

[16] Khrais, S., Al Hmoud, H., Al, A. A., Darabseh, T., Impact of Gas Metal ArcWelding Parameters on Bead Geometry and Material Distortion of AISI 316L, Journal of Manufacturing and Materials Processing, 7 (2023)

[17] He, Y., et al., Dynamic Modeling of Weld Bead Geometry Features in Thick Plate GMAW Based on Machine Vision and Learning, Sensors, 20 (2022)

[18] Biber, A., Sharma, R., Reisgen, U., Robotic welding system for adaptive process control in gas metal arc Welding, Welding in the world, 68 (2024), pp. 2311-2320.

[19] Lima, E. J., et al., Development of a model to predict weld bead geometry during the GMAW process using high speed camera, Proceedings of 7th International conference Trends in Welding Research, Pine Mountain, USA, May16-20, 2005

[20] Silva, R. H. G., et al., An adaptive orbital system based on laser vision sensor for pipeline GMAW welding, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 43 (2021)

[21] Hajro, I., Tasic, P., Influence of heat input and welding position on geometrical properties of GMAW fillet welds of unalloyed steel, TEM Journal, 9 (2020) 2, pp. 496-500.

Monika Cinkl [1], Tihomir Marsenić [1], Iva Deanović [2], Ivan Samardžić [2], Božo Despotović [3], Dejan Marić [2,a], Jadranka Eržišnik [4]

BITNE VARIJABLE PRI ZAVARIVANJU KOTLOVSKOG NISKOLEGIRANOG I VATROOTPORNOG VISOKOLEGIRANOG ČELIKA

ESSENTIAL VARIABLES AT WELDING BOILER LOW-ALLOY AND FIRE-RESISTANT HIGH-ALLOY STEEL

Stručni rad / Professional paper

Rad primljen / Paper received:

Avgust 2024.

Rad prihvaćen / Paper accepted:

Maj 2026.

Adresa autora / Author's address:

[1] Andritz TEP d.o.o, Slavonski Brod, Croatia

[2] Sveučilište u Slavonskom Brodu, Strojarski fakultet u Slavonskom brodu, Slavonski Brod, Croatia

[3] Društvo za Tehniku zavarivanja Slavonski Brod, Slavonski Brod, Croatia

[4] Fakultet strojarstva I brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu

email / ORCID ID:

[a] dmaric@unisb.hr / 0000-0002-0142-1750

Ključne reči: kutni spoj, niskolegirani čelik 16Mo3, visokolegirani čelik W.Nr.1.4713 (X10CrAlSi7)

Keywords: fillet weld, low alloy steel 16Mo3, high alloy steel W.Nr.1.4713 (X10CrAlSi7)

Rezime

U radu se opisuju specifičnosti prilikom kvalifikacije postupka zavarivanja između niskolegiranog čelika 16Mo3 i visokolegiranog feritnog čelika W.Nr.1.4713 (X10CrAlSi7). Izbor broja gusjenica, temperature predgrijavanja i vrijeme hlađenja utječu na prihvatljivost spoja. Kvalifikacija je izvedena u radioničkim uvjetima tvornice ANDRITZ TEP d.o.o.

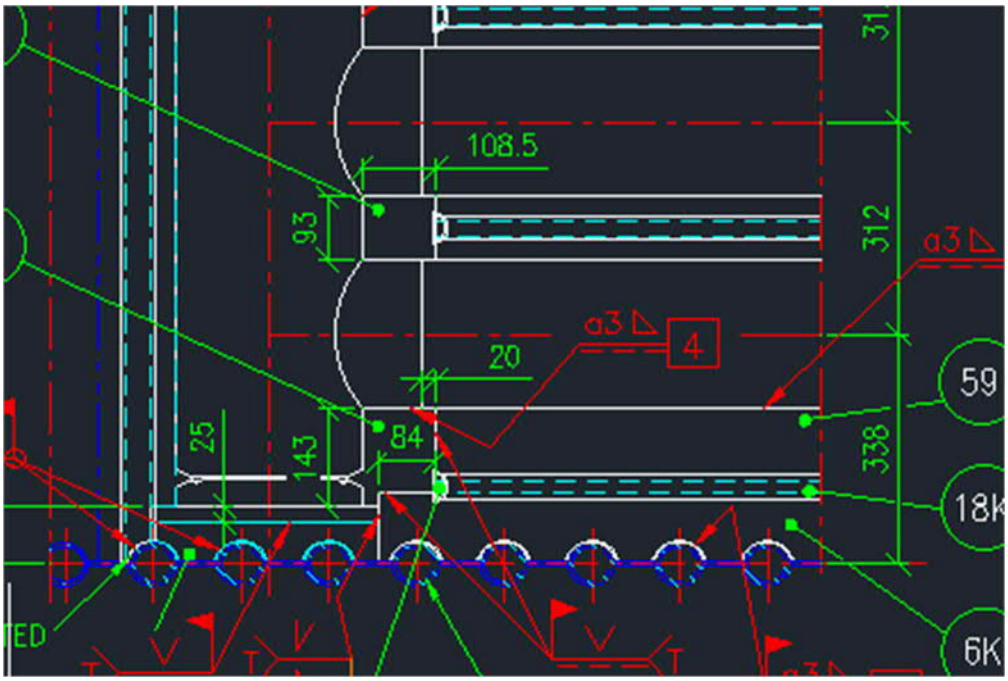
Abstract

The paper describes the specifics during the qualification of the welding procedure between low-alloyed steel 16Mo3 and high-alloyed ferritic steel W.Nr.1.4713 (X10CrAlSi7). The choice of number of runs, preheating temperature and cooling time affect the acceptability of the welded joint. The qualification was carried out in the workshop conditions of the ANDRITZ TEP d.o.o. factory.

Rad je u originalnom obliku objavljen u Zborniku radova sa 33. konferencije sa međunarodnim učešćem „Zavarivanje 2024“ održanog u Vrnjačkoj Banji, Srbija od 2. do 5. oktobra 2024. godine

1. Uvod

Specificiranje tehnologije zavarivanja u poduzećima gdje je dominatna tehnologija zavarivanje izvodi se u odjelima koji se bave tehnikom zavarivanja od stručnog zavarivačkog osoblja. Andritz TEP d.o.o. je tvrtka sa stoljetnom tradicijom proizvodnje različitih tipova kotlovskih postrojenja gdje je zavarivanje temeljna tehnologija spajanja i koja u svojoj organizaciji ima Službu tehnike zavarivanja. Prilikom obrade tehničke dokumentacije na jednom od projekta koja se odnosila na proizvodnju „Recovery kotla“, odnosno „Boiler bank“ komponente, potrebno je bilo propisati tehnologiju zavarivanja za kutni zavar. Kutni zavar se odnosio na zavar između komore od niskolegiranog čelika, kvalitete 16Mo3 i brtvenog lima, vatrootpornog čelika W.Nr.14713 (Slika 1). Zbog specifičnosti dimenzija i kvalitete osnovnih materijala provedena je kvalifikacija postupka zavarivanja u skladu s proizvodnom normom EN 12952-5 i normom za kvalifikaciju postupaka zavarivanja EN ISO 15613. Varijable u pWPS-u definirane su od strane tehnologa zavarivanja.



Slika 1. *Kutni spoj oznake 4, zahtjev sa crteža a3.*

Figure 1. *Fillet joint designated as 4, drawing requirement a3.*

2. Osnovni materijali

2.1. Niskolegirani čelik 16Mo3

Cijevi uključuju sabirnice za tlačnu namjenu i rad na povišenim i visokim temperaturama proizvode se i isporučuju u skladu s harmoniziranom normom EN 10216-2. Čelik 16Mo3 (W.Nr. 1.5415) je feritno-perlitne mikrostrukture i isporučuje se u normaliziranom stanju. Primjenjuje se za tlačnu namjenu maksimalno do temperature 500 °C. Najčešće se koristi za rad na visokim temperaturama u parnim kotlovima, turbinama, rafinerijama nafte i drugim postrojenjima. 16Mo3 je niskolegirani čelik, glavni legirni element mu je molibden. Molibden u leguri sprečava pojavu visokotemperaturne krhkosti popuštanja i povisuje trajnu čvrstoću pri povišenim temperaturama [1]. S ugljikom stvara posebni karbid Mo2C koji usporava puzanje. Kemijski sastav čelika koji se zavarivao za kvalifikaciju postupka zavarivanja je naveden u Tabeli 1. Ovaj čelik dobro je zavarljiv, ali se preporučuje kontroliranje procesa zavarivanja. Iskustva proizvođača kotlovskih komponenti uključujući i ANDRITZ TEP d.o.o. su takva da se predgrijavnje treba primjeniti za debljine stijenki 30 mm i više. Preporuke norme EN1011-1 su stroža, predgrijavanje se zahtjeva za debljine stijenki većih od 15 mm. U slučajevima, gdje je debljina zavara veća od 35 mm, kotlovska norma zahtjeva toplinsku obradu nakon zavarivanja (PWHT) u svrhu popuštanja zaostalih napetosti [2].

Tabela 1. *Kemijski sastav 16Mo3 čelika iz certifikata (mas. %).*

Table 1. *Chemical composition of 16Mo3 steel from the certificate (wt.%).*

16Mo3	C	Mn	S	N	Cu	Si	P	Cr	Mo	Ni	Sn	Al
	0.17	0.73	0.003	0.062	0.17	0.22	0.011	0.16	0.29	0.13	0.014	0.025

2.2. Vatrootporni visokolegirani feritni čelik W.Nr. 1.4713 (X10CrAlSi7)

Čelik se smatra vatrootpornim ako se odlikuje malim izgaranjem u struji plinova pri temperaturama iznad 600 °C [1]. Prema SEW 470 vatrootpornim čelikom se smatra onaj koji pri zadanoj temperaturi gubi prosječno 1 g/m²h svoje mase, a pri temperaturi višoj za 50 K prosječno najviše 2 g/m²h [1]. Viskotemperaturni vatrootporni nehrđajući čelici feritne mikrostrukture dopunjuju austenitne čelike. Austenitni čelici imaju značajno veću trajnu granicu razvlačenja R_{p1}/10000 nego feritni čelici, dok feritini čelici imaju značajno veću otpornost prema oksidirajućim plinovima koji sadržre sumpor [1] i bolju otpornost prema napetosnoj koroziji u kloridnim medijima [3]. Treba naglasiti da feritni čelici su znatno jeftiniji od austenitnih. Glavni legirni element u feritnim čelicima je krom. Njegov pozitivan učinak na korozivnu postojanost na zraku na povišenim temperaturama je pojačan silicijem i aluminijem. Feritni čelici skloni su sljedećim štetnim pojavama:

- interkristalnoj koroziji,
- pogrubljenju zrna grijanjem iznad 850 °C,
- stvaranju delta-faze (FeCr) pri držanju temperaturnom rasponu (520 – 850 °C) što povećava tvrdoću
- pojavi krhkosti 475, što uzrokuje smanjenje duktilnosti [3].

X10CrAlSi7 pripada grupi visokolegiranih čelik sa visokim sadržajem kroma, poznat je kao "feritni nehrđajući čelik". Ovaj čelik ima dobru otpornost na oksidaciju i koroziju na visokim temperaturama, ali može biti sklon stvaranju krhkih struktura kada se zavaruje. U Tabeli 2 je prikazan kemijski sastav ovog čelika naveden u certifikatu materijala.

Tabela 2. *Kemijski sastav čelika 1.4713 (X10CrAlSi7) (mas. %).*

Table 2. *Chemical composition of 1.4713 steel (X10CrAlSi7) (wt.%).*

X10CrAlSi7	C	Mn	S	Si	Mo	P	Al	Co	Cr
	0.05	0.39	0.001	0.61	0.03	0.026	0.95	0.03	6.16

-

Ovaj čelik ima vatrootpornost na zraku do 800°C. Čelik X10CrAlSi7 spada u grupu 7.1 prema ISO/TR 20172.

2.2.1. Zavarljivost čelika X10CrAlSi7

Zavarljivost X10CrAlSi7 čelika može biti izazovna zbog specifičnog kemijskog sastava i prisutnosti aluminija. Osnovni problemi koji se javljaju pri zavarivanju feritnih čelika su [3]:

- izrazito povećanje zrna u zoni utjecaja topline (ZUT);
- pojava krhkosti;
- sklonost senzibiliziranju pri hlađenju ispod 925 °C;
- pojava smanjenje korozijske postojanosti u području zavarenog spoja

Prisustvo aluminija u čeliku može otežavati jer aluminij ima tendenciju stvaranja oksida. To može dovesti do formiranja poroznosti i loše kvalitete zavara. Prije zavarivanja potrebno je pažljivo očistiti površine materijala kako bi se uklonile nečistoće. Preporučuje se sušenje dodatnog materijala i predgrijavanje osnovnog materijala kako bi se smanjio rizik od pukotina. Kvaliteta zavarenih spojeva značajno ovisi o [3]:

- tehnici zavarivanja
- predgrijavanju
- zaštitnom plinu
- odabiru dodatnog materijala
- naknadnoj toplinskoj obradi.

Kod odabira dodatnog materijala, treba obratiti pažnju da dodatni materijal bude kompatibilan s kemijskim sastavom X10CrAlSi7 kako bi se izbjegli problemi poput krhkosti zavara. Prilikom zavarivanja ovog čelika, preporučuje se kontrola međuprolazne temperature i hlađenja kako bi se minimizirao rizik od stvaranja napetosti i pukotina. Zbog rasta zrna u zoni utjecaja topline, unos topline se treba minimalizirati, držati ispod 1.5 kJ/mm. Preferirani postupci zavarivanja su oni pod zaštitom zaštitnih plinova u inertnoj atmosferi, poput TIG, MIG, ali i REL postupak [4].

3. Dodatni materijal

Temeljem iskustva proizvođača kotlovskih postrojenja za zavarivanje feritnog čelika W.Nr.14713 i 16Mo3 koristi se dodatni materijal, klasifikacijske oznake EN ISO 21952-A: WMoSi za TIG postupak zavarivanja. Za zavarivanje ove kombinacije materijala odabrana je TIG žica trgovačkog naziva DMO IG koja se primjenjuje za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika. Zbog svog kemijskog sastava (Tabela 3), žica se primjenjuje za zavarivanje komponenti koje rade u području temperatura od -30 do 500 °C. Depozit zavara izveden ovom žicom ima veliku žilavost, otpornost na pojavu pukotina i starenje.

Tabela 3. *Kemijski sastav DMO-IG žice iz certifikata materijala (mas. %).*

Table 3. *Chemical composition of DMO-IG wire from the material certificate (wt.%).*

DMO IG	C	Si	Mn	Mo	P	S	Cr	Ni	V	Cu	Al	Ti
	0.10	0.62	1.17	0.52	0.010	0.013	<0.1	<0.1	<0.01	<0.1	<0,01	<0.01

Utjecaj kemijskih elemenata na dodatni materijal je sledeći [1]:

- Ugljik (C): najvažniji je element i najjače utječe na svojstva čelika (ne smatra se legirajućim elementom). Povećanjem sadržaja C povećava se čvrstoća i granica razvlačenja, a smanjuje duktilnost.
- Mangan (Mn): je austenotvorac, povećava prokaljivost i čvrstoću čelika.
- Molibden (Mo): povisuje trajnu čvrstoću i sprečava pojavu visokotemperaturne krhkosti popuštanja.
- Silicij (Si): je jaki dezoksidator, povisuje čvrstoću i otornost na trošenje, a posebno granicu razvlačenja.

4. Specifičnosti zavarivanja čelika 16Mo3 i X10CrAlSi7

Temeljem zahtjeva sa crteža, bilo je potrebno zavariti kutni spoj veličine a3 mm između komore promjera 219,1 mm i debljine 30 mm, kvalitete 16Mo3, i vatrootpornog visokolegiranog čelika X10CrAlSi7, debljine 6 mm, što je predstavljalo izazov zbog značajnih razlika u njihovim kemijskim sastavima, mehaničkim svojstvima i ponašanju na visokim temperaturama. TIG postupak zavarivanja je odabran zbog zavarivanja u prinudnim položajima i ograničenoj dužini zavarivanja.

Odabrani dodatni materijal treba biti kompatibilan s oba tipa čelika kako bi se izbjeglo stvaranje neželjenih faza, krhkosti ili korozije. Treba sadržavati elemente koji minimiziraju razliku u koeficijentu toplinske vodljivosti između dva materijala.

Niskolegirani čelici poput 16Mo3 obično zahtjevaju prethodno predgrijavanje kako bi se smanjila mogućnost stvaranja zaostalih napetosti, povećanja tvrdoće i pukotina. Temperatura predgrijavanja može biti između 100 °C i 200 °C, ovisno o debljini materijala.

Tijekom zavarivanja treba osigurati ravnomjeran unos topline kako bi se izbjegla prekomjerna lokalna zagrijavanja koja bi mogla prouzrokovati promjene u mikrostrukturi. Sporije zavarivanje može uzrokovati prekomjerno zagrijavanje i pogrubljene zrna, dok prebrzo može dovesti do nedovoljne penetracije i lošeg kvaliteta zavara.

Međuprolazne temperature trebaju se kontrolirati kako bi se osigurala konzistentnost u zavarima i izbjeglo stvaranje nepovoljnih mikrostruktura.

Nakon zavarivanja, kontrolirano hlađenje je ključno kako bi se smanjila mogućnost stvaranja zaostalih napetosti i pukotina.

PWHT se nije primjenjivala jer zavar ima malu veličinu a3, a može se koristiti samo za relaksaciju zaostalih naprezanja komore 16Mo3 i metala zavara, također nepraktična je za izvođenja na ovakvim spojevima, zbog lokacija zavarenih spojeva i na kraju zbog troškova izrade.

Kvalifikacija postupka zavarivanja izvedena je u skladu s normom ENISO 15613, a ispitivanja zavarenog spoja provedena su u skladu s normom EN ISO 15614-1.

5. Zavarivanje uzoraka

5.1. Zavarivanje čelika 16Mo3 i X10CrAlSi7 – Prvi pokus

U prvom pokusu zavarena je komora 16Mo3 promjera 219.1 mm, debljine 30 mm i lim X10CrAlSi7 debljine 6 mm, TIG postupkom zavarivanja. Kao dodatni materijal odabrana je Böhlerova žica DMO-IG (WMoSi), promjera 2,4 mm. Korištene jakosti struje bile su od 200 do 210 A, zbog debljine komore. Primjenjeni zaštitni plin je argon protoka 9 l/min. Zavar je izveden u 1 prolazu u PB i PF položaju bez predgrijavanja (Slike 2 i 3). Unos topline se kretao od 1.2 do 1.6 kJ/mm. Predgrijavanje se nije primjenjivalo kako bi se izbjeglo tijekom proizvodnog zavarivanja na manjim debljinama stijenki od 5 do 30 mm.



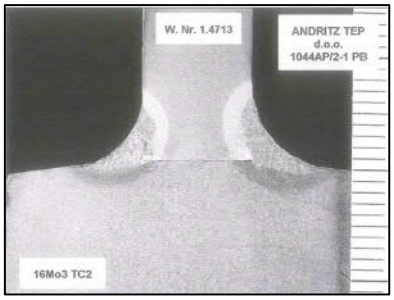
Slika 2. *Zavareni uzorak - PB položaj.*

Figure 2. *Welded sample in the PB position.*



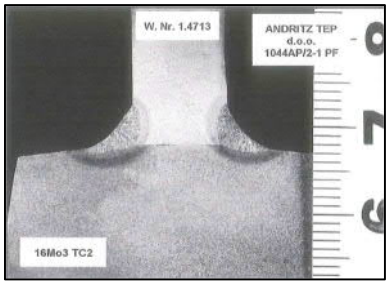
Slika 3. *Zavareni uzorak - PF položaj.*

Figure 3. *Welded sample in the PF position.*



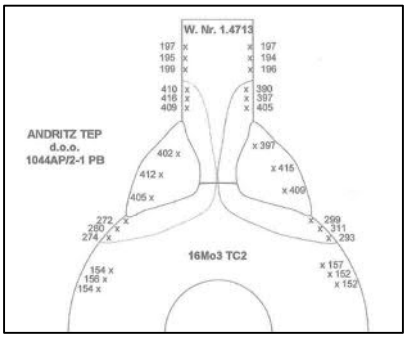
Slika 4. *Makro presjek uzorka 1 – PB položaj.*

Figure 4. *Macrosection of sample 1 in the PB position*



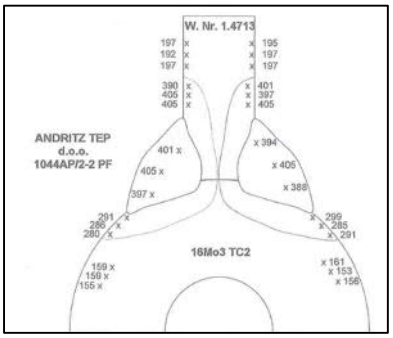
Slika 5. *Makro presjek uzorka 1 – PF položaj.*

Figure 5. *Macrosection of Sample 1 in the PF position.*



Slika 6. *Izmjerena tvrdoća 1 - PB položaj.*

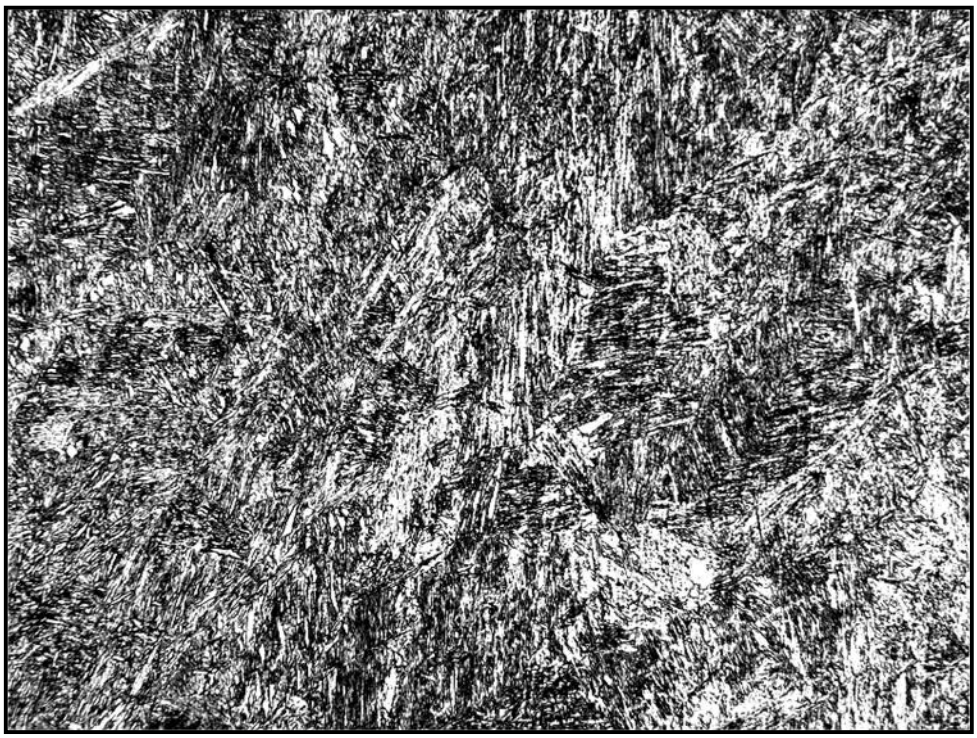
Figure 6. *Measured hardness of Sample 1 in the PB position.*



Slika 7. *Izmjerena tvrdoća 1 - PF položaj.*

Figure 7*. Measured hardness of Sample 1 in the PF position.*

Na makro presjeku (Slika 4), PB položaj, može se vidjeti jedva primjetna greška vezivanja, odnosno nedovoljna penetracija zavara u komoru, koja je posljedica zavarivanja u jednom prolazu veličine kutnog zavara a3 mm. Ovo odstupanje upućuje da se TIG ručni postupkom zavarivanja trebaju izvoditi prolazi manjih debljina. Mjerenje tvrdoće pokazuje da je tvrdoća viša od vrijednosti 380HV specificiranoj u normi za kvalifikaciju postupaka ISO EN 15614-1. Sa makro uzoraka, Slike 6 i 7 gdje je pokazana distribucija tvrdoća, može se vidjeti da su tvrdoće veće u području metala zavara i lima X10CrAl7 u zoni utjecaja topline (ZUT) na oba položaja zavarivanja. Prosječne tvrdoće iznose, PB položaj; zavar 407 HV10 / lim ZUT 405 HV10, PF položaj zavar 398 HV10 / lim ZUT 397 HV10. Problematična je tvrdoća u metalu zavara posebno jer je depozit metala zavara izveden TIG žicom WMoSi. Prema ISO/TR 20172 lim spada u grupu 7.1, a prema normi EN ISO 15614-1 nema ograničenja vrijednosti tvrdoće za tu grupu materijala, ona se u principu definira ili dogovara prije kvalifikacije postupka zavarivanja. Na Slici 8 je mikrostruktura depozita zavara. Uočena struktura je feritno martenzitna, što uzrokuje povećanje tvrdoće u metalu zavara. Također sama struktura lima X10CrAlSi7 je feritno martenzitna, a trebala bi biti feritna što utječe na tvrdoću ZUT-a lima.

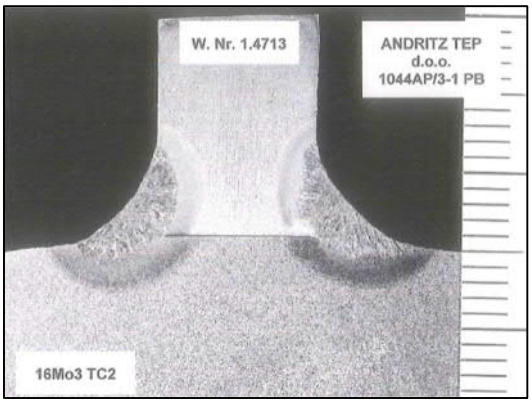


Slika 8. *Mikrostruktura metala zavara (feritno martenzitna).*

Figure 8. *Microstructure of the weld metal (ferritic-martensitic).*

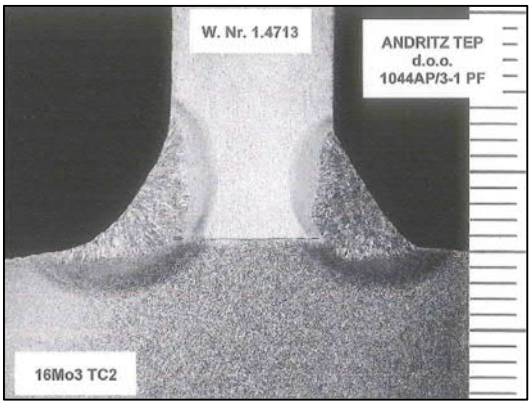
5.2. Zavarivanje 16Mo3 i X10CrAlSi7 – Drugi pokus

U drugom testnom uzorku zavareni su uzorci jednakih dimenzija i kvalitete, i korišten je isti dodatni materijal, Böhlerova žica DMO-IG (WMoSi) (Slike 9 i 10). Parametri zavarivanja, struja zavarivanja, unos topline su se kretali u približno jednakim granicama. Razlika u odnosu na prvi pokus je u tome što je zavarivanje izvedeno u dva sloja, odnosno dva prolaza. Unos topline za prvi prolaz iznosio je 1.35 kJ/mm, a za drugi prolaz 2.4 kJ/mm.



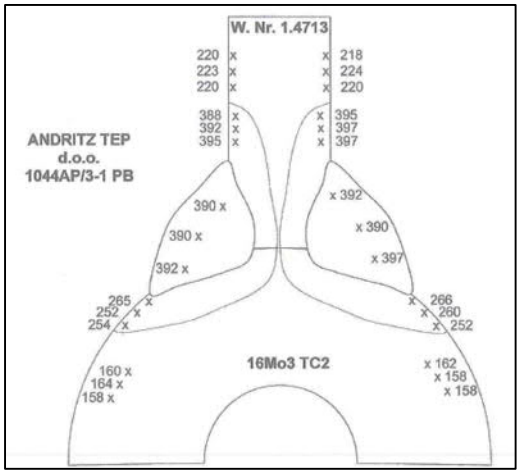
Slika 9. *Makro presjek uzorka 2 – PB položaj.*

Figure 9. *Macrosection of Sample 2 in the PB position.*



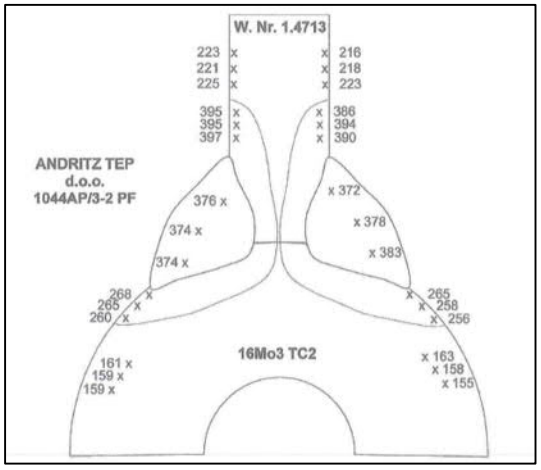
Slika 10. *Makro presjek uzorka 2 – PF položaj.*

Figure 10. *Macrosection of Sample 2 in the PF position.*



Slika 11. *Izmjerena tvrdoća 2 - PB položaj.*

Figure 11. *Measured hardness of Sample 2 in the PB position.*



Slika 12. *Izmjerena tvrdoća 2 - PF položaj.*

Figure 12*. Measured hardness of Sample 2 in the PF position.*

Kvaliteta zavarenog spoja je prihvatljiva, slike 9 i 10. Mjerenje tvrdoće na makro presjecima (Slike 11 i 12) pokazuje da je tvrdoća i u ovom slučaju, primjenom dvoslojnog zavarivanja veća od dopuštene. Prosječne tvrdoće iznose, PB položaj; zavar 391 HV10 / lim ZUT 394 HV10, PF položaj zavar 376 HV10 / lim ZUT 393 HV10. U odnosu na prvi pokus-uzorak, prosječna tvrdoća je niža za 4%, ali i dalje ne ispunjava zahtjeve norme za kvalifikaciju postupaka zavarivanja. U PF položaju tvrdoća je neznatno veća od dopuštene.

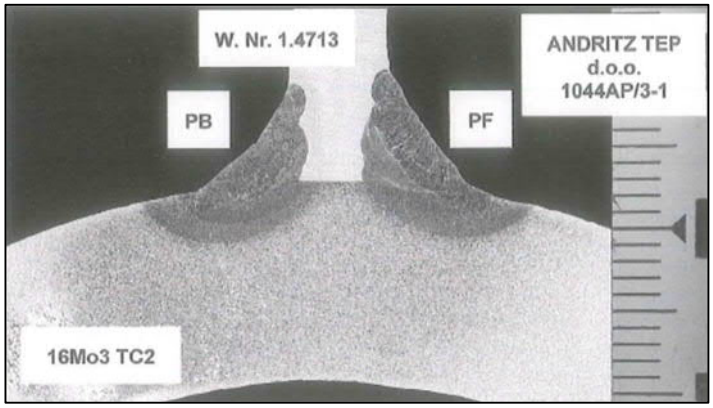
5.3. Zavarivanje 16Mo3 i X10CrAlSi7 - Treći pokus

U prethodna dva pokusa može se zapaziti da je tvrdoća neznatno niža u PF položaju zavarivanja, gdje je zabilježen veći unos topline. Zbog toga, zavarivanje trećeg uzorka koji je bio jednakih dimenzija i kvalitete kao i prethodna dva uzorka izvedeno je uz predgrijavanje i zavarivanje u dva sloja, ukupno dva prolaza. Prema iskustvu i smjernicama za debljine 30 mm i veće potrebno je provesti predgrijavanje komore [5], koje je u ovom slučaju izvedeno plinskim plamenom, slika 13. Parametri zavarivanja bili su približno jednaki parametrima primjenjenim u pokusima 1 i 2 uz primjenu predgrijavanja koje je minimalno iznosilo 120 °C. Unos topline je odgovarao unosu topline u drugom pokusu. Međuprolazna temperatura se kretala između 190 i 210 °C. Zavareni spoj se kontrolirano hladio nakon zavarivanja, odnosno bio je pokriven vunom.



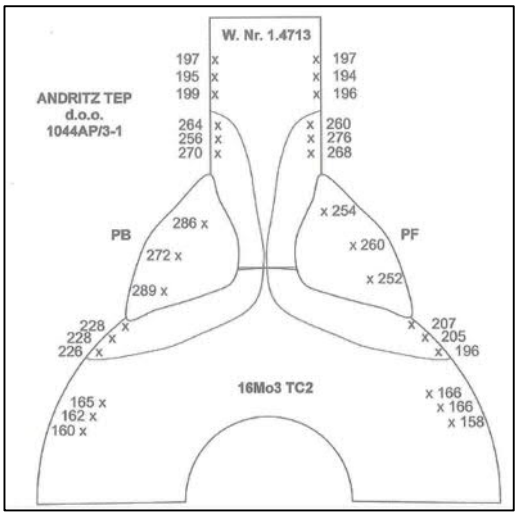
Slika 13. *Predgrijavanje 16Mo3 komore.*

Figure 13. *Preheating of the 16Mo3 chamber.*



Slika 14. *Makro presjek zavara 3 - PB/PF položaj.*

Figure 14. *Macrosection of Weld 3 in the PB/PF position.*



Slika 15. *Izmjerena tvrdoća 3 - PB/PF položaj.*

Figure 15. *Measured hardness of Sample 3 in the PB/PF position.*

Sa Slike 14 makro presjeka zavara, pokus 3, vidi se da je zavar prihvatljive kvalitete bez anomalija. Na Slici 15 prikazane je distribucija tvrdoća u zavarenom spoju, pokus 3. Maksimalno izmjerena tvdoća u metalu zavara iznosila je 289 HV10, dok je na limu ZUT 276 HV10 što ispunjava zahtjev specificiran u normi za kvalifikaciju postupaka EN ISO 15614-1.

6. Zaključak

Prilikom zavarivanja čelika različitog kemijskog sastava, mehaničkih svojstava i dimenzija spoja, prilikom definiranja, odnosno kvalifikacije upute za zavarivanja, potrebno je obratiti pažnju na sljedeće varijable:

- Oblik spoja; kod kutnog spoja treba obratiti pažnju na protaljivanje u korijenu zavara.
- Postupak zavarivanja; odabir ovisi o dostupnosti zavarivanja na konstrukciji, položaju zavarivanja, opsegu zavarivanja, veličini zavara, dodatnom materijalu, kriteriju prihvatljivosti zavarenog spoja.
- Specificiranu veličinu zavara; kod TIG zavarivanja kutnih spojeva, posebnu pažnju treba obratiti na debljinu depozita u korijenom zavaru kako bi se izbjegle greške vezivanja. Debljina depozita prolaza treba biti maksimalno a = 2.5 mm.
- Osnovni materijal; kod zavarivanja raznorodnih čelika, različitih debljina treba uzeti u obzir; temperaturu predgrijavanja koja ovisi o kvaliteti osnovnog materijala i debljini, međuprolaznoj temperaturi, unosu topline. Temperatura predgrijavanja i međuprolazna temperatura se mogu odrediti na temelju iskustva, ili na temelju preporuka normi ili na temelju izračuna navedenih u stručnoj literaturi ili kao što je to u ovom slučaju zavarivanjem više pokusa kako bi se postigla zahtjevana kvaliteta zavarenog spoja. Minimalna temperatura predgrijavanja iznosi 120°C, dok je maksimalna međuprolazna temperatura 210°C. Osnovni materijal X10CrAlSi7 pokazuje uvjetno dobru zavarljivost zbog potrebe predgrijavanja, ograničene međuprolazne temperature i parametara zavarivanja.
- Unos topline utječe na mikrostrukturu zavarenog spoja, posebno na osjetljivi član u spoju X10CrAlSi7 koji je sklon pogrubljenu zrna i krhkosti. Utvrđeni unos topline pokazao se najprihvatljivijim.
- Dodatni materijal treba biti kompatibilan s oba materijala u spoju, i koji će tijekom zavarivanja stvoriti prihvatljivu mikrostrukturu, prvenstveno strukturu bez krhkih faza i spoj koji ispunjava zahtjeve u eksploataciji. Zbog svoje karakteristične vatrootpornosti i radnih uvjeta u kojima će se koristiti X10CrAlSi7, potrebno je provjeriti radne uvjete komponente, te nakon toga definirati dodatni materijal prihvatljivih svojstava.

6. Conclusion

When welding steels with different chemical compositions, mechanical properties, and joint dimensions, attention should be paid to the following variables when defining or qualifying the welding procedure specification:

- Joint design: In fillet joints, special attention should be paid to penetration at the weld root.
- Welding process: The selection depends on welding accessibility on the structure, welding position, welding scope, weld size, filler material, and acceptance criteria for the welded joint.
- Specified weld size: In TIG welding of fillet joints, special attention should be paid to the deposit thickness in the root pass to avoid lack-of-fusion defects. The deposit thickness per pass should not exceed a = 2.5 mm.
- Base material: When welding dissimilar steels with different thicknesses, the preheating temperature, which depends on the base-material grade and thickness, interpass temperature, and heat input, should be considered. The preheating and interpass temperatures can be determined based on experience, standard recommendations, calculations provided in the technical literature, or, as in this case, by welding several test samples to achieve the required welded-joint quality. The minimum preheating temperature is 120 °C, while the maximum interpass temperature is 210 °C. The X10CrAlSi7 base material shows conditionally good weldability because preheating, controlled interpass temperature, and controlled welding parameters are required.
- Heat input: Heat input affects the microstructure of the welded joint, especially the sensitive member of the joint, X10CrAlSi7, which is prone to grain coarsening and embrittlement. The established heat input proved to be the most acceptable.
- Filler material: The filler material should be compatible with both materials in the joint and should produce an acceptable microstructure during welding, primarily a structure without brittle phases and a joint that meets service requirements. Because of the characteristic heat resistance of X10CrAlSi7 and the service conditions in which it will be used, the operating conditions of the component should

Prilikom definiranja tehnologije zavarivanja zavarivačko osoblje; tehnolozi zavarivanja ili inženjeri zavarivanja, prije kvalifikacije postupka zavarivanja trebaju provjeriti sve bitne varijable koje utječu na kvalitetu zavarenog spoja. Ponekad naizgled jednostavni zavareni spoj može generirati odstupanja koja mogu utjecati na kvalitetu proizvoda, kašnjenje zavarivanja u proizvodnim pogonima i rokove isporuke.

be verified first. After that, a filler material with acceptable properties should be defined.

When defining welding technology, welding personnel, welding technologists, or welding engineers should check all essential variables that affect welded-joint quality before qualifying the welding procedure. Sometimes, an apparently simple welded joint can generate deviations that may affect product quality, delay welding activities in production facilities, and extend delivery deadlines.

Literatura / References

[1] Mladen Novosel, Dragomir Krumes, Posebni čelici, Slavonski Brod, 1998,

[2] EN 12952-5 (2021): Water-tube boilers and auxiliary installations - Part 5: Workmanship and construction of pressure parts of the boiler,

[3] Ivan Juraga, Časopis Zavarivanje 37, 1/2, 3-11, 1994,

[4] HRN EN 10095, 2000 - Heat resisting steels and nickel alloy,

[5] Vlatka Lubina, Mirella Sekulić-Mustapić, Izvješće o ispitivanju MG-109/24, 2024, Slavonski Brod, Republika Hrvatska

Vesti **News**

73. GODIŠNJA SKUPŠTINA DUZS

Redovna 73. godišnja skupština DUZS zakazana je za utorak, 30. jun 2026. godine u 14h. u svečanoj sali Instituta IMS u Beogradu, Bulevar vojvode Mišića 43, sa sledećim dnevnim redom:

1. Otvaranje zasedanja Skupštine i izbor radnih tela
2. Verifikacija mandata članova Skupštine
3. Izveštaj o radu DUZS za period 2025 - 2026. godine.
   Podnosilac izveštaja: predsednik DUZS
4. Izveštaj o radu DUZS-CertPers za period 2025 - 2026. godine.
   Podnosilac izveštaja: izvršni rukovodilac DUZS-CertPers
5. Izveštaj o finansijskom poslovanju u 2026. godini.
   Podnosilac izveštaja: predsednik Nadzornog odbora
6. Diskusija po podnetim izveštajima i usvajanje izveštaja
7. Predlog plana rada za 2026 - 2027. godinu; diskusija i usvajanje
8. Izbor upravnog odbora DUZS
9. Izbor nadzornog odbora DUZS
10. Razno

David Large [1,a], David Plélan [2,b], Nadege Ducommun[2,c], Lauriane Guilmois [2], Laurent Jubin [2]
IIW Doc II-2313-2024 (II-C-669-2024) (www.iiw2024.com)

Prevod: Bojan Gligorijević

ELECTROCHEMICAL CORROSION BEHAVIOUR OF STAINLESS STEEL GRADES 1.4404 AND 1.4435 BUTT WELDS BY AUTOGENOUS GTAW

ELEKTROHEMIJSKO KOROZIONO PONAŠANJE SUČEONIH ZAVARA NERĐAJUĆIH ČELIKA 1.4404 I 1.4435 IZVEDENIH AUTOGENIM GTAW POSTUPKOM

Professional paper / Stručni rad

Paper received / Rad primljen:

April 2026.

Paper accepted / Rad prihvaćen:

May 2026.

Author's address / Adresa autora:

[1] Institut de Soudure, boulevard Henri Becquerel 57970 YUTZ - France
[2] Cetim, 52 Avenue Félix Louat, 60304 Senlis - France

email / ORCID ID :
[a] d.large@isgroupe.com /
[b] david.plelan@cetim.fr /
[c] nadege.ducommun@cetim.fr /

Abstract

Prefabricated stainless steel welds are usually pickled. However, under certain conditions, the welds are left as-welded, due to the difficulty of implementing pickling. In such cases, the corrosion resistance in chloride environment is related to the heat tint on the root side. Coloration depends on the quality of the backing gas. For example, some specifications require maximum oxygen contamination of the backing gas, to guarantee a minimal oxidation layer on the root weld bead and adjacent heat affected zone.

In this work, grade 1.4404 and 1.4435 stainless steels pipes were welded with different backing gases, where oxygen contamination was set to 10, 50, 75 and 100 ppm. Corrosion behaviour was studied by determining the pitting potential in artificial seawater.

The major findings of this study are the following:

Beyond the backing gas quality, the polishing method of the pipe (mechanical or electrochemical) leads to a different level of coloration. The weld area of an electro-polished pipe is generally less tinted than that of a mechanically polished pipe. The root side surface roughness of the base material appears to be a key factor for service performance under severe corrosive conditions in as-welded state.

Rezime

Prefabrikovani zavareni spojevi od nerđajućeg čelika obično se pasiviraju/pajcuju. Međutim, pod određenim uslovima, zavareni spojevi ostaju u zavarenom stanju zbog poteškoća u izvođenju pajcovanja. U takvim slučajevima, otpornost na koroziju u hloridnoj sredini povezana je sa termičkim obojenjem na strani korena zavara. Obojenost zavisi od kvaliteta zaštitnog gasa sa korene strane. Na primer, neke specifikacije zahtevaju maksimalno dozvoljenu kontaminaciju zaštitnog gasa kiseonikom kako bi se obezbedio minimalni oksidni sloj na korenom zavarnom prolazu i susednoj zoni uticaja toplote.

U ovom radu, cevi od nerđajućih čelika kvaliteta 1.4404 i 1.4435 zavarene su uz primenu različitih zaštitnih gasova sa korene strane, pri čemu je kontaminacija kiseonikom podešena na 10, 50, 75 i 100 ppm. Korozionо ponašanje ispitivano je određivanjem potencijala piting korozije u veštačkoj morskoj vodi.

Glavni zaključci ove studije su sledeći:

Pored kvaliteta zaštitnog gasa sa korene strane, metoda poliranja cevi, mehanička ili elektrohemijska, dovodi do različitog nivoa obojenosti. Oblast zavara kod elektropolirane cevi generalno je manje obojena nego kod mehanički polirane cevi. Hrapavost površine osnovnog materijala na strani korena izgleda da predstavlja ključni faktor za ponašanje u eksploataciji pod teškim korozionim uslovima u zavarenom stanju.

This paper was originally presented at the 77th IIW Annual Assembly and International Conference on Welding and Joining, held from 7 to 12 July 2024 on the island of Rhodes, Greece.

1. Introduction

Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) of stainless steel pipes requires protection of the welding bath. Gas shielding on the weld face is achieved by a flow of argon provided by the welding torch. On the root side, backing gas is provided by argon purging, sometimes by nitrogen purging, or using a gas mixture that contains hydrogen.

For different technical reasons, in particular for welds produced on site, this protection is rarely perfect. The welds exhibit heat tint colours ranging from straw yellow to purple, indicative of surface oxidation of the weld metal and the heat affected zone.

When applied under such conditions, experience has shown that the welds are often preferred initiation sites for certain forms of localised corrosion, namely pitting corrosion and crevice corrosion [1,2].

The thickness of the oxide layer formed during the welding operation has an impact on the resistance to pitting corrosion. Turner *et al.* [3] have shown that this reduced resistance is linked to a depletion of the chromium content in the oxide layer and in the underlying substrate. This depletion increases as the thickness of the oxide layer formed and the temperature reached increase. In parallel with this chromium depletion, the oxide layer becomes enriched in iron [4-6].

Studies [7,8] have thus highlighted the need to limit the coloration on the root side of welds, and they even suggest a coloration chart. As a result, it has been proposed that, in the absence of pickling treatment, the coloration should not exceed a level of “shades of grey to slightly yellow”: this corresponds to a contamination level of 20 ppm to 30 ppm of oxygen in a pure Argon shielding gas (I1) or 100 ppm with an Argon-hydrogen mixture (R1) [8].

According to feedback from use, it seems that there are no established corrosion problems in the biopharmaceutical industry on welds left “as welded”, for a level of contamination of approximately 50 ppm of oxygen in pure argon gas (I1), with electropolished tubes [9].

The objective of this work is to obtain data on the gas shielding conditions in relation to the fitness for use of pipes, with a view to avoiding the need for a post-weld pickling treatment.

2. Experimental procedure

The study involved measuring the pitting potential by carrying out electrochemical tests on welds produced on tubes made of stainless steel grades 1.4404 (X2CrNiMo17-12-2) and 1.4435 (X2CrNiMo18-14-3) in accordance with standard NF EN 10088-1, by varying the level of oxygen contamination in the backing gas between 0 ppm and 100 ppm. Both stainless steel grades correspond to the AISI 316L designation, however the 1.4435 grade is slightly more alloyed than the 1.4404 grade, giving it a slightly higher pitting resistance equivalent number (PRE-N = $\%Cr$ + 3.3 × $\%Mo$ + 16 × N), but above all a lower δ-ferrite content. As a result, this grade is used in the agri-food and biopharmaceutical sectors, in areas considered critical or which have to operate in ultrapure water.

The welds were produced by automated GTAW, without filler material, on a rotating tube 50.8 mm in diameter and 1.65 mm thickness (refer to Figure 1), with the parameters defined in Table 1 below, and with the following backing gas mixtures:

- Pure argon (ISO 14175 – I1) with oxygen contents of 10, 50, 75, and 100 ppm,
- Argon+5 % H2 (ISO 14175 – R1 - ArH – 5) with oxygen contents of 10, 50, 75, and 100 ppm.



Figure 1. *Inerting device and welding fixture on the weld face side.*

Slika 1. *Uređaj za inertizaciju i zavarivačka stega na strani lica zavara.*

Table 1. *GTAW parameters used in this study.*

Tabela 1. *Parametri GTAW postupka korišćeni u ovom istraživanju.*

Electrode	WLa 20, diameter 2.4 mm
Current	Ieff: 73 A (*pulsed mode*), Time at 114 A: 20 ms, Time at 40 A: 40 ms.
Voltage	11 – 13 V
Polarity	DC-
Welding speed	22.0 cm/min
Shielding gas flow rate	12 l/min (*Ar100% - I1*),
Inerting gas flow rate	6 l/min
Torch angle	90°
Angle of attack	75°, push
Electrode-to-workpiece distance	2 – 3 mm

Given the thicknesses, preparation was carried out by tack welding on straight edges, with no fit-up gap. Table 2 presents the different chemicals compositions from pipe. Note that the 1.4404 grade is available with two types of surface finishing:

- Mechanically polished tube, Ra < 0.51 µm,
- Electropolished tube, Ra < 0.38 µm.

Table 2. *Chemical composition of the tubes used (wt.%).*

Tabela 2. *Hemijski sastav korišćenih cevi (mas.%).*

Material grade	Quality	%C	%Si	%Mn	%Cr	%Ni	%Mo	%N	PRE_N
1.4404	Mechanically polished	0.02	0.39	1.4	16.70	10.20	2.06	0.050	24.3
1.4404	Mechanically polished	0.02	0.54	1.5	17.4	10.1	2.03	0.04	24.7
1.4404	Electropolished	0.01	0.38	1.4	16.80	10.60	2.04	0.060	24.5
1.4435	Electropolished	0.02	0.42	1.4	17.16	12.62	2.52	0.031	26.0

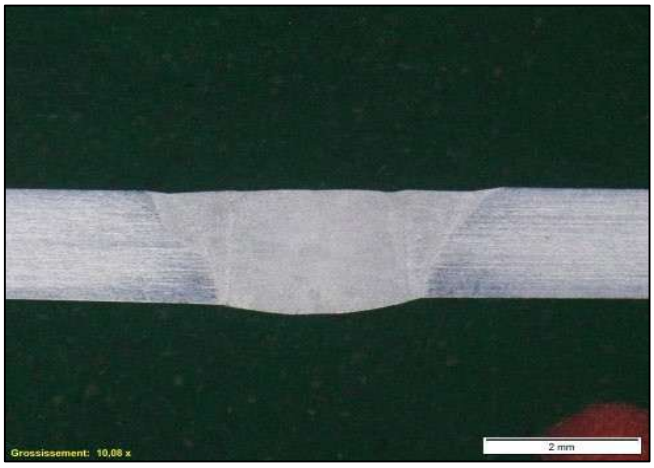


Figure 2. *Metallographic section of the weld.*

Slika 2. *Metalografski presek zavara.*

2.1. Indirect visual examination

Following the production of samples, indirect visual examinations were carried out to assess the ability to define the quality level of the backing gasg. The instruments used during this study are presented below:

- GE Mentor, refer to Figure 3,
- GE – XL Lv, refer to Figure 4,
- Olympus G Lite, refer to Figure 5.



Figure 3. *GE Mentor.*

Slika 3. *GE Mentor.*



Figure 4. *GE – XL Lv.*

Slika 4. *GE – XL Lv.*



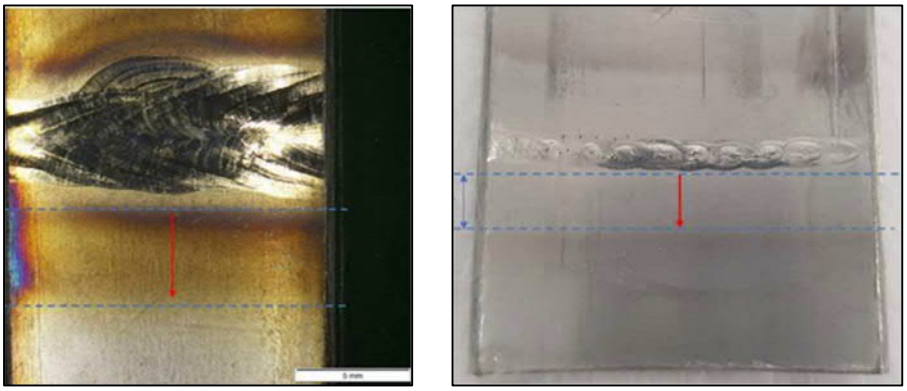
Figure 5. *Olympus G Lite.*

Slika 5. *Olympus G Lite.*

2.2. Surface roughness measurement

For each test specimen, a surface roughness measurement was carried out in the oxidation zones perpendicular to the bonding zone (Figure 6).

The measurements were acquired across the maximum height of the roughness profile (R_z) and the arithmetic mean deviation of the roughness profile (R_a).



As welded Pickled and passivated

Figure 6. *Locations of the roughness measurements on the as-welded and pickled-passivated samples.*

Slika 6. *Lokacije merenja hrapavosti na uzorcima u zavarenom i pajcovano-pasiviranom stanju.*

2.3. Determination of the pitting potential

The aim of these tests is to measure the pitting potential. Determining pitting potentials provides information on the susceptibility of materials to the initiation of pitting corrosion. The higher the value of this parameter, the better the behavior.

Three pitting potential measurements were carried out per configuration. To estimate the impact of the weld on the behavior, additional tests were also conducted on the base metal.

The experimental conditions are as follows:

- Immersion for 24 h in artificial seawater (in accordance with standard ASTM D1141-90) diluted 100 times, with a pH of 8.3.
- Deaeration of the test solution for 90 min by argon bubbling, then monitoring of the open circuit potential (free or mixed potential) for approximately 1 h in artificial seawater with a pH of 8.3, still under argon flow, in order to reach the equilibrium potential.

- Potentiodynamic scanning at a rate of 1 mV/s from the free potential to higher potentials and plotting of the current/potential curve up to a limit value corresponding to a current density of 100 µA/cm² (threshold value for pitting initiation). The pitting potential is associated with this current density (Figure 8).

The experimental setup is illustrated in Figure 7.

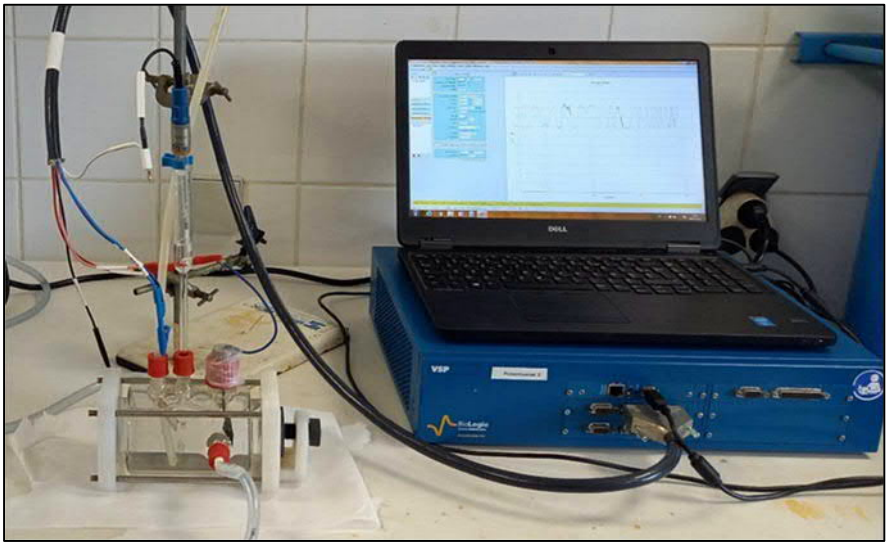


Figure 7. *The experimental setup used in the pitting corrosion tests.*

Slika 7. *Eksperimentalna postavka korišćena u ispitivanjima piting korozije.*

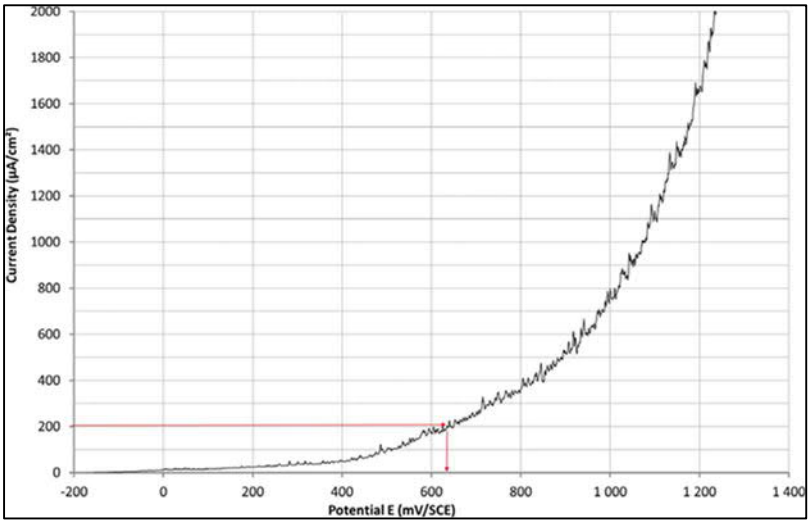


Figure 8. *Example of a pitting potential measure on electropolished 1.4435 weld - after pickling and passivation – Backing gas: Ar 100% (I1) with O_2 pollution: 75 ppm.*

Slika 8. *Primer merenja piting potencijala na elektropoliranom zavaru od čelika 1.4435 nakon dekapiranja i pasivacije – zaštitni gas sa zadnje strane: 100% Ar (I1) sa kontaminacijom O_2 od 75 ppm.*

All samples were tested in “as welded” and in “pickled and passivated” conditions. This pickling and passivation treatment consisted in immersing the samples for 2 h at room temperature in a solution of 20% nitric acid HNO_3 (69% vol. stock solution) and 2% hydrofluoric acid HF (40% vol. stock solution) for the pickling stage, followed by immersion for 30 min in a solution of 20% nitric acid HNO3 (69% vol. stock solution) at room temperature for the passivation stage.

The cutting faces are protected with varnish. The face side of the weld (outside of the tube) is also protected so that only the root side of the weld (inside of the tube) is exposed to the corrosive medium.

3. Results and discussion

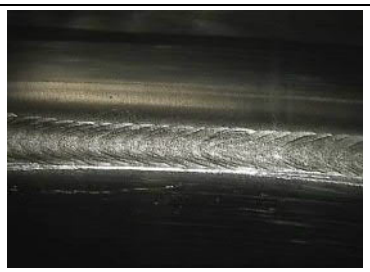
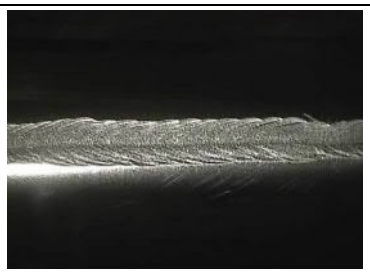
3.1. Effect of the quality of the backing gas and the pickling treatment on the oxidation of welds

3.1.1. Indirect visual examination

The video borescope examinations were carried out with 3 instruments that are widely used for indirect visual examination: GE Mentor and XL Lv, and Olympus G Lite. Table 3 presents the results obtained for 4 configurations. The evaluation of these configurations can be used to infer the results of the intermediate configurations.

Table 3. *Indirect visual examination of the roots of the TIG welds on grade 1.4435, as a function of the video borescope, the backing gas and the quality of the protection.*

Tabela 3. *Indirektni vizuelni pregled korena TIG zavara na čeliku 1.4435, u funkciji video-boroskopa, zaštitnog gasa sa zadnje strane i kvaliteta zaštite.*

Gas	O_2 contamination (ppm)	GE Mentor	GE XL Lv	Olympus G Lite
I1	10			
	100			
R1	10			
	100			

As mentioned by other authors, although a video borescope inspection can highlight welding imperfections (lack of penetration, root porosity, inclusions, pores), it does not allow the quality of the gas backing to be determined. In fact, depending on the lighting conditions, which may

vary from one instrument to the other, proper root side colour discrimination cannot be achieved.

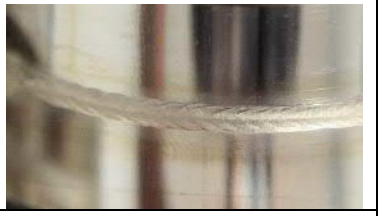
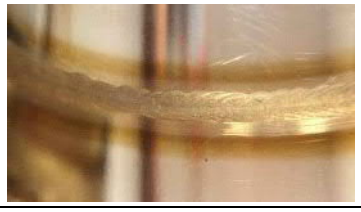
3.1.2. Direct visual examination

After opening of the tubes, the visual appearance of the iridescence was documented to compare it to colour charts, and in particular the chart defined in standard AWS D18-2 [7]. However, it should be noted that although the tested contamination level reached the lower threshold of 10 ppm oxygen in the argon gas backing, the coloration on the weld root side never dropped below number 2 (normally corresponding to 25 ppm of oxygen contamination) as defined in the AWS D18-2 chart. This is certainly due to the fact that, contrary to the AWS discoloration chart which is based on fusion lines, this study was conducted on tube joints. It should be noted that the coloration obtained with a 100 ppm contamination is in line with case No. 4 of the AWS D18-2 chart. The colorations obtained are in line with the guide published by Force Institute, namely levels B-C for the 10 ppm contamination, and level D for the 100 ppm contamination [8].

The present work confirms the assertions of standard AWS D18-2, namely that the addition of hydrogen to the backing gas results in a reduction in coloration and that the surface finish of the tube affects the appearance of the coloration. The visual appearance of the oxidation at the weld root highlights the reducing action induced by the addition of 5% hydrogen to the backing gas and confirms the reduction in coloration (refer to Table 4). A difference in surface coloration is rather clearly observed between a mechanically polished tube and an electropolished tube. A low initial tube roughness level (for the electropolished tube) results in lower iridescence in the heat affected zone than for the mechanically polished tube.

Table 4. *Visual appearance of the TIG weld roots as a function of the material grade, the finish, the backing gas and the quality of the protection.*

Tabela 4. *Vizuelni izgled korena TIG zavara u funkciji vrste materijala, završne obrade, zaštitnog gasa sa zadnje strane i kvaliteta zaštite.*

Gas	O_2 contamination (ppm)	Grade 1.4404 Mechanically polished	Grade 1.4404 Electropolished	Grade 1.4435 Electropolished
I1	10			
	100			
R1	10			
	100			

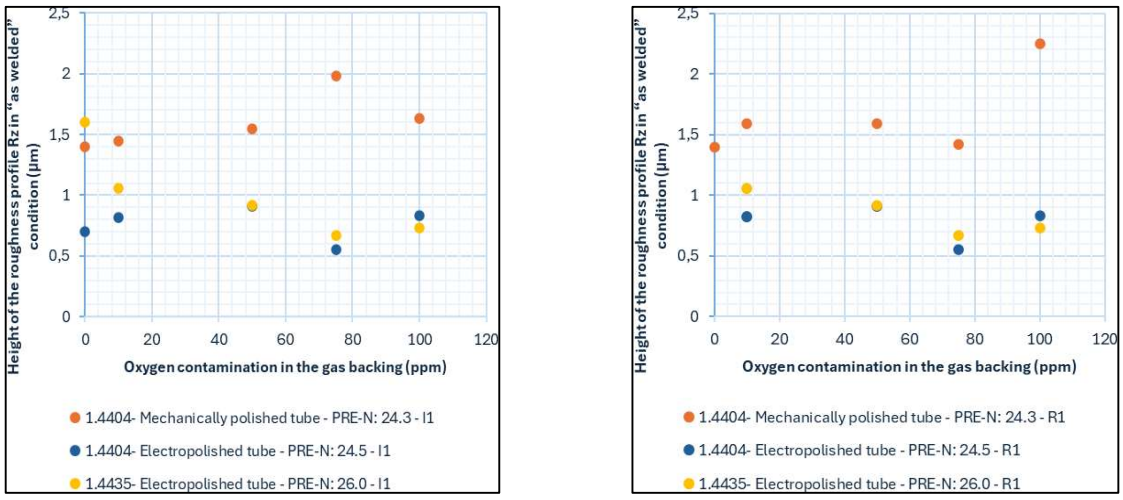
3.2. Effect of the quality of the gas backing and the pickling treatment on roughness

For the studied oxygen contents, the increase in contamination does not result in an increase in the arithmetic mean roughness (R_z), refer Figure 9, or an increase in the maximum height of the roughness profile (R_z). The only noticeable impact is a rise in the scattering of results as the oxygen content in the welding gas increases. The pickling operation does not cause any significant change in the roughness level: in particular, there is no peak clipping effect which could have resulted in a reduction of the R_z value.

Table 5. *Arithmetic mean deviation of the roughness profile (R_a) and maximum height of the roughness profile (R_z) as a function of the quality of the gas backing and the condition.*

Tabela 5. *Srednje aritmetičko odstupanje profila hrapavosti (R_a) i maksimalna visina profila hrapavosti (R_z) u funkciji kvaliteta zaštite gasom sa zadnje strane i stanja površine.*

Roughness R_a / R_z (µm)		As-welded		After pickling and passivation	
Backing gas	O_2 content (ppm)	I1	R1	I1	R1
1.4404 – Mechanically polished tube – PRE-N: 24.3	As received: 0.21 / 1.43				
	10	0.20 / 1.45	0.25 / 1.59	0.20 / 1.37	0.19 / 1.70
	50	0.22 / 1.55	0.31 / 1.59	0.19 / 1.36	0.30 / 2.37
	75	0.21 / 1.98	0.24 / 1.42	0.34 / 1.40	0.31 / 1.47
	100	0.27 / 1.63	0.41 / 2.25	0.26 / 1.67	0.36 / 1.88
1.4404 – Mechanically polished tube – PRE-N: 24.7	As received: 0.14 / 1.51				
	10	0.17 / 1.65		0.17 / 1.167	
	50	0.19 / 2.17		0.15 / 1.73	
	75	0.17 / 1.57		0.23 / 2.34	
1.4404 – Electropolished tube – PRE-N: 24.5	As received: 0.11 / 0.69				
	10	0.13 / 0.82	0.15 / 0.92	0.13 / 0.58	0.15 / 0.74
	50	0.20 / 0.91	0.16 / 1.24	0.16 / 0.95	0.17 / 1.01
	75	0.12 / 0.55	0.20 / 1.34	0.17 / 0.65	0.11 / 0.99
	100	0.18 / 0.83	0.18 / 0.96	0.23 / 0.76	0.17 / 1.44
1.4435 – Electropolished tube – PRE-N: 26.0	As received: 0.2 / 1.6				
	10	0.15 / 1.06	0.16 / 1.09	0.12 / 0.80	0.13 / 0.97
	50	0.12 / 0.92	0.14 / 1.30	0.26 / 1.72	0.14 / 0.87
	75	0.10 / 0.67	0.12 / 0.93	0.16 / 1.08	0.18 / 1.51
	100	0.12 / 0.73	0.12 / 0.92	0.15 / 1.15	0.13 / 1.01



Backing gas I1 Backing gas R1

Figure 9. *Change in roughness vs. oxygen content in the backing gas.*

Slika 9. *Promena hrapavosti u zavisnosti od sadržaja kiseonika u zaštitnom gasu sa zadnje strane.*

3.3. Corrosion tests

The measurements carried out on the base materials upon receipt revealed that the type of surface finish is of little importance. In fact, the pitting potential is markedly lower for finishes with a higher roughness level. It is therefore the roughness of the tube that leads to good corrosion resistance. The tube with the lowest roughness value exhibits the highest pitting potentials. As the roughness increases, these values decrease (refer to Figure 10). This is confirmed by the results obtained on the 1.4435 grade, which features a slightly higher PRE-N but has a pitting potential that is very close to that of the mechanically polished 1.4404 grade and an equivalent roughness level.

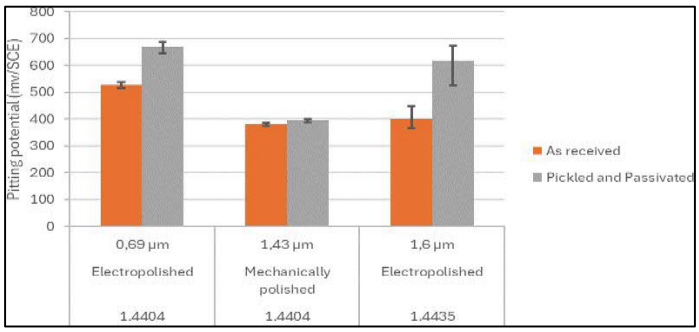


Figure 10. *Pitting potential on base materials, depending on the material grade, the finishing method and the maximum height of the roughness profile R_z.*

Slika 10. *Piting potencijal osnovnih materijala u zavisnosti od vrste materijala, metode završne obrade i maksimalne visine profila hrapavosti R_z.*

On the other hand, after a pickling and passivation treatment, the type of surface finish seems to play a more important role. Electropolished materials are more resistant to corrosion. Therefore, the pickling and passivation treatment seems to be more effective for electropolished surface finishes.

The pitting potential results for the different configurations are given in Table 6. In “as welded” condition, whatever the oxygen contamination levels may be, the pitting potentials are higher overall for the grade 1.4404 electropolished tube, which featured the lowest initial roughness and whose base material’s pitting potential was higher by almost 150 mV/SCE compared to the other tested materials. If we consider the initial roughness as the main factor, the corrosion resistance of the “as welded” 1.4435 grade is

greater than that of the 1.4404 grade with the same roughness level. After pickling and passivation, the performance of the tubes becomes fairly the same again for all material grades, i.e. around 400/500 mV/SCE for all tested contamination levels.

In the welded zones, the results of the pitting potential measurements are much more scattered that those obtained on the base metal. This scattering stems from the fact that a welded zone is never completely identical at all its points and that pitting corrosion is a local phenomenon.

In the mechanically polished tubes, the pitting potentials, measured at the root of the welded joints, decrease sharply even from an oxygen contamination level of 10 ppm, and the higher this level, the lower the pitting potential. The other two tubes with equivalent roughness levels show fairly similar behaviours in line with their pitting resistance equivalent numbers PRE-N. (Refer to Figure 11 and Figure 12).

In all configurations, the pitting potentials are very similar for the different oxygen concentrations tested. As a result, the improvement in the quality of the gas backing has very little to no impact on the corrosion resistance.

However, contrary to what could be expected in view of the visual examinations, the hydrogen-containing gas mixture does not lead to superior behaviour compared to argon gas (I1). The pitting potential is reduced by approximately 100 mV/SCE for the R1 mixture compared to the I1 gas mixture (refer to Figure 11 and Figure 12).

Table 6. *Results of the pitting potentials (mV/SCE) measured for a current density of 100 µA/cm²d.*

Tabela 6. *Rezultati piting potencijala (mV/SCE) izmerenih pri gustini struje od 100 µA/cm².*

Material grade, Surface finish, PRE-N, Roughness R_a / R_z (µm)		As-welded		Pickled and passivated	
Backing gas	O_2 content	I1: Pure Ar	R1: Ar + 5% H_2	I1: Pure Ar	R1: Ar + 5% H_2
1.4404 – Mechanically polished tube – PRE-N: 24.3 – Ra = 0.2 µm / Rz = 1.42 µm	Base metal	380 ±5		394 ±5	
	10	97 ± 4	19 ± 11	548 ± 11	424 ± 20
	50	56 ± 14	93 ± 36	547 ± 18	424 ± 36
	75	47 ± 17	114 ± 13	384 ± 9	486 ± 36
	100	41 ± 12	136 ± 29	416 ± 30	364 ± 17
1.4404 – Mechanically polished tube – PRE-N: 24.7 – Ra = 0.14 µm / Rz = 1.51 µm	Base metal				
	10	103 ± 26		162 ± 52	
	50	130 ± 42		309 ± 43	
	75	70 ± 41		302 ± 47	
1.4404 – Electropolished tube – PRE-N: 24.5 – Ra = 0.1 µm / Rz = 0.69 µm	Base metal	41 ± 12		669 ± 22	
	10				
	50	476 ± 5	168 ± 18	383 ± 40	469 ± 57
	75	428 ± 4	183 ± 21	477 ± 42	542 ± 45
	100	374 ± 24	237 ± 18	474 ± 31	464 ± 49
1.4435 – Electropolished tube – PRE-N: 26.0 – Ra = 0.2 µm / Rz = 1.6 µm	Base metal	401 ± 41		617 ± 80	
	10	210 ± 74	93 ± 32	462 ± 101	242 ± 96
	50	198 ± 2	209 ± 76	295 ± 78	458 ± 49
	75	166 ± 73	148 ± 2	592 ± 65	232 ± 80
	100	96 ± 16	81 ± 50	637 ± 109	418 ± 51

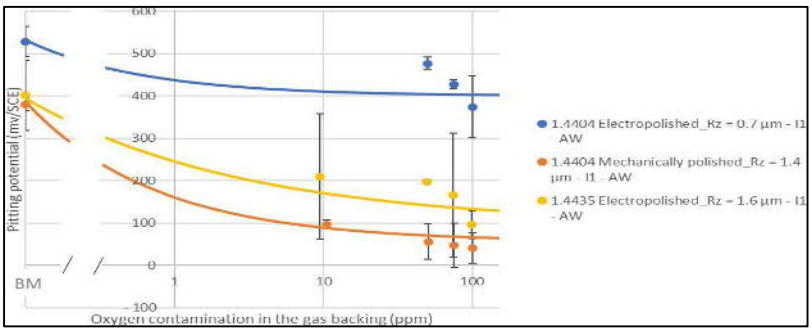


Figure 11. *Effect of gas contamination in the backing gas (I1) on the pitting potential for grades 1.4404 and 1.4435.*

Slika 11. *Uticaj kontaminacije zaštitnog gasa sa zadnje strane (I1) na piting potencijal čelika 1.4404 i 1.4435.*

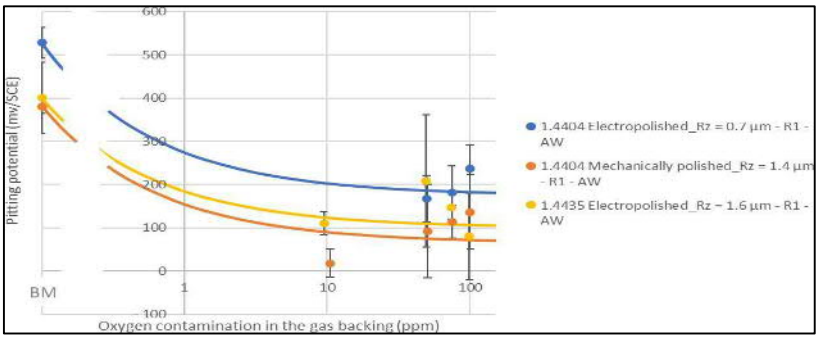


Figure 12. *Effect of gas contamination in the backing gas mixture (R1) on the pitting potential for grades 1.4404 and 1.4435.*

Slika 12. *Uticaj kontaminacije smeše zaštitnog gasa sa zadnje strane (R1) na piting potencijal čelika 1.4404 i 1.4435.*

In the pickled and passivated condition, on mechanically polished tubes, the pitting potentials remain equivalent to those of the base metal for all configurations. On electropolished tubes, the pitting potentials are lower than those of the base metal in "as received" condition, but the level obtained is of the same order as that of the mechanically polished tubes. These results are in line with the previous studies where the corrosion resistance was restored with contamination levels reaching approximately 1% (10,000 ppm) [10-12].

Although the roughness measurements are relatively scattered, it appears that the roughness level has an impact on the resistance to pitting corrosion in the "as welded" condition (refer to Figure 13). This impact is particularly visible above a maximum roughness Rz of 1.5 µm, where no values can reach values closed to those of the base metal. Nevertheless, it should be noted that, in the pickled and passivated condition, the roughness level has less effect on corrosion resistance. The close relationship evidenced in the "as welded" condition is undoubtedly more closely related to the relationship between roughness and contamination.

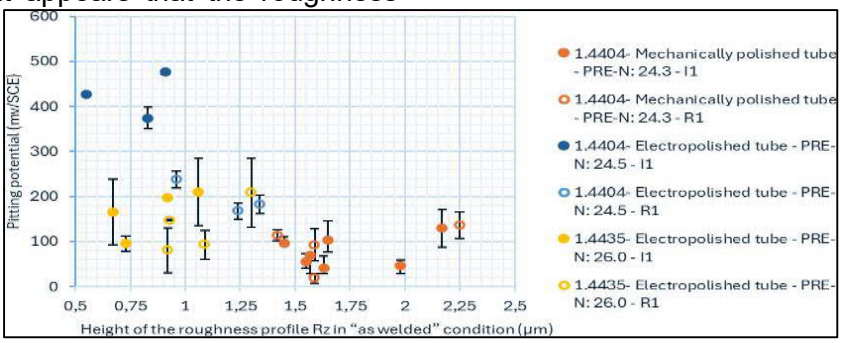


Figure 13. Effect of the maximum height of the roughness profile (R_z) on corrosion resistance, irrespective of the backing gas and nature of the tube.

Slika 13. Uticaj maksimalne visine profila hrapavosti (R_z) na otpornost prema koroziji, nezavisno od zaštitnog gasa sa zadnje strane i vrste cevi.

4. Conclusions

As expected, the addition of hydrogen limits the coloration of the welded zones, in particular at the lowest contamination levels. Beyond the level of backing gas, the quality of the tube (mechanically polished or electropolished) leads to a different level of coloration. The weld seams of the electropolished tubes generally feature a lower level of coloration than those of the mechanically polished tubes.

In terms of corrosion resistance, it appears that the initial quality of the tube is important in order to avoid the need for a pickling and passivation treatment. Therefore, to achieve optimum corrosion resistance, the use of an electropolished tube with a low level of roughness is essential. On the other hand, this study shows that although the argon backing could allow the tube to be left as-is in the event the oxygen contamination remained below 50 ppm or 75 ppm, the behaviour of the hydrogen-containing gas is not at the expected level. In “as welded” condition, such an Ar+5%H2 mixture would not make it possible to avoid the need for a pickling and passivation treatment, irrespective of the contamination level, contrary to what the colourless appearance of the welds might have suggested. This unexpected behaviour has led to further work which will form the subject of a forthcoming study.

It is worth noting that, for the tested contamination levels, the relationship between the coloration of the oxide layers and the corrosion resistance of the material is less obvious than it would seem at first sight, and it depends on many factors (surface condition, nature of the backing gas). Moreover, this study shows that an indirect visual examination with a borescope can in no case be used to determine the quality of the gas backing.

4. Zaključak

Kao što se i očekivalo, dodatak vodonika ograničava obojenost zavarenih zona, naročito pri najnižim nivoima kontaminacije. Pored kvaliteta zaštitnog gasa sa zadnje strane, kvalitet cevi (mehanički polirana ili elektropolirana) dovodi do različitog stepena obojenosti. Zavareni spojevi elektropoliranih cevi generalno pokazuju niži stepen obojenosti od zavarenih spojeva mehanički poliranih cevi.

U pogledu otpornosti prema koroziji, pokazuje se da je početni kvalitet cevi važan kako bi se izbegla potreba za tretmanom dekapiranja i pasivacije. Stoga je, za postizanje optimalne otpornosti prema koroziji, neophodna upotreba elektropolirane cevi sa niskim nivoom hrapavosti. S druge strane, ova studija pokazuje da, iako bi zaštita argonom sa zadnje strane mogla omogućiti da se cev ostavi u stanju nakon zavarivanja ukoliko kontaminacija kiseonikom ostane ispod 50 ppm ili 75 ppm, ponašanje gasa koji sadrži vodonik nije na očekivanom nivou. U stanju „nakon zavarivanja“, smeša Ar + 5% H_2 ne bi omogućila izbegavanje tretmana dekapiranja i pasivacije, nezavisno od nivoa kontaminacije, suprotno onome što bi bezbojni izgled zavara mogao da sugeriše. Ovo neočekivano ponašanje dovelo je do daljih istraživanja, koja će biti predmet naredne studije.

Vredno je napomenuti da je, za ispitane nivoe kontaminacije, odnos između obojenosti oksidnih slojeva i otpornosti materijala prema koroziji manje očigledan nego što bi se na prvi pogled moglo činiti i da zavisi od mnogih faktora, kao što su stanje površine i vrsta zaštitnog gasa sa zadnje strane. Pored toga, ova studija pokazuje da se indirektni vizuelni pregled pomoću boroskopa ni u kom slučaju ne može koristiti za određivanje kvaliteta zaštite gasom sa zadnje strane.

References / Literatura

[1] ASM International Technical Books Committee, Corrosion of Weldments, ASM International, 2006.

[2] M. Finke, «Einfluss thermisch erzeugter Deckschichten auf die Korrosionsbeständigkeit geschweißter CrNi-Stähle,» TU Braunschweig, Braunschweig, 1998.

[3] S. Turner et F. Robinson, «The effect of the surfaces oxydes produced during welding on the corrosion resistance of stainless steels,» *Corrosion,* 09 1989.

[4] A. H. Tuthil et R. E. Avery, «Phorgotten phenomena : Heat tints on stainless steels can cause corrosion problems,» *Materials Selection & Design*, vol. 38, n° %12, pp. 72-73, 02 1999.

[5] J. Vagn Hansen, «Influence of residual oxygen on the welding result,» Force institute, 1997.

[6] S. Trigwell et G. Selvaduray, «Effects of welding electropolished stainless steel used in ultra-pure fluid delivery systems for semiconductor and pharmaceutical industries,» *Journal of the Arkansas Academy of Science*, vol. 56, n° %11, pp. 198-205, 2002.

[7] AWS, «D18.2 Guide to weld discoloration levels on inside of austenitic stainless tube,» American Welding Society, 2009. [8] Norsok M-630, Edition 6, October 2013. Material data sheets and element data sheets for piping.

[8] J. Vagn Hansen, «Reference colour charts - for purity of purging gas in stainless steel tubes,» Force Institute, 1994.

[9] K. Kimbrel, «Determining acceptable levels of weld discoloration on mechanically polished and electropolished stainless steel surfaces,» *Pharmaceutical Engineering,* vol. 31, n° %16, November/December 2011.

[10] G. Rouly, «Soudage des tuyauteries en acier austénitique - Etude des conséquences d'une protection imparfaite de l'envers sur la tenue à la corrosion des soudures,» CETIM 1A1540 - RT IS n°30496, 1997.

[11] G. Mertuk et G. Rouly, «Soudage TIG des aciers inoxydables austénitiques - Protection envers à l'azote : Influence d'une pollution par l'oxygène,» CETIM 1A1543 / RT IS n°35596, 2001.

[12] G. Rouly, «Protection envers en soudage des aciers inoxydables - Utilisation d'un mélange gazeux à 5% d'hydrogène,» CETIM 1A1545 / RT IS n°41691, 2005.



TAKMIČENJE MLADIH ZAVARIVAČA
International Welding Competition - 2025

Od 15 - 19. septembra 2025. godine, u nemačkom gradu Essen-u, održan je Sajam zavarivanja i rezanja.



U okviru sajma, od 17. do 19. septembra, održano je međunarodno takmičenje mladih zavarivača službenog naziva „International Welding Competition 2025“. Pravo učešća imali su mladi zavarivači rođeni u periodu 01.01.2002-31.12.2009. Učestvovalo je ukupno 13 zemalja: Švajcarska, Kina, Ukrajina, Rumunija, Grčka, Italija, Nemačka, Indija, Bosna i Hercegovina, Bugarska, Češka, Španij i Srbija. Ukupna broj takmičara 49.

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

Filip Stublinac 2002. god. (postupak 141) radnik preduzeća Zavod za zavarivanje ad, Beograd,

Aleksandar Jančić 2004. god. (postupak 135) radnik preduzeća Siemens Mobility doo Cerovac, Kragujevac,

Mihajlo Milutinović 2004. god. (postupak 111) radnik preduzeća GOŠA FOM AD, Smederevska Palanka.

Miloš Radojković 2006. god. (postupak 311) radnik preduzeća Siemens Mobility doo Cerovac, Kragujevac.

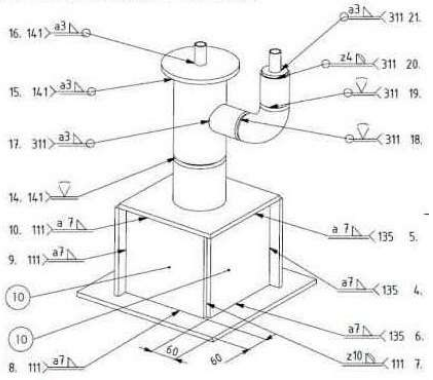


Pored takmičara, naš tim činili su:
Branislav Lukić-član upravnog odbora DUZS, član žirija za ocenjivanje spojeva za ispitivanje sklopa na pritisak,
Vencislav Grabulov-član upravnog odbora DUZS i
Milan Prokolab-član upravnog odbora DUZS.

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 Ø76x3 za postupke 311 i 141, a za postupke 111 i 135 trebalo je zavariti ploče debljine 12mm. Svi zavareni spojevi su ocenjivani vizuelnom kontrolom. 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.



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.

Za zavarivanje sklopa ekipa je imala na raspolaganju 480 minuta.

Zvanični rezultati takmičenja “International Welding Competition - 2026”

	Redosled	Zemlja	111	311	135	141	Ukupno takmičara	Ukupmo bodova
EKIPNO	1	SWITZERLAND	1	1	1	1	4	837,000
	2	BOSNIA HERZEGOVINA	1	1	1	1	4	813,000
	3	ROMANIA	1	0	1	1	3	766,000
	4	BULGARIA	1	1	1	1	4	755,000
	5	CHINA	1	0	1	1	3	712,000
	6	UKRAINE SPAIN	1	1	1	1	4	710,000
	7	GERMANY	1	1	1	1	4	700,000
	8	CZECH REPUBLIC	1	1	1	1	4	684,000
	9	SERBIA	1	1	1	1	4	676,000
	10	GREECE	1	0	1	1	3	646,250
	11	ITALY	1	1	1	1	4	645,000
	12	SPAIN	1	1	1	1	4	640,000
	13	INDIA	1	1	1	1	4	610,000

	Redosled	Prezime I ime	Zemlja	Ukupmo bodova
POSTUPAK REL (111)	1	HUEGENELL LOPES DIEGO	SWITZERLAND	80,000
	2	MENG CHENG	CHINA	79,375
	3	DAUKULIS VASYL	UKRAINE	79,375
	4	STEFANESCU LORIN	ROMANIA	76,875
	5	KAPITORIS FILIPPOS	GREECE	69,375
	6	NOVELLO CRISTIANO	ITALY	69,375
	7	AIRICH NICK	GERMAN	68,750
	8	MILUTINOVIĆ MIHAJLO	SERBIA	65,625
	9	DALAI RINA	INDIA	64,375
	10	ČAKIĆ HADŽO	BOSNIA & HERZEGOVINA	61,250
	11	IVANOV ANATOLI	BULGARIA	57,500
	12	PITUCHA VOJTĚCH	CZECH REPUBLIC	57,500
	13	SALINAS CHENTOUF LKBIR DANIEL	SPAIN	45,000

	Redosled	Prezime I ime	Zemlja	Ukupmo bodova
POSTUPAK TIG (141)	1	SCHUDEL SIMON	SWITZERLAND	90,588
	2	RADU CATALIN-IONUT	ROMANIA	90,000
	3	XU JUNHAO	CHINA	85,294
	4	DURMIŠEVIĆ ENIS	BOSNIA & HERZEGOVINA	82,353
	5	PANCHENKO YEVHENII	UKRAINE	72,353
	6	RAM KAMINI KUMARI	INDIA	70,000
	7	ROMANO DAVIDE	ITALY	68,235
	8	CANNOVA MAILIN	GERMANY	67,647
	9	SMOČKOVÁ DANIELA	CZECH REPUBLIC	63,529
	10	STUBLINAC FILIP	SERBIA	63,529
	11	MIHNEV MARTIN	BULGARIA	59,412
	12	GARCÍA GIMENO OSCAR	SPAIN	51,176
	13	NTAKOULAS ANDREAS	GREECE	31,176

	Redosled	Prezime I ime	Zemlja	Ukupmo bodova
POSTUPAK MAG (135)	1	HABIBOVIĆ VEDAD	BOSNIA & HERZEGOVINA	86,875
	2	WÜTHRICH DOMINIK	SWITZERLAND	85,000
	3	BOURS LEO	GERMANY	81,250
	4	DE PABLO NEBREDA GORKA	SPAIN	77,500
	5	PIUBELLO LORENZO	ITALY	75,625
	6	KOKOTKO MYKOLA	UKRAINE	73,750
	7	VLČEK TOMÁŠ	CZECH REPUBLIC	73,125
	8	ZHANG ZEZE	CHINA	71,875
	9	JANČIĆ ALEKSANDAR	SERBIA	70,000
	10	XHIKA SHEFIT	GREECE	68,125
	11	EFTIMOVA KATRIN	BULGARIA	56,875
	12	NAYAK DIBYANGI DIBYALAXMI	INDIA	56,250
	13	BEJAN IONUT-COSMIN	ROMANIA	54,375

	Redosled	Prezime I ime	Zemlja	Ukupmo bodova
POSTUPAK GASNO (311)	1	LUKOW PHILIP	GERMANY	87,647
	2	STAUFFER SIRO	SWITZERLAND	85,882
	3	KOCIÁNOVÁ KRISTÝNS	CZECH REPUBLIC	77,059
	4	HAVRYS OSTAP	UKRAINE	66,471
	5	NAYAK DIPTIMAYEE	INDIA	64,118
	6	YORDANOV STANISLAV	BULGARIA	55,294
	7	RADOJKOVIĆ MILOŠ	SERBIA	55,294
	8	LÓPEZ MORENO GERMÁN	SPAIN	52,353
	9	NIŠIĆ ALDIN	BOSNIA & HERZEGOVINA	50,588
	10	BISOTTI FRANCESCO	ITALY 50,588	50,588

Branislav Lukić dipl.ing.IWE

ČASOPIS ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE

Cenovnik oglasnog prostora u četiri uzastopna broja 2026

	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	-	45 000	28 000	19 000	12 000
	kolor	120 000	85 000	-	-	-

- 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 prezetaciji DUZS-a, (www.duzs.org.rs), na strani Marketing, objavljuje se pregled firmi-oglašivača sa podacima o glavnim grupama proizvoda/usluga i adresom web prezetacije. 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 2026

	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	-	1000	500	400	300
	colour	3000	2000		-	-

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

INDEKS OGLAŠIVAČA
ADVERTISERS INDEX

MESSER TEHNOGAS

YASKAWA SLOVENIJA

HONEX

ELIMP

NEMINIK

SIGMA LAB

TMS CEE D.O.O BEOGRAD

1. **ČLANARINA DUZS za 2026. godinu** …… **5.000 dinara**

   Članovima DUZS **GRATIS** godišnje izdanje časopisa "ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE"

2. **ČASOPIS "ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE" - 2026. godina**
   u slobodnoj prodaji (u cene je uračunat PDV 10%)**:**
   - cena pojedinačnog broja..... ……. 1.150 dinara
   - godišnja pretplata za 1 komplet brojeva godišnjeg izdanja……. 3.520 dinara
3. **ČASOPIS - stari brojevi** (u cene je uračunat PDV 10%)

   a) u slobodnoj prodaji:
   - cena pojedinačnog broja za 2025. godinu ..... …… 500 dinara
   - cena pojedinačnog broja za prethodne godine……..... 250 dinara

   b) beneficirane cene za članove DUZS:
   - cena pojedinačnog broja za 2025. 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 (izdanja su i z 2012. godine)** 6.750 dinara