

# 1. KONFERENCIJA SA MEĐUNARODNIM UČEŠĆEM

## TEHNOLOGIJE SPAJANJA MATERIJALA

### ZBORNİK RADOVA



DRUŠTVO ZA  
ZAVARIVANJE  
CRNE GORE



MAŠINSKI  
FAKULTET  
PODGORICA

Bečići, 14 - 16. maj 2026. godine



**Društvo za Zavarivanje Crne Gore**



**Mašinski fakultet Podgorica**

**1. KONFERENCIJA SA MEĐUNARODNIM  
UČEŠĆEM**

**TEHNOLOGIJE SPAJANJA MATERIJALA**

ZBORNIK RADOVA 2026

Bečići, 14 - 16. maj 2026. godine



Društvo za  
Zavarivanje  
Crne Gore

1. Konferencija sa međunarodnim učešćem

**„TEHNOLOGIJE SPAJANJA  
MATERIJALA“**

14 - 16. maj 2026. godine, Bečići, Crna Gora



MAŠINSKI  
FAKULTET  
PODGORICA

**ZBORNİK RADOVA**

**Izdavači:**

Društvo za Zavarivanje Crne Gore  
Mašinski fakultet, Univerzitet Crne Gore

**Za izdavače:**

Prof. dr Darko Bajić  
Prof. dr Radoje Vujadinović

**Editori:**

Prof. dr Nikola Šibalić  
Prof. dr Nebojša Tadić

**Zbornik uredio:**

Prof. dr Nikola Šibalić

**Štampa:**

Art Grafika, Podgorica

**Tiraž:**

100 Primjeraka

**Adresa:**

Društvo za Zavarivanje Crne Gore, Aerodrumska 2/m, 81000 Podgorica  
Mašinski fakultet, Univerzitet Crne Gore, Džordža Vašingtona bb. 81000  
Podgorica

CIP - Каталогизација у публикацији  
Национална библиотека Црне Горе, Цетинје  
ISBN 978-9911-9657-0-7 (DZCG)  
ISBN 978-9940-527-55-6 (UCG, Mašinski fakultet)  
COBISS.CG-ID 38122756

## **POKROVITELJ KONFERENCIJE**

UNIVERZITET CRNE GORE

### **NAUČNI ODBOR**

Dr Avdić Sead, Bosna i Hercegovina  
Prof. dr Bajić Darko, Crna Gora  
IWE Despotović Božo, Republika Hrvatska  
Prof. dr Dobraš Dragoslav, Bosna i Hercegovina  
Dr Dumović Milo, Australija  
Dr.sc. Dunđer Marko, Republika Hrvatska  
Dr Grabulov Vencislav, Republika Srbija  
Prof. dr Klobčar Damjan, Republika Slovenija  
Prof. dr Kožuh Zoran, Republika Hrvatska  
Prof. dr Manjgo Mersida, Bosna i Hercegovina  
Doc. dr Marić Dejan, Republika Hrvatska  
Prof. dr Milčić Dragan, Republika Srbija  
IWE Mitić Dragan, Republika Srbija  
Prof. dr Samardžić Ivan, Republika Hrvatska  
Prof. dr Šibalić Nikola, Crna Gora  
Prof. dr Tadić Nebojša, Crna Gora  
Doc. dr Vuherer Tomaž, Republika Slovenija  
Dr Vukčević Milan profesor emeritus, Crna Gora  
Prof. dr Zdraveski Filip, Sjeverna Makedonija

### **ORGANIZACIONI ODBOR**

Prof. dr Bajić Darko - Predsjednik odbora  
Prof. dr Vujadinović Radoje  
Prof. dr Šibalić Nikola  
IWE, IWC Šarančić Darko  
IWE Radošević Jovan  
IWE, IWC Mirković Mladen  
Mr Mumović Marko  
Spec. Sci Mršović Danilo





Društvo za  
Zavarivanje  
Crne Gore

1. Konferencija sa međunarodnim učešćem

## „TEHNOLOGIJE SPAJANJA MATERIJALA“

14 - 16. maj 2026. godine, Bečići, Crna Gora



MAŠINSKI  
FAKULTET  
PODGORICA

### PREDGOVOR

Sa zadovoljstvom predstavljamo zbornik radova „Tehnologije Spajanja Materijala“, 2026. posvećene savremenim dostignućima i izazovima u oblasti tehnologije zavarivanja i zavarenih konstrukcija. Ova konferencija okuplja stručnjake iz akademske zajednice, industrije i istraživačkih institucija sa ciljem razmjene znanja, iskustava i inovativnih rješenja u jednoj od ključnih grana savremenog inženjerstva.

Tematski okvir konferencije obuhvata širok spektar oblasti, uključujući tehnologije zavarivanja, razvoj i primjenu dodatnih materijala, metode i postupke kontrole kvaliteta zavarenih spojeva, kao i analizu pouzdanosti zavarenih konstrukcija. Poseban akcenat stavljen je na savremene pristupe edukaciji kadrova u oblasti zavarivanja, kao i na sve značajniju ulogu informacionih tehnologija u optimizaciji procesa, praćenju kvaliteta i unapređenju proizvodnih sistema.

Radovi predstavljeni u ovom zborniku odražavaju aktuelna istraživanja i praktična iskustva autora, nudeći nova saznanja i rješenja koja doprinose unapređenju efikasnosti, sigurnosti i održivosti zavarenih konstrukcija. Integracija tradicionalnih inženjerskih principa sa naprednim IT alatima i digitalnim tehnologijama otvara nove perspektive razvoja, omogućavajući preciznije upravljanje procesima i donošenje pouzdanijih odluka.

Vjerujemo da će sadržaj ovog zbornika biti od značajne koristi istraživačima, inženjerima, studentima i svim profesionalcima koji se bave ili su zainteresovani za oblast zavarivanja. Nadamo se da će prezentovani radovi podstaći dalju saradnju, inovacije i kontinuirani razvoj ove važne discipline.

Zahvaljujemo se svim autorima na doprinosu, kao i članovima organizacionog i naučnog odbora na uloženom trudu u realizaciji ove konferencije. Takođe, posebnu zahvalnost upućujemo učesnicima i partnerima koji su prepoznali značaj ovog skupa i svojim prisustvom doprinijeli njegovom uspjehu.

U uvjerenju da će ova konferencija predstavljati važan korak ka daljem razvoju i unapređenju oblasti zavarivanja, želimo vam uspješan i inspirativan rad.

Predsjednik Organizacionog odbora  
Prof. dr Darko Bajić



## SADRŽAJ

1. Aleksandar Sedmak, Taško Maneski, Predrag Mitić, Svetlana Jocić, Simon Sedmak REKONSTRUKCIJA OŠTEĆENOG OKLOPA ROTORA U RHE BAJINA BAŠTA .....	1
2. Dragan Milčić, Miodrag Milčić, Janez Kramberger, Damjan Klobčar STATISTIČKA ANALIZA ZAMORNOG VEKA FSW ZAVARENIH SPOJEVA LEGURE ALUMINIJUMA AA2024.....	9
3. Tihomir Marsenić, Iva Deanović, Dean Lesan, Božo Despotović, Mario Jagnjić, Krešo Didić ZAHTJEVI ZA KVALIFIKACIJU SUČEONOG SPOJA NA KOMPOZITNOJ KOTLOVSKOJ CIJEVI PREMA ASME BPVC SEKCIJA IX, EDICIJA 2023 .....	19
4. Aleksandra Krstevska, Filip Zdraveski, Maja B. Poser, Martin Petreski ZAVARIVAČKA RJEŠENJA ZA MONTAŽNE, REPARATURNE I NAVARENE SPOJEVE .....	31
5. Aleksandar Sedmak, Milan Miladinov, Milan Ostojin, Nenad Milošević, Simon Sedmak PROCENA INTEGRITA KOLENA NAPOJNOG CEVOVODA U HE PERUĆICA.....	39
6. Mersida Manjgo, Sabahudin Muharemović, Mirza Manjgo, Jasmin Halilović DOPRINOS U OCJENI PONAŠANJA KONSTRUKCIJE U PRISUSTVU GREŠKE TIPA PRSLINE.....	45
7. Aleksija Đurić, Srđan Samardžić, Dragan Milčić, Damajn Klobčar, Miodrag Milčić, Biljana Marković ANALIZA SPOJEVA KOMPOZITNIH MATERIJALA POD USLOVIMA UDARNIH OPTEREĆENJA.....	53
8. Resul Hamzić, Namik Džibrić, Alen Hodžić SANACIJA PUKOTINE NA ČEONOJ STIJENI MLINA CEMENTA.....	59
9. Maja Lindič, Nikolaj Mole, Aleš Nagode, Borut Žužek, Tomaž Vuherer, Miodrag Milčić, Dragan Milčić, Nataša Zdravković, Aleksija Đurić, Marek Polanski, Damjan Klobčar UTICAJ NAKNADNE TERMIČKE OBRADNE NA MEHANIČKA SVOJSTVA STRUKTURE OD MAREJDŽING ČELIKA DOBIJENE WAAM POSTUPKOM.....	67
10. Darko Šarančić, Luka Kuč, Darko Bajić TEHNOLOŠKI POSTUPAK UGRADNJE NOSAČA KOČIONE MLAZNICE NA KUĆIŠTE TURBINE AGREGATA A6 I A7 HE „PERUĆICA“ .....	77
11. Edvard Bjelajac, Andrej Skumavc, Tomaž Vuherer, Nenad Gubelj, Damjan Klobčar, Gorazd Lojen POREĐENJE ZAVARENIH SPOJEVA DOBIJENIH LASERSKIM POSTUPKOM ZAVARIVANJA U ATMOSFERI RAZLIČITIH ZAŠTITNIH GASOVA.....	83

12. Marko Frajzman, Zoran Kožuh, Jadranka Eržišnik, Natalija Dolić SPECIFIČNOSTI FIBER LASERSKOG ZAVARIVANJA TITANIJA.....	97
13. Mirza Manjgo, Gorazd Lojen, Rene Peklar, Jure Bernetič, Tomaž Vuherer ISPITIVANJE MEHANIČKIH SVOJTAVA ZAVAREN OG SPOJA OD OKLOPNOG ČELIKA OSTVAREN OG UPOTREBOM AUSTENITNOG NERĐAJUĆEG DODATNOG MATERIJALA.....	103
14. Đorđe Hadži Đokić, Mladen Mitić, Nikola Jović, Dragan Mitić UPOREĐIVANJE POSTUPAKA MAG-IBE-135 I SS-FCAW 114 ZAVARIVANJE BLOKOVA TRAMVAJSKIH SKRETNICA OD COGIDURA .....	111
15. Josip Pavić, Dejan Marić, Ivan Samardžić, Tomislav Šolić, Marko Dunder, Josip Mijić KOMPENZATORI ZA TLAČNU PRIMJENU - PROJEKTIRANJE I PRIMJENA.....	121
16. Marko Maričić, Ivan Stojčić, Marija Vukšić Popović, Stefan Dikić, Milorad Kočić KLASE IZVOĐENJA PREMA EN 1090-2 I NJIHOVA PRIMENA U PROJEKTOVANJU PREMA EN 1993 (EVROKOD 3) .....	129
17. Muhidin Kozica WELD ME - PROGRAM ZA PROCJENU ZAVARLJIVOSTI I TERMIČKIH USLOVA ZAVARIVANJA ČELIKA.....	137
18. Miro Uran, Vital Uran, Miloš Jovanović SAVREMENI PRISTUPI U OBUCI KOORDINATORA I INSPEKTORA ZA METALNE KONSTRUKCIJE U SKLADU SA ZAHTEVIMA EU CPR .....	149
19. Zoran Nikolić EFIKASNOST PRIMENE ULTRAZVUČNE TEHNIKE (TFM) ZA ISPITIVANJE ZAVARENIH SPOJEVA.....	155
20. Srđan Bulatović, Zorica Kovačević, Vujadin Aleksić MIKROSTRUKTURE PERLITNE ŠINE SUČEONO ZAVARENE VARNIČENJEM .....	161
21. Martin Petreski, Dobro Runchev, Gligorche Vrtanoski, Aleksandra Krstevska UTICAJ SINHRONIZACIJE GMAW I LBW PROCESA NA KVALITET ZAVARA I MEHANIČKE KARAKTERISTIKE KONSTRUKCIONOG ČELIKA .....	167



Društvo za  
Zavarivanje  
Crne Gore

1. Konferencija sa međunarodnim učešćem

## „TEHNOLOGIJE SPAJANJA MATERIJALA“

14 - 16. maj 2026. godine, Bečići, Crna Gora



**Aleksandar Sedmak<sup>1,\*</sup>, Taško Maneski<sup>1</sup>, Predrag Mitić<sup>2</sup>,  
Svetlana Jocić<sup>2</sup>, Simon Sedmak<sup>3</sup>**

### REKONSTRUKCIJA OŠTEĆENOG OKLOPA ROTORA U RHE BAJINA BAŠTA

**Rezime:** Tokom rehabilitacije Reverzibilne hidroelektrane „Bajina Bašta“ 2025. godine, otkrivene su prsline u nosećim gredama oklopa rotora. Analizom naposnskog stanja oklopa rotora utvrđeno je da su prsline uzrokovane neočekivanim preopterećenjem usled težine. Takođe je zaključeno da se prsline ne mogu izvaditi i površinski zavariti zbog veoma ograničenog prostora. Stoga je morao biti usvojen drugačiji pristup, što je dovelo do rekonstrukcije oklopa rotora. U tom cilju oklop rotora je ojačan novim dodatnim gredama koja su spojene zavarivanjem sa naprslim gredama i oklopom.

**Ključne riječi:** oklop rotora, prsline, rekonstrukcija, zavarivanje

### RECONSTRUCTION OF DAMAGED ROTOR SPOKE IN RHPP BAJINA BAŠTA

**Abstract:** Recently, during rehabilitation Reversible Hydro Power Plant “Bajina Basta” in 2025, cracks were discovered in the rotor spoke ribs. Through an analysis of the rotor spoke it was determined that cracking was caused by an unexpected overloading due to the weight. It was also concluded that cracks can't be grooved and surface welded due to very limited space. Thus, a different approach had to be taken, leading to reconstruction of the rotor spoke. To do so, it was necessary to strengthen rotor by new additional ribs which were welded with the existing, damaged one.

**Keywords:** rotor spoke rib, cracks, reconstruction, welding

<sup>1</sup> Mašinski Fakultet, Univerzitet u Beograd, Republika Srbija

<sup>2</sup> GOŠA Montaža d.o.o., Beograd, Republika Srbija

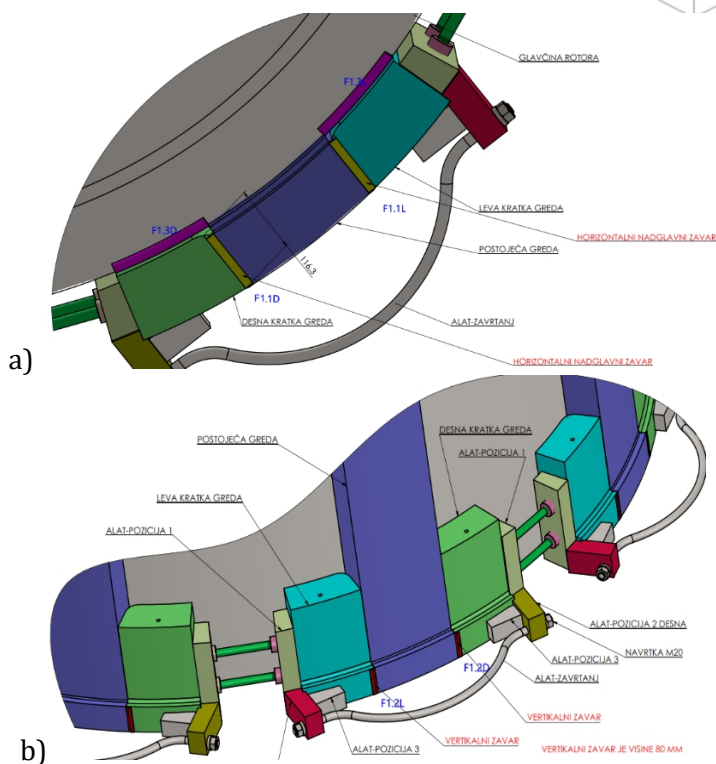
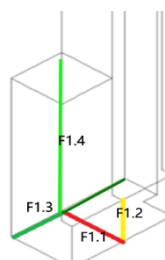
<sup>3</sup> Inovacioni Centar Mašinskog faculteta, Beograd, Republika Srbija

\* Korespondentni autor, mail: aleksandarsedmak@gmail.com

## 1. UVOD

Na rotoru agregata R2 u RHE „Bajina Bašta“ pojavile su se prsline na mestima oslanjanja paket limova, na donjem prepustu grede. Prsline su nastale na mestu najveće koncentracije napona, a prostirale se zrakasto po spoljašnoj površini [1]. Zbog geometrijskih ograničenja sanacija prsline nije bila moguća, pa je stoga urađena rekonstrukcija rotora, ugradnjom novih nosećih greda koje su spojene zavarivanjem sa naprslim gredama i rotorom. Na taj način postojeće grede sa prslinama su rasterećene, a nove grede preuzimaju opterećenje. Nove grede su spojene sa naprslim gredama i oklopom rotora u jednu celinu pomoću 4 zavarena spoja, a deo oklopa rotora tokom rekonstrukcije je prikazan na Slici 1.

F1.1 - nadglavni horizontalni zavar nova greda - stara greda,  
F1.2 - vertikalni zavar nova greda - stara greda,  
F1.3 - nadglavni horizontalni zavar nova greda - rotor,  
F1.4 - vertikalni zavar nova greda - rotor.



Slika 1. Prikaz dela oklopa rotora tokom rekonstrukcije;  
a) pogled odozdo, b) pogled спреда

## 2. OSNOVNI MATERIJAL

Materijal naprskih greda je ugljenični konstrukcioni čelik JIS G3106 Grade SM 41 A/B, garantovanih mehaničkih svojstava (napon tečenja min. 235 MPa) i sadržaja S i P (do 0.035%). Materijal novih greda je čelik S355 J2 sa povećanim sadržajem Mn (do 1.65%), negarantovanog hemijskog sastava i garantovanih mehaničkih svojstava. Napon tečenja je minimalno 355 MPa, a udarna žilavost na -20°C je minimalno 27 J za debljine limova 3 do 150 mm. Čelik S355 J2 spada u grupu kvalitetnih (QS), potpuno, odnosno dvostruko umirenih čelika (Si>0.1% i Al 0.02%), što obezbeđuje uklanjanje azota. Vrednost ekvivalenta C, dobijena analizom šarže je  $C_{eq}=0.32$ . Debljina osnovnog materijala (OM) je  $d=120$  mm, što je uz povećani sadržaj Mn uslovalo predgrevanje i zagrevanje međuprolaza. Temperatura predgrevanja je izračunata prema standardu SRPS EN 1011-2, uzimajući u obzir uticaj hemijskog sastava, debljine OM, sadržaja difundovanog vodonika (HD) i unosa toplote Q, pri zavarivanju:

$$T_p = T_{p,C_{eq}} + T_{p,d} + T_{p,HD} + T_{p,Q}$$

$$T_{p,C_{eq}} = 750 \cdot C_{eq} - 150 = 750 \cdot 0.32 - 150 = 90$$

$$T_{p,d} = 160 \cdot \tanh(d/35) - 110 \cdot d = 160 \tanh(120/35) - 110 = 50$$

$$T_{p,HD} = 62 \cdot HD \cdot 0,35 - 100 = 62 \cdot 5 \cdot 0.35 - 100 = 8.9$$

gdje je HD - sadržaj difundovanog vodonika ml/100 gr,

$$T_{p,Q_{popuna}} = (53 \cdot C_{eq} - 32) \cdot Q - 53 \cdot C_{eq} + 32 = (53 \cdot 0.32 - 32) 1.0 - 53 \cdot 0.32 + 32 = 0$$

gdje je Q - količina unete toplote KJ/mm,

$$T_{p,Q_{koren}} = (53 \cdot 0.32 - 32) 0.78 - 53 \cdot 0.32 + 32 = 3.4$$

$$T_p (\text{popuna}) = 82.5 + 49.6 + 8.9 + 0 = 148^\circ\text{C}$$

$$T_p (\text{koren}) = 82.5 + 49.6 + 8.9 + 3.4 = 152^\circ\text{C},$$

usvojeno je 150°C u oba slučaja (popuna i koren).

## 3. TEHNOLOGIJA ZAVARIVANJA

Uzimajući u obzir zahtev za vrhunskim kvalitetom zavarenog spoja, i potrebu za sto manjim unosom toplote, kao i ograničeni prostor pri zavarivanju preporuka je postupak 141-GTAW (TIG) prema EN ISO 4063, odnosno elektrolučno zavarivanje netopivom elektrodom u zaštiti inertnog gasa I1 (Ar 99.999) prema EN ISO 14175.

Za zavarivanje nove greda za rotor (spoj F1.4), zbog nemogućnosti ulaska TIG gorionika u suženi prostor, korišćen je postupak 111 - elektrolučno zavarivanje obloženom elektrodom. Zbog većeg unosa toplote kod ovog postupka zavarivanja, predviđeno je smanjeno njihanje elektrode i veća brzina zavarivanja.

Stare grede su pripremljene za spajanje sa novim gredama tako što su prsline površinski iskopane i navarene TIG postupkom i austenitnim dodatnim materijalom TIG zica  $\varnothing 2.0$  po EN ISO 14343-A:W 18 8 Mn (BÖHLER A 7 CN-IG).

Kod zavarivanja TIG postupkom korišćena je jednosmerna struja direktne

polarnosti da bi se veći deo toplote preneo u zavareni spoj (približno 2/3), a koja istovremeno smanjuje zaobljavanja vrha elektrode, što je bitno u slučaju zavarivanja ½ V i ½ Y žleba. Kao dodatni materijal korišćena je žica EN ISO 21952-A:W MoSi, trgovačkog naziva BÖHLER DMO-IG, prečnika Ø2.0 za korene prolaze i Ø2.4 za prolaze popune.

Kao netopivu elektrodu koristiti volfram sa dodatkom torijum oksida WT 20 (crvena) prečnika 2.4 mm koja mora biti naoštrena tako da dužina konusnog vrha bude 4-6 mm. Vrh volframove elektrode treba biti izvučen iz mlaznice za oko 2-4 mm. Žica se dodaje u prednji deo rastopine (ne direktno u sredinu luka, odnosno ne ispod volframove elektrode) i unosi tako da vrh žice dolazi u kontakt sa rastopom.

Za postupak zavarivanja 111 korišćena je jednosmerna struju obrnute polarnosti, a kao dodatni materijal obložena elektroda EN ISO 2560-A:E 42 5 B42 H5, trgovačkog naziva BÖHLER FOX EV 50 Ø2.5, odnosno niskovodonična obložena elektroda bazičnog tipa. Ovu elektrodu treba obavezno sušiti na 100°C/1h + 300÷350°C/2h ili 400°C/1h ili 250°C/4h. Pošto je ova obloga higroskopna potrebno je elektrodu pre upotrebe držati u tobovcima na temperaturi 100÷150°C.

### **Redosled zavarivanja** (Slika 2)

**I** - Istovremeno zavarivati F1 (F1.1-F1.3) i F2 (F2.1-F2.3), popunjavati do cca 10 mm visine spoja

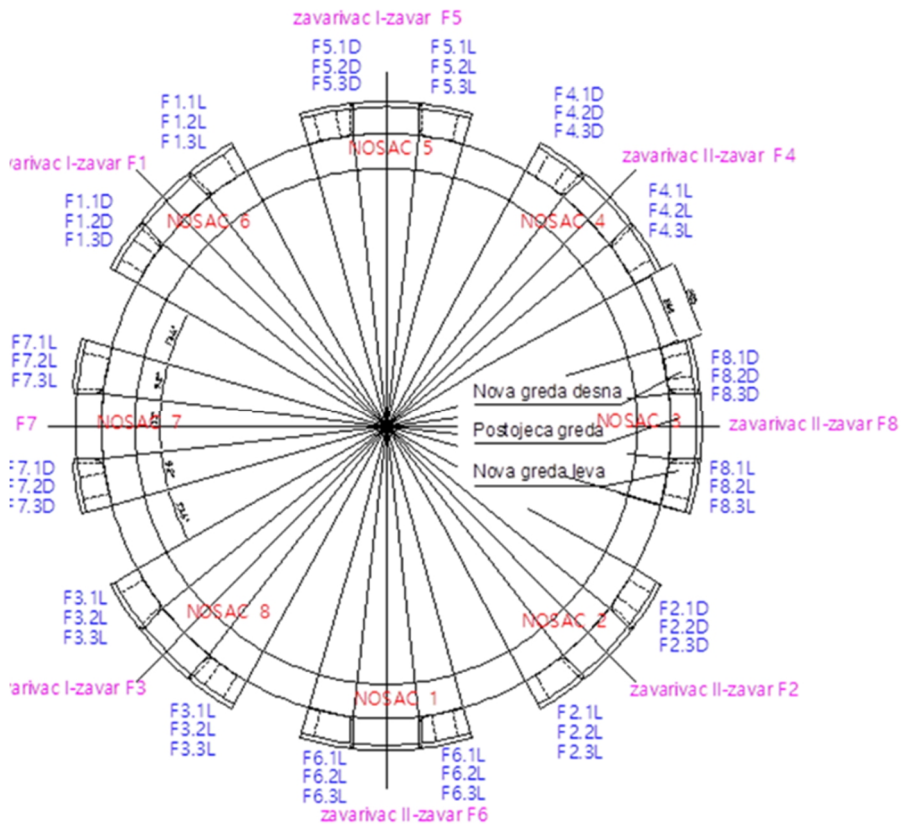
Zavarivač br.1

1. korak -zavariti koreni prolaz nadglavnog horizontalnog zavara F1.1L -položaj PE l=120 mm
2. korak -zavariti koreni prolaz vertikalnog zavara F1.2L -položaj PF l=80 mm
3. korak -zavariti prolaze popune nadglavnog horizontalnog zavara F1.1L -položaj PE l=120 mm
4. korak -zavariti prolaze popune vertikalnog zavara F1.2L -položaj PF l=80 mm
5. korak -zavariti ugaoni horizontalani zavar F1.3L -položaj PD l=200 mm
6. korak -zavariti završne prolaze nadglavnog horizontalnog zavara F1.1L -položaj PE l=120 mm
7. korak -zavariti završne prolaze vertikalnog zavara F1.2L -položaj PF l=80 mm

Zavarivač br.2

1. korak -zavariti koreni prolaz nadglavnog horizontalnog zavara F2.1D -položaj PE l=120 mm
2. korak -zavariti koreni prolaz vertikalnog zavara F2.2D -položaj PF l=80 mm
3. korak -zavariti prolaze popune nadglavnog horizontalnog zavara F2.1D -položaj PE l=120 mm

4. korak -zavariti prolaze popune vertikalnog zavara F2.2D -položaj PF l=80 mm
5. korak -zavariti ugaoni horizontalani zavar F2.3D -položaj PD l=200 mm
6. korak -zavariti završne prolaze nadglavnog horizontalnog zavara F2.1D -položaj PE l=120 mm
7. korak -zavariti završne prolaze vertikalnog zavara F2.2D -položaj PF l=80 mm.



Slika 2. Redosled zavarivanja

Isti redosled zavarivanja ponoviti na desnoj (zavarivač 1), odnosno levoj gredi (zavarivač 2).

**II** Istovremeno zavarivati zavare F3 i F4 istim redosledom kao kod zavarivanja F1 i F2

**III** Istovremeno zavarivati zavare F5 i F6 istim redosledom kao kod zavarivanja F1 i F2

**IV** Istovremeno zavarivati zavare F7 i F8 istim redosledom kao kod zavarivanja F1 i F2

Posle svih zavara (F1-F8), zavariti vertikalni ugaoni zavar F1.4, FW a7Δx260

## V Istovremeno zavarivati F1.4 i F2.4:

### Zavarivač 1

1. korak -zavariti F1.4 L tehnikom na gore iz 3 prolaza elektrodom Ø2.5
2. korak -zavariti F1.4 D

### Zavarivač 2

1. korak -zavariti F2.4 D tehnikom na gore iz 3 prolaza elektrodom Ø2.5
2. korak -zavariti F1.4 D

VI Istovremeno zavariti F3.4 i F4.4 isti redosledom kao kod zavarivanja F1.4 i F2.4

VII Istovremeno zavarivati zavare F5.4 i F6.4 isti redosledom kao kod zavarivanja F1.4 i F2.4

VIII Istovremeno zavarivati zavare F7.4 i F8.4 isti redosledom kao kod zavarivanja F1.4 i F2.4

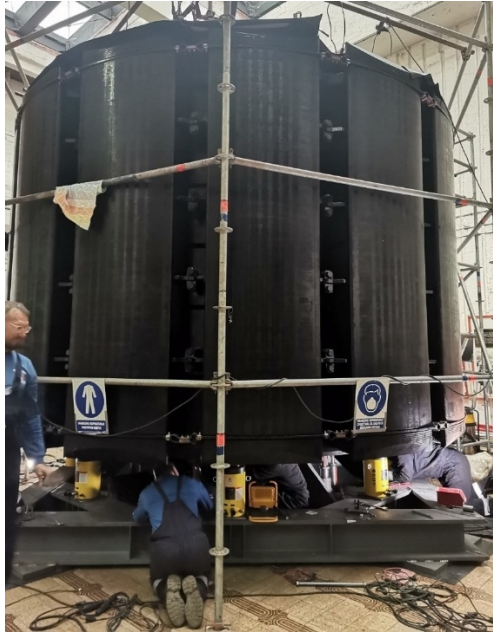
Zavarivanje izvoditi bez vremenskih prekida. Alat za fiksiranje i stezanje novih greda ne skidati do potpunog hlađenja, 24 h nakon zavarivanja F1.1; F1.2; F1.3-F8.1; F8.2; F8.3. Zavare prebrusiti do ravni osnovnog materijala, vodeći računa o kontrolisanom brušenju i unosu toplote.

### **Termički ciklus predgrevanja i zavarivanja**

Pri predgrevanju treba primenjivati standard EN ISO 13916. Koristiti elektrotoporno predgrevanje sa grejačima koji se postavljaju na radni komad u blizini zavara. Grejači zajedno sa radnim komadom se izoluju kako bi odavanje toplote bilo svedeno na minimum. Predgrevanje treba da bude sa spoljne strane u dužini jednog grejača, sa obe strane žleba, nikako direktno na bok šava. Predgrevanje mora da bude postepeno, brzinom oko 100°C/1h.

Temperaturu predgrevanja kontrolisati sa suprotne strane, kako bi bili sigurni da je ceo komad progrejan po preseku. Vreme ujednačavanja temperature treba da bude 2 min za svakih 25 mm debljine OM. Temperature se meri na rastojanju od 50 mm od ivice žljeba (SRPS ISO 13916) termoelementima sa pisacem koji se pričvršćuju na radni komad. Međuprolazna temperatura u zoni zavarivanja ne sme da pređe 250°C, a meri se na šavu ili na OM, što bliže šavu Temperatura međusloja treba biti jednaka ili malo viša od temperature predgrevanja.

Po završetku zavarivanja, zavare treba zaštititi keramičkim platnom, hladiti postepeno do 100°C i zadržati na 100°C oko 60 min. Tek kada završena pozicija postigne temperaturu spoljašnje sredine sme da se skine keramičko platno. Na Slici 3 je prikazana priprema za zavarivanje, a na Slici 4 su prikazani dobijeni zavari.



Slika 3. Priprema za zavarivanje



Slika 4. Izgled rekonstruisanog oklopa rotora

#### 4. ZAKLJUČCI

Rekonstrukcija oštećenog oklopa rotora u RHE „Bajina Bašta” je uspešno izvedena ugradnjom novih nosećih elemenata oblika kratkih greda koje su spojene sa postojećim naprslim gredama i oklopom rotora zavarivanjem i vijčanim vezama. Sveobuhvatna i detaljna analiza naponskog stanja oštećenog rotora je omogućila izbor optimalne varijante rekonstrukcije, koja je ujedno predstavlja i poboljšanje osnovnog projektantskog rešenja.

## **ZAHVALNICA**

Autori ovog rada se posebno zahvaljuju Drašku Volfu i Dejanu Dimiću, vrhunskim zavarivačima Goša Montaže, a i Srbije, na besprekorno izvedenom zavarivanju koje je ključno doprinelo uspehu sanacije rotora.

## **LITERATURA**

- [1] Maneski, T. et al., Reconstruction of a damaged rotor spoke rib – part 1: stress analysis, *Structural Integrity and Life*, 26 (2026), 2, pp. 17-21.



Društvo za  
Zavarivanje  
Crne Gore

1. Konferencija sa međunarodnim učešćem

## „TEHNOLOGIJE SPAJANJA MATERIJALA“

14 - 16. maj 2026. godine, Bečići, Crna Gora



MAŠINSKI  
FAKULTET  
PODGORICA

**Dragan Milčić<sup>1,\*</sup>, Miodrag Milčić<sup>1</sup>, Janez Kramberger<sup>2</sup>,  
Damjan Klobčar<sup>3</sup>**

### STATISTIČKA ANALIZA ZAMORNOG VEKA FSW ZAVARENIH SPOJEVA LEGURE ALUMINIJUMA AA2024

**Rezime:** U radu je prikazana statistička analiza rasipanja radnog veka zavarenih spojeva od legure AA2024 izrađenih postupkom zavarivanja trenjem sa mešanjem (FSW), zasnovana na eksperimentalno dobijenim S–N krivama. Ispitivanja zamora vršena su pod zateznim cikličnim opterećenjem na servohidrauličkom pulzatoru sa konstantnom amplitudom, odnosom opterećenja/napona  $R = F_{min}/F_{max} = 0,1$  i frekvencijom opterećenja od 35 Hz. Kriterijum otkaza je bio lom epruvete. Kriterijum za određivanje trajne dinamičke čvrstoće zavarenih spojeva je bio  $10 \times 10^6$  ciklusa. Broj ciklusa do loma, utvrđen eksperimentalnim testom na zamor, rangiran je prema verovatnoći otkaza radi procene raspodele i određivanja statističkih parametara trajnosti. Analiziran je uticaj nivoa naprezanja i rasipanja S–N podataka na mehanizme zamornog loma. Rezultati pokazuju da je parametar oblika  $\beta$  Vejbulove raspodele približno 0,5, što ukazuje na krti lom FSW zavarenih spojeva od aluminijumske legure AA2024. Predloženi pristup omogućava jednostavnu i efikasnu kvantitativnu procenu zamornog veka FSW zavarenih spojeva za zadati nivo pouzdanosti kao i određivanje pouzdanosti za unapred definisan broj ciklusa.

**Ključne riječi:** zavarivanje trenjem sa mešanjem (FSW), legura aluminijuma AA2024-T351, Velerova kriva S-N, Weibull raspodela

<sup>1</sup> Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet, Niš, Republika Srbija

<sup>2</sup> Univerzitet u Mariboru, Mašinski fakultet, Maribor, Republika Slovenija

<sup>3</sup> Univerzitet u Ljubljani, Mašinski fakultet, Ljubljana, Republika Slovenija

\* Korespondentni autor, mail: dragan.milcic@masfak.ni.ac.rs

# STATISTICAL ANALYSIS OF THE FATIGUE LIFE OF FSW WELDED JOINTS OF AA2024 ALUMINUM ALLOY

**Abstract:** *This paper presents a statistical analysis of the scatter in the fatigue life of welded joints made of AA2024 aluminum alloy produced by friction stir welding (FSW), based on experimentally obtained S–N curves. Fatigue tests were performed under tensile cyclic loading using a servo-hydraulic testing machine with constant amplitude, a load (stress) ratio of  $R = F_{min}/F_{max} = 0.1$ , and a loading frequency of 35 Hz. The failure criterion was specimen fracture. The criterion for determining the endurance limit of the welded joints was set at  $10 \times 10^6$  cycles. The number of cycles to failure, determined by experimental fatigue testing, was ranked according to the probability of failure in order to evaluate the statistical distribution and determine the fatigue life parameters. The influence of stress level and S-N data scatter on fatigue fracture mechanisms was analyzed. The results indicate that the shape parameter  $\beta$  of the Weibull distribution is approximately 0.5, suggesting a brittle fracture behavior of FSW welded joints made of AA2024 aluminum alloy. The proposed approach enables a simple and efficient quantitative assessment of the fatigue life of FSW welded joints for a given reliability level, as well as the determination of reliability for a predefined number of cycles.*

**Keywords:** friction stir welding (FSW), aluminum alloy AA2024-T351, S–N curve, Weibull distribution

## 1. UVOD

Zavarivanje trenjem sa mešanjem (Friction Stir Welding – FSW) predstavlja relativno nov postupak spajanja materijala u čvrstom stanju, koji je od svog uvođenja početkom devedesetih godina prošlog veka našao široku primenu u vazduhoplovnoj, automobilskoj i brodograđevnoj industriji, naročito kod aluminijumskih legura visoke čvrstoće koje se teško zavaruju klasičnim postupcima topljenjem [1]. Posebno značajna je primena FSW postupka kod legura serije 2xxx, kao što je AA2024, zbog njihove izražene osetljivosti na pojavu toplih pukotina i degradaciju mehaničkih svojstava tokom konvencionalnog zavarivanja [2].

Zamor zavarenih spojeva ostaje jedan od dominantnih mehanizama otkaza konstrukcija izloženih promenljivim opterećenjima ispod praga pri kojem bi došlo do trenutnog loma.

Kumulativna i nepovratna priroda oštećenja izazvanih zamornim procesima, kao i činjenica da do otkaza često dolazi iznenada, otežavaju uočavanje postepenih promena u ponašanju materijala tokom vremena [3]. Ponašanje materijala pri ovakvom tipu opterećenja razlikuje se od ponašanja pri statičkom opterećenju, jer materijali koji mogu izdržati velika statička opterećenja mogu otkazati pri znatno manjim nivoima napona ako su oni ponavljani veliki broj puta.

Zamorni lom nastaje usled ponovljenog opterećenja, a procenjuje se da je čak 90% svih razaranja konstrukcija povezano sa zamorom. Zamorni vek pri konstantnoj amplitudi opterećenja primarno je određen amplitudom napona  $\sigma_a$  i srednjim naponom  $\sigma_m$  - ili ekvivalentno, maksimalnim naponom  $\sigma_{max}$  i odnosom napona  $R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$ . [4]. Ne postoji univerzalna teorija koja u potpunosti objašnjava ponašanje materijala pri zamoru i cikličnom opterećenju, što zamor i proces formiranja oštećenja čini složenim fenomenom [5].

Analiza zamora ima za cilj da, merenjem zamornog veka komponente pri zadatom režimu cikličnog opterećenja, predvidi njen zamorni vek u realnim uslovima eksploatacije. Tehnike predviđanja zamora uglavnom se svrstavaju u dve kategorije [6]. Prva se fokusira na predviđanje inicijacije prsline, koristeći kombinaciju akumulacije oštećenja u funkciji naprezanja komponente [7]. Drugi pristup zasniva se na mehanizmu kontinuiranog zamornog oštećenja, pri čemu se oštećenje procenjuje kroz broj ciklusa [8]. Zamorni režimi se uobičajeno klasifikuju na sledeći način: niskociklični zamor odgovara broju ciklusa  $N \leq 10^4$ , dok se visokociklični zamor definiše za  $N > 10^4$  ciklusa [9].

Kod FSW zavarenih spojeva, zamorni lom je snažno povezan sa mikrostrukturnom heterogenošću nastalom tokom procesa zavarivanja, prisustvom zaostalih napona, kao i geometrijom zavera i pojavom lokalnih koncentracija napona [10, 11]. Brojna istraživanja su pokazala da se inicijacija zamorne pukotine kod FSW spojeva aluminijumskih legura često javlja u zoni termo-mehaničkog uticaja (TMAZ) ili u zoni uticaja toplote (HAZ), gde dolazi do omekšavanja materijala usled rastvaranja i koalescencije precipitata [12].

Eksperimentalna ispitivanja zamora FSW zavarenih spojeva legure AA2024 pokazala su da se njihov zamorni vek može značajno razlikovati u odnosu na osnovni materijal, pri čemu je rasipanje broja ciklusa do loma izraženije nego kod homogenih materijala [13]. Zbog toga je klasičan deterministički pristup zasnovan isključivo na srednjim vrednostima S-N krivih često nedovoljan za pouzdanu procenu radnog veka, naročito u sigurnosno kritičnim konstrukcijama.

U savremenim istraživanjima sve veći značaj ima statistička analiza zamornog veka, kojom se kvantifikuje rasipanje eksperimentalnih S-N podataka i omogućava procena pouzdanosti pri zadatoj verovatnoći otkaza. Među najčešće korišćenim statističkim modelima nalaze se lognormalna i Vejbulova raspodela, pri čemu se Vejbulova raspodela pokazala naročito pogodnom za opisivanje mehanizama zamornog loma i prelaza između duktilnog i krtoeg ponašanja [14]. Parametar oblika Vejbulove raspodele omogućava direktnu interpretaciju prirode otkaza, što je od posebnog značaja kod zavarenih spojeva sa izraženom strukturnom nehomogenošću.

Istraživanja su pokazala da vrednosti parametra oblika manje od 1 ukazuju na dominaciju krutih mehanizama loma i ranu inicijaciju pukotina, što je često povezano sa defektima u zavaru ili lokalnim mikrostrukturnim degradacijama. Kod FSW zavarenih spojeva aluminijumskih legura visoke čvrstoće, ovakvo ponašanje se često dovodi u vezu sa smanjenom duktilnošću u HAZ zoni i prisustvom zaostalih napona.

Uprkos brojnim eksperimentalnim studijama zamora FSW spojeva, u literaturi je i dalje relativno malo radova koji sistematski povezuju rasipanje zamornog veka, nivo naprezanja i mehanizme loma kroz jednostavne statističke modele, pogodne za inženjersku primenu. Zbog toga postoji potreba za razvojem pristupa koji omogućavaju efikasnu procenu pouzdanosti zavarenih spojeva na osnovu ograničenog broja eksperimentalnih podataka, bez primene složenih probabilističkih procedura.

U tom kontekstu, ovaj rad ima za cilj statističku analizu rasipanja radnog veka pri zamoru FSW zavarenih spojeva od legure AA2024, zasnovanu na eksperimentalno dobijenim S–N krivama, kao i identifikaciju dominantnih mehanizama zamornog loma kroz parametre Weibulove raspodele.

## 2. EKSPERIMENT

Eksperiment je bio usmeren na ispitivanje uticaja ulaznih kinematičkih parametara, kao što su brzina zavarivanja ( $v$ ) i brzina rotacije alata ( $n$ ), na metalurške i mehaničke karakteristike zavarenih spojeva. Osnovni materijal je bila aluminijumska legura AA2024-T351. Hemijski sastav eksperimentalnih ploča dat je u Tabeli 1, a mehanička svojstva su prikazana u Tabeli 2.

Tabela 1. Hemijski sastav legure aluminijuma AA2024-T351

Hemijski sastav	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti	Al
%	4,70	1,56	0,65	0,17	0,046	0,11	0,032	Balance

Tabela 2. Mehanička svojstva legure aluminijuma AA2024-T351

Granica tečenja $R_{eh}$ MPa	Zatezna čvrstoća $R_m$ MPa	Modul elastičnosti $E$ MPa	Poasonov Koeficijent $\nu$	Elongacija $A_5$ %	Tvrdoća HV
370	481	73100	0,33	17.9	137

Dimenzije zavarenih ploča bile su 500 mm × 65 mm × 6 mm. Oba lica zavarenih ploča obrađena su na brusilici na debljinu od 6 mm. Pre početka zavarivanja, ispod zavarenih ploča postavlja se austenitna ploča koja služi kao podloga (*backing plate*). Za zavarivanje je korišćena glodalica. Dužina zavara iznosila je približno 400 mm. Slika 1 prikazuje mašinu, a Slika 2 prikazuje alat koji je korišćen za izradu sučeonog FSW spoja.

Zavarivanje je izvedeno u skladu sa planiranom eksperimentalnom matricom, koja je data u Tabeli 3. Broj obrtaja alata je bio konstantan  $n=750 \text{ min}^{-1}$ , a brzina zavarivanja  $v$  je varirana.

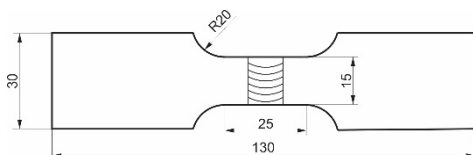
Tabela 3. Parametri zavarivanja

Uzorak	Broj obrtaja $n$ $\text{min}^{-1}$	Brzina zavarivanja $v$ $\text{mm/min}$	Odnos $n/v$ o/mm
A - 750/73	750	73	10,27
B - 750/116		116	6,47
C - 750/150		150	5

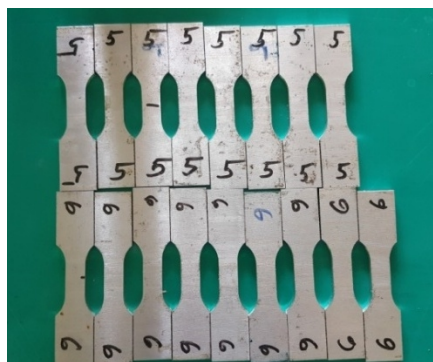
Nakon završetka procesa zavarivanja, zavareni spojevi su testirani. U tu svrhu je izvršena vizuelna kontrola lica i korena zavarenog šava, kao i radiografska kontrola uzoraka. Ovim ispitivanjima bez razaranja nisu uočeni nikakvi nedostaci. Izvršena su mnogobrojna ispitivanja mehaničkih i metalografska svojstava FSW zavarenih spojeva: makro- i mikrostrutura ispitivanja profila tvrdoće zavarenih spojeva, statičko ispitivanje na zatezanje, ispitivanje tvrdoće, ispitivanje udarne žilavosti, ispitivanje dinamičke čvrstoće i ispitivanje parametara mehanike loma.

Ispitivanja na zamor sprovedena su pri jednosmerno promenljivom zateznom opterećenju korišćenjem mašine „Shimadzu Servopulser E100 kN, Shimadzu Co., Kyoto, Japan“. Radi se o servo-hidrauličnoj mašini za zamaranje materijala, dinamičkog i statičkog aksijalnog opterećenja do 100 kN.

Oblik i dimenzije epruvete za ispitivanje na zamaranje data je na Slici 1. Ispitivanje na zamaranje je rađeno sa odnosom opterećenja odnosno napona  $R=F_{\min}/F_{\max}=0,1$  i frekvencijom opterećenja 35 Hz. Pripremljeno je ukupno 48 epruveta (deo epruveta prikazan na Slici 2). Za svaki parameter FSW zavarivanja (750/73; 750/116 i 750/150) bilo je spremno po 16 epruveta.



Slika 1. Dimenzije epruvete za ispitivanje na zamaranje



Slika 2. Deo izrađenih epruveta spremnih za ispitivanje na zamaranje

Kriterijum otkaza je bio lom epruvete. Tokom ispitivanja se snimao broj ciklusa opterećenja do loma za svaku ispitivanu epruvetu. Kriterijum za određivanje trajne dinamičke čvrstoće je bio broj  $10 \times 10^6$  ciklusa. Prva epruveta je statički opterećena da bi se odredila granica tečenja, na osnovu koje je definisana šema ispitivanja na zamaranje. Epruveta je sve vreme ispitivanja zategnuta sa odnosom opterećenja  $R=0,1$ .

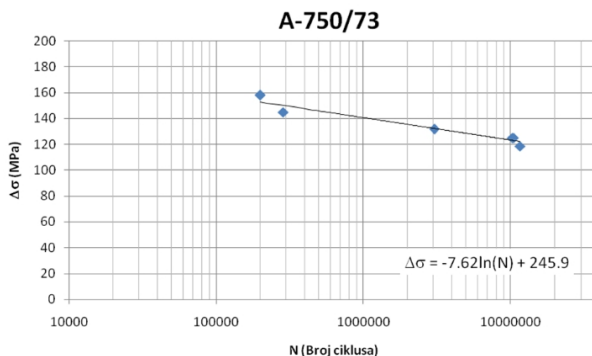
### 3. REZULTATI I DISKUSIJA

Rezultati ispitivanja epruveta izvučenih iz zavarenog uzorka sa parametrima A-750/73 dati su u Tabeli 4.

Tabela 4. Rezultati dinamičkog ispitivanja za uzorak A-750/73

Eruveta No.	$F_g$ kN	$F_d$ kN	$\Delta F$ kN	$\Delta\sigma$ MPa	$N$ ciklus
1	12	1,2	10800	157,8947	199455
2	11	1,1	9900	144,7368	286424
3	10	1	9000	131,5789	3034896
4	9,5	0,95	8550	125	10324510
5	9,5	0,95	8550	125	10500000
6	9	0,9	8100	118,4211	11600000

Na osnovu rezultata ispitivanja datih u Tabeli 4, dobijena je S-N kriva. Na Slici 3 je prikazana S-N kriva za zavareni uzorak sa parametrima zavarivanja A-750/73.



Slika 3. S-N kriva za uzorak A-750/73

Rezultati eksperimentalnih ispitivanja zamora zavarenih spojeva uobičajeno pokazuju značajno rasipanje broja ciklusa do loma, čak i pri istim uslovima opterećenja i identičnim geometrijskim karakteristikama epruveta. Ovo rasipanje je posledica složene prirode procesa zavarivanja, koji dovodi do pojave mikrostrukturnih nehomogenosti, zaostalih napona, promena tvrdoće i prisustva lokalnih defekata, posebno u zonama termo-mehaničkog uticaja (TMAZ) i zone uticaja toplote (HAZ). Zbog toga zamorni lom

zavarenih spojeva predstavlja izrazito stohastički proces, u kome je trajnost snažno zavisna od slučajne pojave najnepovoljnije mikrostrukturne karakteristike.

Klasične S–N krive (Wöhlerove krive) predstavljaju deterministički opis zamornog ponašanja i uobičajeno se dobijaju aproksimacijom srednjih vrednosti eksperimentalnih podataka. Takav pristup ne uzima u obzir rasipanje rezultata, niti omogućava kvantifikaciju verovatnoće otkaza pri zadatom broju ciklusa ili nivou naprezanja. Usled toga, primena jedne srednje S–N krive može dovesti do nepouzdanih ili previše konzervativnih procena trajnosti zavarenih konstrukcija.

Zbog izraženog rasipanja eksperimentalnih S–N podataka neophodna je primena statističkih metoda koje omogućavaju probabilističku analizu zamornog veka. Među različitim statističkim raspodelama, Weibullova raspodela pokazala se kao posebno pogodna za opis trajnosti pri zamoru jer omogućava fleksibilno modeliranje različitih oblika raspodele i direktno povezivanje statističkih parametara sa mehanizmima loma. Funkcija gustine verovatnoće Weibullove raspodele  $f(N)$  i intenzitet otkaza  $\lambda(N)$  dati su izrazima:

$$f(N) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{N}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left(-\left(\frac{N}{\eta}\right)^\beta\right) \quad (1)$$

$$\lambda(N) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{N}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (2)$$

Parametar razmere  $\eta$  predstavlja karakteristični zamorni vek pri kumulativnoj verovatnoći otkaza od 63,2%. Parametar oblika Weibull raspodele  $\beta$  direktno određuje oblik funkcije gustine, a posredno i karakter funkcije intenziteta otkaza  $\lambda(N)$ , čime nosi fizičko značenje u pogledu dominantnog mehanizma otkaza:

$\beta < 1$  - intenzitet otkaza  $\lambda(N)$  opada sa vremenom - karakteristično za rane otkaze, greške u proizvodnji ili materijalu;

$\beta = 1$  - intenzitet otkaza je konstantan - Weibullova raspodela se svodi na eksponencijalnu raspodelu, karakteristično za slučajne otkaze nezavisne od starenja;

$\beta > 1$  - intenzitet otkaza raste sa vremenom - karakteristično za zamor, habanje i starenje materijala; za zamor metala tipične vrednosti su  $\beta = 2-4$ . Primena Weibull raspodele omogućava formiranje probabilističkih S–N krivih za različite nivoe verovatnoće otkaza, čime se prelazi sa determinističkog na pouzdanosno orijentisan pristup analizi zamora. Na taj način se obezbeđuje realnija procena trajnosti zavarenih spojeva i njihova primena u inženjerskim proračunima sa jasno definisanim nivoom sigurnosti.

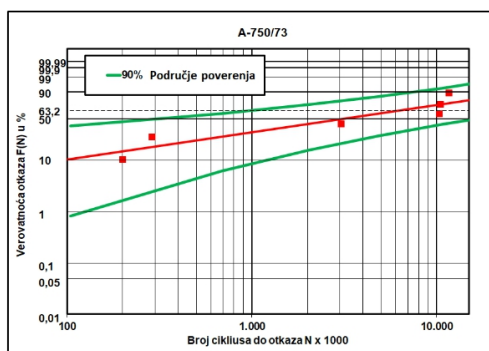
Weibull raspodela se široko primenjuje u analizi zamornog veka materijala i zavarenih spojeva, jer omogućava ne samo statistički opis rasipanja

eksperimentalnih podataka, već i interpretaciju fizičkih mehanizama koji dovode do otkaza. Poseban značaj ima parametar oblika Weibull raspodele, koji direktno utiče na oblik funkcije raspodele broja ciklusa do loma i predstavlja meru promene verovatnoće otkaza tokom eksploatacionog veka. U slučaju kada je vrednost parametra oblika manja od 1 ( $\beta < 1$ ), funkcija intenziteta otkaza opada sa porastom broja ciklusa, što ukazuje da je najveća verovatnoća otkaza prisutna u ranoj fazi opterećenja. Ovakav oblik funkcije intenziteta otkaza odgovara početnoj oblasti krive u obliku kade, koja je karakteristična za rane otkaze. Dominantan uzrok loma su inicijalni defekti (mikrodefekti, nehomogenosti mikrostrukture, zaostali naponi). Ovaj režim je tipičan za krti lom i zavarene spojeve sa izraženim mikrostrukturnim gradijentima (TMAZ, HAZ).

Suprotno tome, u slučaju kada je parametar oblika približno jednak 1 ( $\beta \approx 1$ ), funkcija intenziteta otkaza poprima približno konstantan karakter, što odgovara srednjem, stabilnom delu krive u obliku kade. U tom režimu verovatnoća otkaza je približno nezavisna od broja ciklusa, a proces zamornog loma ima slučajan karakter bez izražene dominacije inicijalnih defekata ili akumulacije oštećenja.

Kada parametar oblika poprimi vrednosti veće od 1 ( $\beta > 1$ ), funkcija intenziteta otkaza postaje rastuća funkcija broja ciklusa, što odgovara završnoj oblasti krive u obliku kade. Ovaj režim karakterističan je za procese u kojima zamorni lom nastaje usled progresivne akumulacije oštećenja i stabilnog rasta zamorne pukotine, uz izraženiju plastičnu deformaciju i manji stepen rasipanja zamornih rezultata.

Na Slici 4 prikazan je Weibullov verovatnosni dijagram za nivo opterećenja A-750/73, dobijen na osnovu eksperimentalnih rezultata ispitivanja zamora FSW zavarenih spojeva od legure AA2024-T351.



$$\beta = 0,536$$

$$\eta = 6298000 \text{ cikl.}$$

$$R(N) = \exp\left(-\left(\frac{N}{6298000}\right)^{0,536}\right)$$

Slika 4. Weibullov verovatnosni dijagram zamornog veka FSW zavarenih spojeva legure AA2024 za nivo opterećenja A-750/73 sa 90%-tnim područjem poverenja

Nagib crvene aproksimacione prave direktno odgovara parametru oblika  $\beta = 0,536 < 1$ , što vizuelno potvrđuje opadajući karakter funkcije intenziteta otkaza. Karakteristični zamorni vek  $\eta = 6.298.000$  ciklusa očitava se na dijagramu pri vrednosti kumulativne verovatnoće otkaza  $F(N) = 63,2\%$ . Vrednost parametra oblika  $\beta = 0,536$  ukazuje na režim zamornog loma u kome dominiraju inicijalni defekti, pri čemu trajnost zavarenog spoja nije određena progresivnom akumulacijom oštećenja tokom cikličnog opterećenja već prisustvom mikrodefekata ili lokalnih mikrostrukturnih nehomogenosti nastalih tokom FSW procesa. Ovo implicira da je inicijacija zamorne pukotine u AA2024-T351 uglavnom povezana sa kritičnim mikrodefektima u zonama TMAZ i HAZ, uključujući lokalne promene tvrdoće, zaostale napone i mikrostrukturne gradijente nastale tokom procesa trenja sa mešanjem (FSW). Takvo ponašanje dovodi do izraženog rasipanja S-N podataka, što je tipično za kruti mehanizam loma kod ove legure.

#### **4. ZAKLJUČCI**

U ovom radu sprovedena je statistička analiza zamornog ponašanja FSW zavarenih spojeva od aluminijumske legure AA2024-T351 na osnovu eksperimentalno dobijenih S-N krivih. Ispitivanja zamora izvršena su pri konstantnoj amplitudi opterećenja, odnosu napona  $R = 0,1$  i kriterijumu otkaza definisanom lomom epruvete, dok je trajna dinamička izdržljivost određena za  $10 \times 10^6$  ciklusa.

Eksperimentalni rezultati pokazuju izraženo rasipanje broja ciklusa do loma, što potvrđuje da deterministički pristup zasnovan na jednoj srednjoj S-N krivi nije dovoljan za pouzdanu procenu trajnosti FSW zavarenih spojeva. Primenom Weibullove raspodele omogućena je kvantitativna procena rasipanja zamornog veka i određivanje verovatnoće otkaza pri zadatom broju ciklusa, čime se prevazilazi ograničenje klasičnog determinističkog pristupa.

Eksperimentalno određena vrednost parametra oblika Weibullove raspodele  $\beta \approx 0,5$  ukazuje na režim zamornog loma u kome dominiraju inicijalni defekti, a ne progresivna akumulacija oštećenja. Ovakvo ponašanje fizički je konzistentno sa inicijacijom zamorne prsline u zoni termomehaničkog uticaja (TMAZ) i zoni uticaja toplote (ZUT), gde FSW termomehanički ciklus izaziva lokalno omekšavanje materijala usled mikrostrukturnih promena - rastvaranja i koalescencije precipitata - što rezultuje povećanom osetljivošću na inicijaciju loma od mikrodefekata.

#### **ZAHVALNICA**

Ovo istraživanje finansijski je podržalo Ministarstvo nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije (Ugovor br. 451-03-33/2026-03/200109).

## LITERATURA

- [1] Thomas, W. M., et al. Friction stir welding. International Patent Application PCT/GB92/02203, 1991.
- [2] Mishra, R. S., Ma, Z. Y. Friction stir welding and processing, *Materials Science and Engineering R*, 50 (2005), 1–78.
- [3] Ma, X., Yang, F., Li, J., Xue, Y., Guan, Z., Fatigue life assessment method of in-service mechanical structure. *Advances in Mechanical Engineering*, 13 (2021), 2, pp. 1–9.
- [4] Smith, K.N., Watson, P., Topper, T.H., A stress-strain function for the fatigue of metals. *Journal of Materials*, 5 (1970), 4, pp. 767–778.
- [5] Hosseini, S.M., Azadi, M., Ghasemi-Ghalebahman, A., Jafari, S.M., Data analysis of striation spacing, lifetime, and crack length in crankshaft ductile cast iron under cyclic bending loading through high-cycle fatigue regime, *Data Brief*, 45(2022), 108666.
- [6] Kashyzadeh, K.R., Souri, K., Bayat, A.G., Jabalbarez, R.S, Ahmad, M., Fatigue life analysis of automotive cast iron knuckle under constant and variable amplitude loading conditions. *Applied Mechanics*, 3 (2022), 2, pp. 517–532.
- [7] Liu, B., Sun, Y., Wang, J., Zhang, G., Characteristic analysis of crack initiation and crack damage stress of sandstone and mudstone under low-temperature condition, *Journal of Cold Regions Engineering*, 34 (2020), 3, 0225.
- [8] Kim, H.S., A practical procedure for predicting the remaining fatigue life at an arbitrary stress ratio, *Journal of Composites Science*, 6 (2022), 6, art. 60170.
- [9] Suresh, S., *Fatigue of Materials*, 2<sup>nd</sup>ed., Cambridge University Press, Cambridge, (1998).
- [10] Malopheyev S, Vysotskiy I, Zhemchuzhnikova D, Mironov S, Kaibyshev R. On the Fatigue Performance of Friction-Stir Welded Aluminum Alloys. *Materials*, 13(2020), 19,4246.
- [11] Golestaneh, A.F., Ali, A., Zadeh, M., Modelling the fatigue crack growth in friction stir welded joint of 2024-T351 Al alloy, *Materials and Design*, 30 (2009), 8, pp. 2928–2937.
- [12] Fonda, R.W., Bingert, J.F., Microstructural evolution in the heat-affected zone of a friction stir weld. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 35 (2004), pp. 1487–1499.
- [13] Miranda, A.C.O., Gerlich, A., Walbridge, S., Aluminum friction stir welds: Review of fatigue parameter data and probabilistic fracture mechanics analysis. *Engineering Fracture Mechanics*, 147 (2015), pp. 243–260.
- [14] Barbosa, J.F., Correia, J.A.F.O., Freire Júnior, R.C.S., Zhu, S.P., De Jesus, A.M.P., Probabilistic S-N fields based on statistical distributions applied to metallic and composite materials: State of the art., *Advances in Mechanical Engineering*, 11 (2019), 8, pp. 1–22.



Društvo za  
Zavarivanje  
Crne Gore

1. Konferencija sa međunarodnim učešćem

## „TEHNOLOGIJE SPAJANJA MATERIJALA“

14 - 16. maj 2026. godine, Bečići, Crna Gora



MAŠINSKI  
FAKULTET  
PODGORICA

**Tihomir Marsenić<sup>1</sup>, Iva Deanović<sup>2</sup>, Dean Lesan<sup>1</sup>,  
Božo Despotović<sup>3</sup>, Mario Jagnjić<sup>4</sup>, Krešo Didić<sup>4</sup>**

### **ZAHTEJEVI ZA KVALIFIKACIJU SUČEONOG SPOJA NA KOMPOZITNOJ KOTLOVSKOJ CIJEVI PREMA ASME BPVC SEKCIJA IX, EDICIJA 2023**

**Rezime:** U radu je opisan postupak kvalifikacije zavarivanja sučeonog spoja na kompozitnoj cijevi koja se primjenjuje u izradi ložišta „recovery“ kotla koji je najsloženiji dio tvornice papira. Sastav ovakvih spojeva se izvodi zavarivanjem i navarivanjem. Navedene su bitne varijable zavarivanja, navarivanja i rezultati ispitivanja prema ASME BPVC Sekciji IX.

**Ključne riječi:** kompozitna cijev, kvalifikacija zavarivanja, „recovery“ kotao

### **REQUIREMENTS FOR QUALIFICATION OF BUTT JOINT ON COMPOSITE BOILER TUBE ACCORDING TO ASME BPVC SECTION IX, EDITION 2023**

**Abstract:** The paper describes the welding procedure qualification of the butt joint on the composite tube, which is used in the production of the furnace of the „recovery“ boiler, which is the integral and most complex part of the paper factory. The joining of such joints is performed by welding and cladding applying of corrosion resistant overlay by welding. The essential variables of welding, cladding and the test results according to ASME BPVC Section IX are listed.

**Keywords:** composite tube, welding procedure qualification, „recovery“ boiler

<sup>1</sup> ANDRITZ TEP d.o.o., Slavonski Brod, Republika Hrvatska

<sup>2</sup> Tehničko Veleučilište Zagreb, Zagreb, Republika Hrvatska

<sup>3</sup> DTZSB, Slavonski Brod, Republika Hrvatska

<sup>4</sup> Đuro Đaković Specijalna Vozila, Slavonski Brod, Republika Hrvatska

\* Korespondentni autor, mail: tihomir.marsenic@andritz.com

## **1. UVOD**

Andritz Termoenergetska Postrojenja d.o.o. (ATEP) je tvrtka sa stogodišnjim iskustvom u proizvodnji različitih tipova kotlovskih postrojenja. ATEP je dio grupacije ANDRITZ koja je jedna od vodećih u projektiranju, izradi i instaliranju postrojenja za proizvodnju širokog spektra proizvoda od papira. Kotao „Chemical recovery boiler” je ključan dio procesa proizvodnje pulpe jer oporavlja i regenerira neophodne kemijske elemente i proizvodi električnu energiju potrebnu za rad postrojenja za proizvodnju papira. Izazov je odabrati kotao koji ne samo da učinkovito oporavlja kemikalije i generira energiju, već to čini i na siguran, pouzdan i ekološki prihvatljiv način.

ANDRITZ je jedan od rijetkih dobavljača koji isporučuje kompletne tvornice temeljene na Kraft procesu, čija tehnološka rješenja su svjetski poznata i s ekološkog aspekta izvrsna [1].

Najvažniji cilj proizvođača pulpe, odnosno papira je ekološki prihvatljiva, sigurna i kontinuirana proizvodnja pulpe s dosljednom kvalitetom. Visoki prinosi uz niske operativne troškove jednako su važni kao i zdrav i siguran rad za ljude i okoliš [1].

Najopterećeniji dijelovi „Chemical recovery boiler” se izrađuju od materijala koji su namjenjeni za tlačnu namjenu i korozijski su postojani u agresivnoj sredini. Za ispunjavanje ovih uvjeta primjenjuju se cijevi izrađene od dva materijala međusobno spojena, poznate pod imenom kompozitne cijevi. Spajanje, odnosno kvalifikacija postupaka zavarivanja na kompozitnim cijevima je posebno specificirana u proizvodnim normama ili normama za kvalifikaciju postupaka. Spajanje zavarivanjem zahtjeva posebnu tehnologiju koja treba definirati tip i način pripreme spoja, kontrolu spoja, postupke zavarivanja i ispitivanja zavarenog spoja uključujući metode i opsege ispitivanja.

## **2. OSNOVNI ZAHTJEVI ZA IZRADU I KVALIFIKACIJU POSTUPKA ZAVARIVANJA**

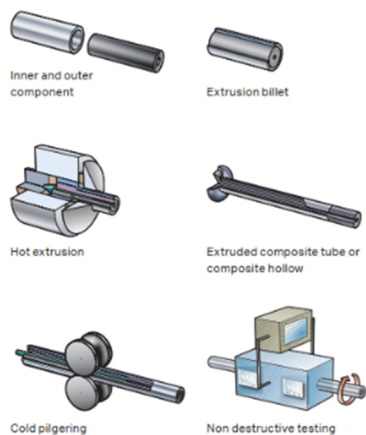
ATEP je prisutan na tržištu Kine od 2025 godine, trenutno u radionici proizvodi komponente za pet kotlovskih postrojenja, dok su još pet kotlova u fazi ugovaranja. Uvjet za pristup tržištu je cerifikacija u skladu sa kineskom regulativom za tlačnu opremu TSG07-2019. Izrada i ispitivanje kotlovskih postrojenja se izvodi prema TSG11-2020 [2], tehničkoj specifikaciji koja se odnosi na sigurnost specijalne opreme pod tlakom. Ova kineska tehnička specifikacija omogućuje izradu kotlovskih komponenti prema normama ili standardima koji se koriste u svijetu npr. ASME, EN, JIS. Prema zahtjevu klijenta, kotlovsko postrojenje se izrađuje prema The American Society of Mechanical Engineers, Boiler Pressure Vessel Code Section I, 2023 edition (ASME BPVC Sec. I). Temeljem koda za konstruiranje, kvalifikacija postupaka zavarivanja se provodi u skladu sa ASME BPVC Sekcija IX, edicija 2023,

odnosno zadnjoj ediciji. Za kvalifikaciju postupaka zavarivanja i zavarivačkog osoblja odgovoran je proizvođač kotlovskog postrojenja, u ovom slučaju ATEP koji je certificiran od The American Society of Mechanical Engineers i nositelj je S i U žiga [3]. Način kvalifikacije sučeonog spoja između kompozitnih cijevi je specificiran u ASME BPVC Sekcija IX edicija 2023, paragraf QW-217 ovisno o tome je li debljina korozijski postojanog sloja (kladiranog sloja) uključena u proračun čvrstoće ili ne. Kako u promatranom slučaju debljina korozijskog postojanog sloja nije uključena u proračun, kvalifikacija postupka zavarivanja može biti provedena prema „Metodi A“ kada je kladirani sloj uključen u proračun, tada navar također treba biti podvrgnut vlačnom testu ili prema „Metodi B“ kada je moguće vlačno ispitati samo nosivi tlačni dio spoja bez navara. Kvalifikacija kompozitnog spoja je provedena prema „Metodi B“.

### **3. OSNOVNI MATERIJALI**

Materijali koji se primjenjuju za izradu tlačnih dijelova odnosno cijevi, specificirani su u proizvodnom kodu ASME BPVC Sekcija I, paragrafu PG-9, odnosno u ASME BPVC Sekciji IIA gdje se navode specifikacije i zahtjevi za izradu i ASME BPVC Sekciji IID gdje su specificirana svojstva materijala, npr. dopuštena naprezanja. Za izradu najopterećenijih dijelova kotla „Chemical recovery boiler“ primjenjuju se kompozitne cijevi. Jednostavan prikaz proizvodnje kompozitnih cijevi pokazan je na Slici 1, a sastoji se od umetanja unutarnje u vanjsku cijev, vruće ekstruzije, hladnog valjanja i ispitivanja. Kompozitne cijevi sastoje se od vanjskog sloja, nehrđajućeg čelika ili nikl legure, metalurški spojenog vrućom ekstruzijom s unutarnjom cijevi koja nosi tlačno opterećenje izrađene od ugljičnog čelika ili niskolegiranog čelika koji se primjenjuju za izradu kotlovskih cijevi u skladu s normom EN12952-2. Za izradu kompozitnih cijevi primjenjuje se nekoliko kvaliteta materijala; neligirani i niskolegirani čelici za unutarnju komponentu i visokolegirani čelici i Ni legure za vanjsku komponentu kompozitne cijevi. Na prijelazu u donjem dijelu ložišta kotla dolazi do spajanja dvije vrste materijala kompozitnih cijevi jer tijekom izgaranja goriva u ložištu kotla nastaje „green liquor“ zelena tekućina koja je vrlo agresivna. Iz tog razloga za ložište kotla za vanjsku komponentu odabiru se legure na bazi nikla, u ovom slučaju legura 825, poznata kao Sanicro 38. Najčešće primjenjivani promjer cijevi je 63,5 mm dok je debljina stijenke 6,53 mm, od čega 1,65 mm je debljina vanjske komponente AISI 304L, odnosno 1,82 mm debljina SAN38 komponente. U Tablici 1 je prikazan kemijski sastav oba tipa kompozitnih cijevi koji su se međusobno zavarivale na projektu realiziranom u ATEP-u.

PRODUCTION ROUTE OF COMPOSITE TUBES



Slika 1. Pojednostavljeni prikaz proizvodnje kompozitnih cijevi [4]

Tabela 1. Kemijski sastav kompozitnih cijevi [5, 6]

Oznake kompozitne cijevi	Šarža	Kemijski sastav									
		C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Ni%	Mo%	Ti%	Cu%
SAN38/3M01 (UNS No. N08825+16Mo3)	568514 (vanjska komponenta SAN38)	0.005	0.19	0.84	0.019	< 0.0005	20.25	38.23	2.53	0.76	1.55
	568856 (unutarnja komponenta 3M01)	0.14	0.31	0.56	0.004	0.006	0.08	0.05	0.28	< 0.0005	0.023
AISI 304L (SA213 TP304L+SA / EN 10216-2 16Mo3)	F323084 (vanjska komponenta AISI304L)	0.015	0.45	1.51	0.026	-	18.22	10.19	-	-	-
	J2L6222 (unutarnja komponenta 16Mo3)	0.18	0.24	0.7	0.011	0.0005	0.03	0.02	0.29	0.0004	0.02

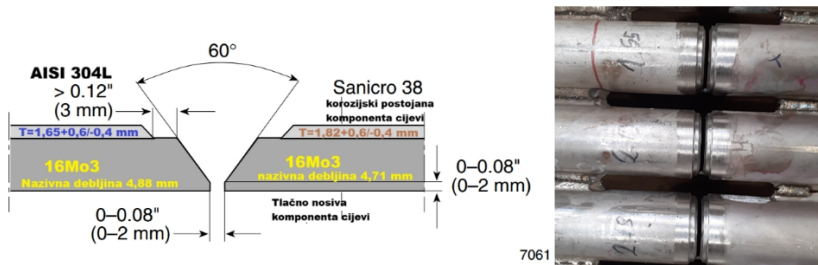
Kompozitne cijevi imaju određene prednosti u usporedbi s ostalim tipovima kotlovskih cijevi [7];

- niži koeficijent toplinskog istezanja, što utječe na smanjenje napetosti tijekom eksploatacije,
- viši koeficijent toplinske vodljivosti, manje radne temperature na površini cijevi,

- manje su sklone nastanku pukotina usljed naprezanja i korozije (Stress Corrosion Cracking), zatim pojavi piting i crvaste korozije na strani vode ili pare, što za rezultat ima sigurnije postrojenje,
- zavarivanje kompozitnih cijevi, započinje zavarivanjem komponente cijevi od ugljičnog čelika koji nosi tlak što osigurava pouzdanost tijekom duge eksploatacije, dobru stabilnost spoja – konstrukcije, šire tolerancije parametara zavarivanja za jednaku kvalitetu zavora, izbjegavanje visokolegiranih spojeva,
- jednostavniji je postupak savijanja jer je unutarnja komponenta cijevi od ugljičnog čelika podržana od vanjske komponente od visokolegiranog čelika ili niklene legure.

#### 4. OSNOVNA PRAVILA ZAVARIVANJA I NAVARIVANJA KOMPOZITNIH CIJEVI

Zavarivanje i ispitivanje sučeljenih zavora ovisi o zahtjevima specificiranim na crtežu. Osnovni zahtjev se odnosi na nosivost zavarenog spoja, odnosno je li nosivost tlaka u cijevi ostvarena samo unutarnjom komponentom ili zajedno unutarnjom i vanjskom komponentom cijevi. Uglavnom dosadašnja praksa pokazuje da je za nosivost tlaka u cijevi zadužena unutarnja komponenta kompozitne cijevi izrađena od ugljičnog ili niskolegiranog čelika, dok je za korozijsku postojanost kompozitne cijevi odgovorna vanjska komponenta. Shodno tome vrlo važnu ulogu za zavarivanje kompozitnih cijevi ima priprema spoja za zavarivanje (Slika 2).



Slika 2. Detalj oblika spoja za sučeljeno zavarivanje kompozitnih cijevi dimenzija  $\varnothing 63,5$  mm x 6,53 mm [7]

Kvalifikacija postupka zavarivanja je provedena prema ASME BPVC Sekciji IX edicija 2023, Artikl II, pri kojoj su se za zavarivanje i navarivanje primjenjivale bitne i nebitne varijable navedene ispod;

- Postupci zavarivanja; TIG (GTAW) za zavarivanje i REL (SMAW) za navarivanje izvedeni su ručnim načinom.
- Priprema spoja je nebitna varijabla prema normi, ali je vrlo važna za korektno zavarivanje i navarivanje kompozitnog sučeonog spoja. Nakon izrade pripreme spoja, provjerava se debljina stijenke cijevi unutarnje komponente na 4 mjesta; 3/6/9/12 sati, koja treba biti jednaka ili veća od

specificirane na crtežu. Posebno je važan dio vanjske komponente cijevi (AISI304 i SAN38) koji se uklanja 3 mm od ivice kosine žlijeba jer tijekom zavarivanja ne smije doći do dodira i miješanja depozita zavara ugljičnog čelika sa visokolegiranim čelikom AISI 304 ili Ni legurom SAN38 (Slika 2). Ta površina se ispituje kako bi se provjerilo je li uklonjena vanjska komponenta, visokolegirani čelik ili Ni legura s unutarnje komponente - ugljičnog čelika kako bi se izbjeglo miješanje tijekom zavarivanja. Razmak u grlu žlijeba ovisi o promjeru dodatnog materijala, položaju zavarivanja, broju međusobno povezanih spojeva, odnosno tvorničkoj praksi i iskustvu tako da može biti veći od 2 mm. Tijekom zavarivanja nije primjenjena podloga ili držač taline.

Dodatni materijal za zavarivanje ima klasifikacijsku oznaku ER70S-A1 prema SFA-5.28, gola puna šipka. Po kemijskom sastavu odgovara unutarnjoj komponenti kompozitne cijevi 16Mo3, također i po mehaničkim svojstvima ispunjava zahtjeve. Tijekom zavarivanja primjenjeni su promjeri dodatnog materijala  $\varnothing 2$  i  $\varnothing 2,4$  mm. Određene su bitne varijable F-No.6 koja se odnosi na grupiranje elektroda i žica s aspekta primjene i zavarljivosti i A-No.2 koja se odnosi na kemijski sastav metala zavara. Nije primjenjivan prašak za povećanje penetracije.

- Položaj zavarivanja je odgovarao položaju koji će se primjenjivati tijekom izvođenja u radionici; 5G

vertikalno zavarivanje prema gore.

- Tijekom zavarivanja nije primjenjeno predgrijavanje, niti toplinska obrada nakon zavarivanja.

- Zaštitni plin je argon; AWS-5.32, klasifikacijske oznake I1, s protokom 8 l/min. Također nije

primjenjen korijeni plin niti prateći plin (trailing gas) kao zaštitni plin.

- Struja zavarivanja je istosmjerna, gorionik na minus polu, kretala se u području od 115 do 140A bez

pulsiranja. Volframova elektroda je promjera  $\varnothing 2,4$  mm, kvalitete WGLa17Zr0,8Y0,8. Zavarivanje je izvedeno jednostrano bez žljebljnja u 3 sloja s njihanjem. Veličina unutarnjeg promjera sapnice je 10 mm. Tijekom i nakon zavarivanja spoj se čistio žičanom četkom bez popuštanja napetosti udaranjem „čekićanjem“.

Navarivanje se smatra specijalnim procesom prema ASME BPVC Sekcija IX. Kod „recovery“ kotlova primjenjuje se za kreiranje zaštitnog korozijski postojanog sloja, tako da je kvalifikacija postupka navarivanja provedena u skladu sa tim zahtjevima. Za navarivanje je primjenjen REL postupak.



Slika 3. Zavareni sučeoni spoj na unutarnjoj komponenti kompozitne cijevi 16Mo3 koja nosi tlak na prednjem zidu ložišta u radionici ATEP-a

Bitne i nebitne varijable za postupak navarivanja korozijski postojanog sloja za REL postupak;

- Debljina navara treba odgovarati minimlanoj debljini vanjske komponente kompozitne cijevi 1,65<sup>-0,4</sup> mm.

- Materijal podloge je unutarnja komponenta kompozitne cijevi, niskolegirani čelik 16Mo3 prema EN 10216-2 kojem je dodjeljen P-No.3 i metal zavara kemijskog sastava A2 (Slika 3).

- Minimalna debljina podloge navarivanja je 3,4 mm koja je specificirana na crtežu kao minimalna debljina stijenke cijevi unutarnje komponente nakon pripreme spoja za zavarivanje.

- A-No. broj se specificira na temelju kemijskog sastava deponiranog metala zavara ili kemijskog sastava metala zavara specificiranog u specifikaciji za dodatni materijal i odgovara A-No. 9 prema tablici QW-442. Klasifikacijska oznaka dodatnog materijala je E383-17 prema SFA-5.4, a primjenjeni promjer elektrode tijekom navarivanja je bitan i treba se definirati ovisno o vještini zavarivača.

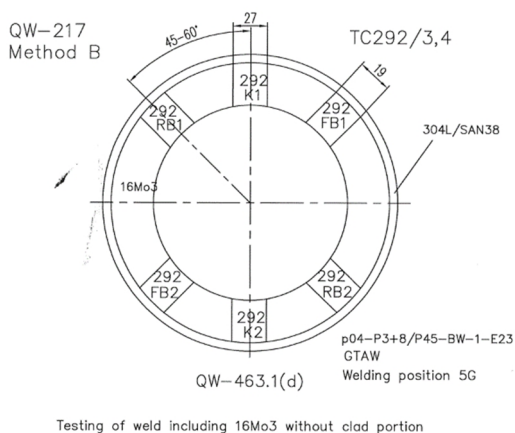
- Položaj zavarivanja je 5G, navarivanje se izvodi vertikalno prema gore. Predgrijavanje se nije primjenjivalo, minimalna temperatura je 10°C, a maksimalna međuprolazna temperatura je iznosila 120°C. Toplinska obrada nakon navarivanja nije se primjenjivala.

- Za navarivanje primjenjena je istosmjerna struja, elektroda na plus polu i kretala se u području od 55 do 90A. Tijekom izrade u radionici maksimalna struja je bitna varijabla i ograničena je s maksimalnom strujom navarivanja zabilježenom tijekom kvalifikacije jer utječe na dubinu penetracije i nosivost unutarnje komponente.

- Navarivanje je izvedeno u jednom sloju, tehnikom ravne gusjenice ili s minimalnim njihanjem elektrode na očetkanu podlogu. Bitan je i redoslijed polaganja gusjenica navara kako bi se dobio kvalitetan navareni sloj bez grešaka između gusjenica.

## 5. ZAHTJEVANA ISPITIVANJA I REZULTATI

Kako je već navedeno u Poglavlju 2, kvalifikacija postupka navarivanja je provedena prema Metodi B paragraf QW-217. Ova metoda je odabarana jer je projektant na crtežu definirao oblik spoja kojim se zahtjeva potpuno zavarivanje unutarnje komponente kompozitne cijevi koja nosi tlak, pri čemu je definirao minimalnu debljinu nosivog dijela. Temeljem toga su provedene kvalifikacije postupaka zavarivanja i navarivanja, i definirane su metode i opsezi ispitivanja. Ispitivanje zavarenog sučeonog spoja na unutarnjoj komponenti kompozitne cijevi (EN10216-2 16Mo3; P-No.3) koja nosi tlak je provedeno prema Slici 4, a uključuju sljedeća ispitivanja: ispitivanje kidanjem dvije palice (K1, K2), ispitivanje savijanjem dva lica (FB1, FB2) i dva korijena (RB1 i RB2). Prije toga zavari su ispitani radiografskom metodom u opsegu 100% što nije zahtjev norme.



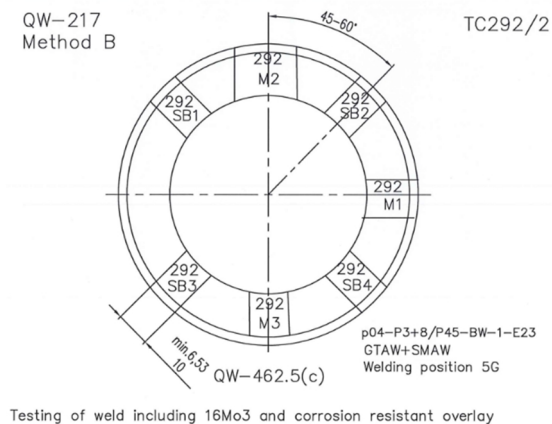
Slika 4. Ispitivanje sučeljenog spoja unutarnje komponente kompozitne cijevi prema QW-463.1(d)

Rezultati ispitivanja su prihvatljivi, zabilježene vrijednosti vlačne čvrstoće su  $509 \text{ N/mm}^2$  i  $512 \text{ N/mm}^2$  što je veće od minimalne zahtjevane vrijednosti  $450 \text{ N/mm}^2$  definirane u Tablici QW/QB-422, a lom je nastupio u osnovnom materijalu [8]. Palice za savijanje su pripravljene prema QW-462 a) bilješka b), a savijanje je provedeno prema QW-162 i QW-466.2. Maksimalni radijus savijanja iznosi četiri debljine stijenke. Kriterij prihvatljivost ne dopušta otvorene diskontinuitete veće od 3 mm u zoni zavara i zone utjecaja topline na ispušenoj strani palice osim na rubovima palice prema QW-163 (Slika 5).



Slika 5. Ispitivanje zavarenog spoja savijanjem na lice i korijen unutarnje komponente kompozitne cijevi (16Mo3)

Navareni sloj se ispituje prema zahtjevima iz Tablice QW-453, što uključuje ispitivanje površine navarenog spoja penetranskom metodom i četiri bočna ispitivanja (SB1 – SB4) (Slika 6). Dodatno su ispitana tri makro uzoraka (M), kako bi se odredili; preostala nosiva debljina stijenke unutarnje komponente 16Mo3 nakon navarivanja; dubina penetracije navara u unutarnju komponentu i minimalna kvalificirana debljina navarenog sloja.

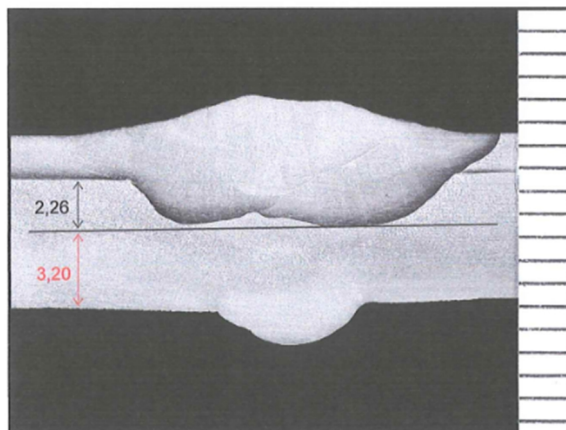


Slika 6. Ispitivanje navarenog sloja uključujući vanjske komponente kompozitne cijevi AISI 304 i SAN38

Vizualnim ispitivanjem makro uzoraka poprečnog presjeka zavarenog spoja i zone utjecaje topline je utvrđeno potpuno vezivanje između gusjenica zavara, zatim između zavara i osnovnog materijala i korozijski postojanog sloja – navara, također nisu otkrivene greške tipa pukotina što upućuje da je zavareni spoj prihvatljiv prema zahtjevima QW-183 (Slika 7).

Nakon navarivanja izmjerena je minimalna debljina stijenke na unutarnjoj nosivoj komponenti kompozitne cijevi (16Mo3) i iznosi 3,20 mm, što je veće

od minimalno zahtjevano 2,9 mm, definirana proračunom i specificirana na crtežu (Slika 7). Preostala nosiva debljina stijenke cijevi nakon navarivanja prvenstveno ovisi od debljine stijenke cijevi prije navarivanja koja je reducirana tijekom obrade detalja spoja i iznosila je nakon obrade 3,5 mm.

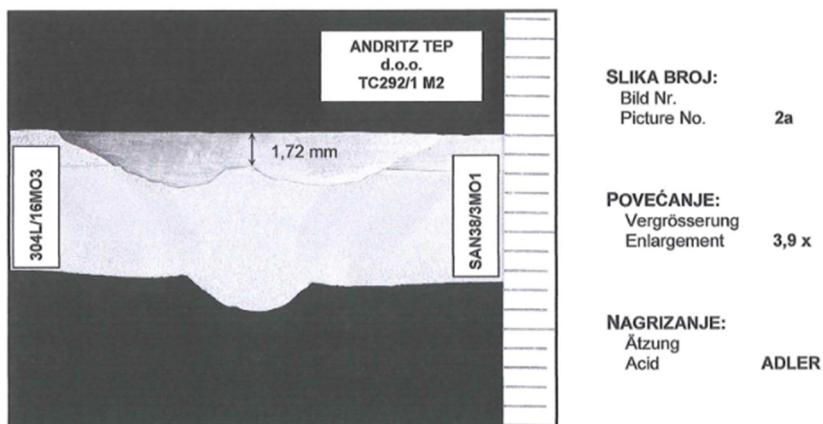


Slika 7. Makro presjek sučeljenog zavara i navara na spoju kompozitnih cijevi sa izmjeranim tlačno nosivim dijelom 3,20 mm i dubinom navara 2,26 mm ispod linije spajanja vanjske i unutarnje komponente kompozitne cijevi [9]

Dubina penetracije korozivski postojanog sloja u tlačno nosivu unutarnju komponentu kompozitne cijevi tijekom navarivanja također ovisi o preostaloj debljini stijenke unutarnje komponente nakon obrade pripreme spoja. Kako je izmjerena debljina stijenke unutarnje komponente prije navarivanja bila 3,5 mm može se izračunati da je dubina penetracije tijekom navarivanja iznosila:  $3,5 - 3,2 = 0,3$  mm. Ovaj podatak je bitan kako bi se dobila spoznaja o dubini penetracije ovisno o parametrima navarivanja i ispunio zahtjev sa crteža u pogledu održavanja minimalno zahtjevano nosive debljine stijenke unutarnje komponente kompozitne cijevi.

Kvalifikacijom postupka navarivanja potrebno je odrediti minimalnu debljinu navarenog sloja. Da bi definirali tu vrijednost obrušeno je lice navara i poravnato s korozivski postojanim slojem kompozitne cijevi. Najmanja izmjerena kvalificirana debljina stijenke je 1,72 mm utvrđena na jednom od tri makro uzorka zahtjevana normom (Slika 8). Kada je u uputi za zavarivanje (WPS) propisan kemijski sastav navara, i ispitani kemijski sastav navara odgovara zahtjevu, tada izmjerena debljina ispitivanog navara postaje minimalna kvalificirana debljina navara. Kemijski sastav navara bio je u skladu sa kemijskim sastavom dodatnog materijala zbog niskog mješanja navara i zavara. Očitane vrijednosti utvrđene spektroanalizatorom Hitachi XMET 8000 su iznosile 26,9 do 27,3% Cr; 29,9 do 31,35% Ni; 3,42 do 3,58% Mo i 36,05 do 37,15% Fe. Na projektu nije bilo posebnih zahtjeva za

kemijski sastav navara već se zahtjev odnosio na dodatni materijal koji se primjenjuje za navarivanje.



Slika 8. Makro presjek obrušenog navara sučeljenog zavora između kompozitnih cijevi sa izmjerenom minimalnom debljinom navara [10]

## 6. ZAKLJUČAK

Zavarivanje i navarivanje sučeonog spoja između kompozitnih cijevi obuhvaća niz složenih i zahtjevnih operacija koje se primjenjuju tijekom izrade ložišta „chemical recovery“ kotlova. Operacije pripreme spoja, zavarivanja, ispitivanja, navarivanja i ispitivanja nakon navarivanja neophodne su za kvalitetno i kontrolirano zavarivanje kompozitnih cijevi, a definiraju se tijekom kvalifikacije postupaka zavarivanja i navarivanja. Postoji veliki broj zavarivačkih varijabli koje je potrebno specificirati, uključujući međufaznu kontrolu, potrebna ispitivanja i opremu. Također, iskustvo na izradi ovakvih složenih komponenti, zatim kvalificirano i vješto osoblje su neophodni za izradu kvalitetnog zavarenog spoja, odnosno za izradu sigurnih i pouzdanih komponenti ložišta kotla. Grupacija ANDRITZ primjenjuje posebne procedure temeljene na više decenijskom iskustvu tijekom projektiranja, izrade i kontrole kotlovskih postrojenja u cilju proizvodnje postrojenja koja su sigurna za rad i okoliš, s dosljednom kvalitetom papirnih proizvoda, visokim prinosom i niskim operativnim troškovima.

## LITERATURA

- [1] [www.andritz.com/pulp-and-paper-en/pulp-production/kraft-pulp-overview](http://www.andritz.com/pulp-and-paper-en/pulp-production/kraft-pulp-overview)
- [2] TSG 11-2020, „Regulation on safety technology for boiler“, The State Administration for Market Regulation of the People's Republic of China, 2020-10-29

- [3] Tihomir Marsenić, Dean Lesan, Iva Deanović, Božo Despotović, Specificities of welding procedure qualification on a test coupon with non-standard; dimensions, joint preparation and steel grades according to ASME BPVC Section IX edition 2023; Međunarodno naučno-stručno savjetovanje ZAVARIVANJE SPAJA „ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE 2025.“, Mostar, 22. do 24.10.2025.
- [4] Technical specification Sanicro 67\*/4L7 composite tubes for black liquor recovery and other boiler applications, S-12114-PS-ENG.10.2016, Sandvik
- [5] Inspection Certificate No. 300052875-1-1432747 Rev01, Alleima tube AB, 2025, Sandviken, Sweden
- [6] Inspection Certificate No. 0YYE4158A, Nippon Steel Corporation, 2024, Amagasaki, Japan
- [7] Technical specification Sandvik Sanicro® 38/4L7 \*Composite tube for Black Liquor Recovery and other boilers; S-12126-ENG, Jan 2003, Cancels June 1996. Printed in Sweden. Sandvikens Tryckeri AB
- [8] Josip Kušnjer, Mirella Sekulić-Mustapić, Izvješće o mehaničkim svojstvima, Dokument broj: M-138/25 Đuro Đaković Centar za istraživanje i razvoj, 2025, Slavonski Brod, R. Hrvatska
- [9] Mirella Sekulić-Mustapić, Josip Kušnjer, Izvješće o ispitivanju, Dokument broj: MG-168/25-2, Đuro Đaković Centar za istraživanje i razvoj, 2025, Slavonski Brod, R. Hrvatska
- [10] Mirella Sekulić-Mustapić, Josip Kušnjer, Izvješće o ispitivanju, Dokument broj: MG-168/25-1, Đuro Đaković Centar za istraživanje i razvoj, 2025, Slavonski Brod, R. Hrvatska



**Aleksandra Krstevska<sup>1,\*</sup>, Filip Zdraveski<sup>1</sup>, Maja B. Poser<sup>1</sup>,  
Martin Petreski<sup>1</sup>**

## **ZAVARIVAČKA RJEŠENJA ZA MONTAŽNE, REPARATURNE I NAVARENE SPOJEVE**

**Rezime:** U radu su predstavljene različite primjere iz prakse, tri rješenja zavarivanja za različite montažne, reparaturne i navarene spojeve. Prvi slučaj se odnosi na montažni spoj primjenjen u pregrijaču pare. Izveden je heterogeni zavareni spoj između kolektorskih cijevi napravljenih od beinitnog feritno-perlitnog čelika tipa 12HMF i cijevnog sistema napravljenog od martenzitnog čelika tipa X10CrMoVNb9-1. Prilikom izrade spoja korišćen je prelazni komad (stucer) od feritnog čelika 10CrMo9-10 kako bi se izbjegla termička obrada tokom montaže, tj. prilikom izrade direktnog spoja. Na ovaj način omogućeno je tehnološki pojednostavljeno i ekonomski povoljnije rješenje.

Drugi primer predstavlja popravku oštećene konstrukcije strijele bagera, oštećene klizištem tokom eksploatacije uglja. Razmatran je popravni zavar sa posebnom legurom nikla, Castolin EutecTrode Xuper NucleoTec 2222, koja formira austenitnu strukturu, sa visokim i zadovoljavajućim mehaničkim svojstvima i ne zahtijeva termičku obradu posle zavarivanja (Post-Weld Heat Treatment - PWHT). Rješenje je primijenjeno kao hitna popravka kako bi se redovno isporučivao uglj termoelektrani do dolaska rezervnih djelova.

Treći primer se odnosi na izvođenje međuslojnog i zaštitnog zavara na zubu bagera izloženom intenzivnom abrazivnom habanju tokom eksploatacije. Iako manganski čelik pokazuje deformaciono ojačavanje, njegova otpornost na habanje pri radu u pijesku je ograničena. Korišćenjem tvrdih legura za navarivanje postiže se značajno poboljšanje otpornosti na habanje. Prikazan je primer navarivanje legurom 33Cr, sa ciljem povećanja vijeka trajanja komponente.

**Ključne riječi:** montažne zavareni spojevi, reparaturni zavareni spojevi, navareni spojevi, pregrijač pare, zubi bagera

<sup>1</sup> University in Skopje, Faculty of Mechanical Engineering, Skopje, Republic of North Macedonia

\* Corresponding author, mail: aleksandra.krstevska@mf.edu.mk

## WELDING SOLUTIONS FOR ON-SITE, REPAIR AND COATING WELDS

**Abstract:** *The paper presents different practical examples, three welding solutions for different assembly, repair, and coating joints. The first case refers to an assembly joint applied in a steam superheater. A dissimilar metal weld was performed between header pipes made of bainitic ferritic–pearlitic steel type 12HMF and a piping system made of martensitic steel type X10CrMoVNb9-1. During fabrication, a transition piece (nozzle) made of ferritic steel 10CrMo9-10 was used in order to avoid post-weld heat treatment during installation when in the case of a direct joint. This approach enabled a technologically simplified and economically favorable solution.*

*The second example addresses the repair of a damaged excavator boom structure, which was damaged during a landslide in coal excavation. A repair weld was performed using a special nickel alloy, Castolin EutecTrode Xuper NucleoTec 2222, which forms an austenitic structure with high mechanical properties and does not require post-weld heat treatment (PWHT). The solution was implemented as an emergency repair in order to ensure continuous coal supply to the thermal power plant until spare parts arrived.*

*The third example refers to the deposition of an intermediate layer and a protective hardfacing coating on an excavator teeth exposed to intensive abrasive wear during excavation. Although manganese steel has the property of deformation strengthening, it has limited wear resistance when operating in sand. By applying hardfacing alloys, a significant improvement in wear resistance can be achieved. An example of hardfacing coating with a 33% Cr alloy is presented, with the aim of increasing the service life of the component.*

**Keywords:** on-site welding joints, repair welding joints, coating joints, steam superheater, bucket teeth

### 1. INTRODUCTION

Welding in energy systems, such as steam superheaters, often requires dissimilar metal welds between high temperature steels, especially when martensitic steels are used and post-weld heat treatment (PWHT) is needed. The transition piece enables metallurgical compatibility avoids PWHT making the process simple and reduce costs. These solutions allow high-temperature operation and reduce the risks like Type IV cracking in the heat-affected zone [1, 2]

Repair welding is used to fix in-service defects and maintain the integrity of components that have developed defects during service such as cracks, corrosion damage or wear. Instead of replacing the entire part this method allows for localized material deposition, reducing costs and downtime. This

method demands control of welding parameters to ensure that repaired weld meets the required mechanical and microstructural properties [3, 4]. Machines that perform excavation are exposed to abrasion which often leads to component failure, and this has a significant economic effect on the process[5]. As most exposed components to abrasive wear, excavator teeth are made of elements such as white cast iron, steel casting and hard alloys [6] that not always have enough anti-wear properties. The selected material should ensure a balanced combination of sufficient toughness and hardness to withstand abrasive environments. When the teeth are protected by hard-facing layers, operational stresses may initiate cracks that propagate through the deposited layer thickness or cause interfacial delamination between the coating and the base material, eventually leading to failure. In addition to mechanical properties, weldability is an important parameter when selecting the base material, as it enables effective application of protective coatings in areas exposed to abrasion [7]. Steel containing Cr, V and Nb can be welded to the steel surface as solution for excavator bucket teeth wear protection. Iron-based hardfacing consumables are subject of this case which are used for abrasive applications [8].

## 2. CASE STUDY 1

The first case is on-site dissimilar metal weld in a steam superheater system. The welds are between the collector pipes made of bainitic ferrite-perlite type 12HMF and pipe system made of martensitic steel X10CrMoVNb9-1 (P91). Direct weld of these materials on-site is a technological challenge due to the need for PWHT, which is often difficult to perform on-site. An overview of the base materials is given in Table 1.

Table 1. Base material

Element	Dimensions/material/standard
Pipe system	Ø 32x4 mm, X10CrMoVNb9-1, EN 10216-2
Transition piece (connector)	Ø 32x4 mm, 10CrMo9-10, EN 10216-2
Collector pipes	Ø 36x6 mm, 12X1MF, TY-14-3R-55-2001

To avoid PWHT during assembly, a solution was applied with a transition piece (connector) made of ferrite steel 10CrMo9-10. This material enables a metallurgically more compatible transition between base materials and reduces the risk of undesirable microstructures in the weld zone.

With the WPS the parameters of welding, preheating temperature and welding process are selected (Table 2). Special attention is paid to temperature control during welding to prevent the formation of cold cracks and ensure a stable microstructure in the heat-affected zone.

The application of the transition piece in this case enabled process optimization, without PWHT on-site, which presents a significant advantage

from the aspect of economy and time of implementation of works. On Figure 1 is shown PWHT in workshop between X10CrMoVNb9-1 and 10CrMo9-10, on Figure 2 is presented on-site direct weld between the transition piece and collector pipes.

Table 2. WPS for DMW in steam superheater system

Passes	Welding process	Filler material	Current (A)	Polarity	Preheating	PWHT
<b>WPS for X10CrMoVNb9-1 and 10CrMo9-10</b>						
Root pass	141 (TIG)	Bohler DMV 83-IG (Ø 2.4 mm)	80-110	DC/-	≥200 - 250°C	740 ± 10°C / 30 min
Fill passes	141 (TIG)	Bohler DMV 83-IG (Ø 2.4 mm)	90-120	DC/-	≥200 - 250°C	740 ± 10°C / 30 min
<b>WPS for X10CrMoVNb9-1 and X10CrMoVNb9-1</b>						
Root pass	141 (TIG)	Bohler DMV 83-IG (Ø 2.4 mm)	80-110	DC/-	≥200 - 250°C	740 - 770°C / 30 min
Fill passes	141 (TIG)	Bohler DMV 83-IG (Ø 2.4 mm)	90-120	DC/-	≥200 - 250°C	740 - 770°C / 30 min
<b>WPS for 10CrMo9-10 and 12X1MF</b>						
Root pass	141 (TIG)	Bohler DMV 83-IG (Ø 2.4 mm)	80-110	DC/-	/	/
Fill passes	141 (TIG)	Bohler DMV 83-IG (Ø2.4 mm)	90-120	DC/-	/	/



Figure 1. PWHT of X10CrMoVNb9-1 and 10CrMo9-10



Figure 2. On-site welds (10CrMo9-10 and 12X1MF)

### 3. CASE STUDY 2

Subject of this case is urgent repair of an old shaft of a wheel for excavation which is made of steel 26 NiCrMoV 14 5. The part has abrasive damage and the possibility was considered to perform repair welding with appropriate technology until the procurement of spare parts has been considered. For urgent repair, buttering layer was created using austenitic nickel electrode, type Castolin NucleoTec 2222, and the weld metal with an electrode with an austenitic structure type EDUR EZ-400 TN with a similar hardness as the shaft. The result is a layer that is resistant to abrasion and is suitable for the required purpose.

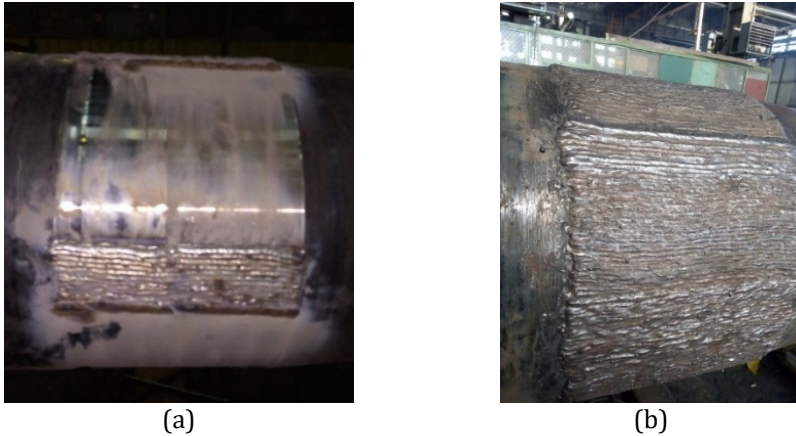


Figure 3. Repair welding of KU 300 excavator wheel shaft; a - Machined surface in the zone of abrasive damage, b - Completed weld

### 4. CASE STUDY 3

In this case, the use of hard-facing alloys for excavator teeth coating is presented. On Figure 4 is shown schematic diagram of hard-facing, performed in minimum two steps. The first layer is directly applied over the metallic base, with high percent of dilution and present basic bonding interlayer. With the second layer the dilution is avoided, especially with the carbon, and this layer resists abrasion. A hardfacing electrode, type OK 84.78, with 33% of Cr is used for coating of high tensile steel 22Mn6. The welding parameters are given in Table 3. The dilution rate is with three layered multi-pass welding, with 2 mm thick layer. After the hardfacing process a field test was done. The wear rate and wear rate indices (WRI) are shown in Table 4.

Table 3. Welding parameters of case study 3

<b>Welding parameters</b>	<b>Hardfacing electrode OK 84.78</b>
Electrode diameter (mm)	3.2
Acr Voltage (V)	26
Welding current (A)	128
Welding speed (mm/min)	90-110
Preheating for 1 hour (°C)	180
Deposition rate (kg/h)	2.4

The wear damage starts from the end of the leading edge and moving inwards, towards the base of the tooth were very little or no wear can be observed. The hard-faced excavator tooth, coated with 33Cr alloy shows almost no wear damage. This is due to the high abrasive wear resistance of the chromium carbides in the coated layers.

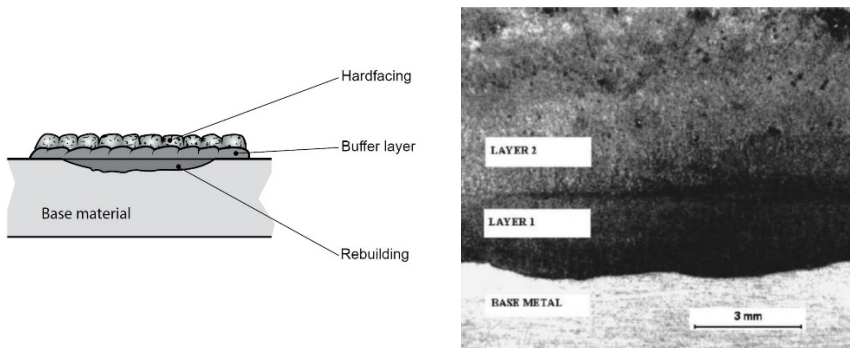


Figure 4. Schematic diagram and micrograph of application of hard-facing alloys in two layers

Table 4. Wear rates and wear rate indices (WRI)

<b>Hard-facing electrode</b>	<b>Wear rate (gr/hr)</b>	<b>WRI</b>
Uncoated tooth	1.900	1
OK 87.78	0.110	17.27

## 5. CONCLUSION

The paper presents review of selected welding technologies for solutions on-site, repair and coating welds for components operating under demanding service conditions. The use of transition piece proved to be an effective approach for achieving metallurgical compatibility without PWHT during on-site installations. The results are cost reduction and technological process optimization while maintaining structural integrity.

The repair welding of the excavator shaft using a nickel-based electrode demonstrated that emergency repair strategies can successfully restore functionality and extend service life without requiring PWHT, which is particularly important in time-critical industrial operations. The hard-facing

of excavator teeth with high-chromium alloys confirmed that coating technique significantly enhance wear resistance in abrasive environments.

## REFERENCES

- [1] S. Rathore et al., "Advanced ultra super critical power plants: role of buttering layer", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 134, no. 11–12, pp. 5021–5064, Oct. 2024, doi: 10.1007/s00170-024-14469-9.
- [2] A. Kulkarni, D. K. Dwivedi, and M. Vasudevan, "Dissimilar metal welding of P91 steel-AISI 316L SS with Incoloy 800 and Inconel 600 interlayers by using activated TIG welding process and its effect on the microstructure and mechanical properties", *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 274, p. 116280, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2019.116280.
- [3] Z. Odanović, M. Arsić, V. Grabulov, and M. Djurdjević, "Investigation of the Repair Welding Technology Using Ni Base Electrode", *Adv. Mat. Res.*, vol. 814, pp. 25–32, Sep. 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.814.25.
- [4] D. Arsić et al., "Weldability Assessment of Various Steels by Hard-Facing", *Materials*, vol. 15, no. 9, p. 3082, Apr. 2022, doi: 10.3390/ma15093082.
- [5] J. E. Fernández, R. Vijande, R. Tucho, J. Rodríguez, and A. Martín, "Materials selection to excavator teeth in mining industry", *Wear*, vol. 250, no. 1–12, pp. 11–18, Oct. 2001, doi: 10.1016/S0043-1648(01)00624-X.
- [6] S. Singla, A. S. Kang, J. S. Grewal, and G. S. Cheema, "Wear Behavior of Weld Overlays on Excavator Bucket Teeth", *Procedia Materials Science*, vol. 5, pp. 256–266, 2014, doi: 10.1016/j.mspro.2014.07.265.
- [7] R. Ismail, Z. Muhammad, J. Jamari, and A. Bayuseno, "Designing and wear testing of excavator bucket teeth for the need of Indonesian mining", Jan. 2020.
- [8] D.-G. Ahn, "Hardfacing technologies for improvement of wear characteristics of hot working tools: A Review", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 14, no. 7, pp. 1271–1283, Jul. 2013, doi: 10.1007/s12541-013-0174-z.





Društvo za  
Zavarivanje  
Crne Gore

1. Konferencija sa međunarodnim učešćem

## „TEHNOLOGIJE SPAJANJA MATERIJALA“

14 - 16. maj 2026. godine, Bečići, Crna Gora



**Aleksandar Sedmak<sup>1,\*</sup>, Milan Miladinov<sup>1</sup>, Milan Ostojin<sup>1</sup>,  
Nenad Milošević<sup>1</sup>, Simon Sedmak<sup>2</sup>**

### PROCENA INTEGRITA KOLENA NAPOJNOG CEVOVODA U HE PERUĆICA

**Rezime:** Redovnim monitoringom cevovoda u hidroelektrani „Perućica“ u Crnoj Gori u 2024. godini otkrivene su neprihvatljive greške u kolenima napojnog cevovoda bloka 6 i 7. U donjem kolenu „A strana“, otkrivena je prslina dužine 500 mm i dubine 20 mm. Prema raspoloživim podacima faktor intenziteta napona je izračunat na uprošćen i konzervativan način. Dobijeni količnik  $KI/KIc=0.46$  je pokazao da ne postoji opasnost od krtog loma.

**Ključne riječi:** koleno napojnog cevovoda, prslina, GS 45, integritet konstrukcije

### STRUCTURAL INTEGRITY ASSESSMENT OF INLET PIPELINE ELBOW IN HPP PERUĆICA

**Abstract:** Hydro power plant “Perućica” in Montenegro has been monitored in 2024 by NDT (Ultrasonic testing – UT, and magnetic particles - MT) with a focus on defects found in inlet elbows of units 6 and 7. At the lower elbow “A-side” a crack with length of 500 mm and depth up to 20 mm was detected. According to the available data the stress intensity factor was calculated in simplified and conservative way. The ratio  $KI/KIc=0.46$ , proved that there is no danger of brittle fracture.

**Keywords:** pipeline elbow, crack, GS 45, structural integrity

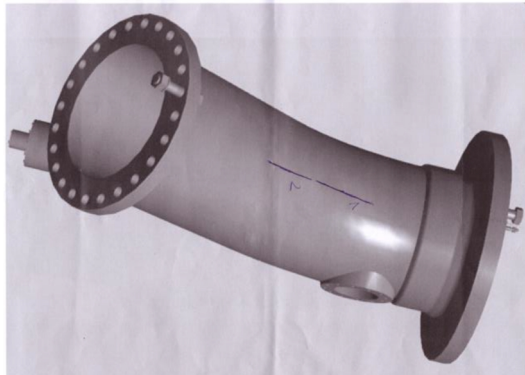
<sup>1</sup> Mašinski Fakultet, Univerzitet u Beograd, Republika Srbija

<sup>2</sup> Inovacioni Centar Mašinskog faculteta, Beograd, Republika Srbija

\* Korespondentni autor, mail: aleksandarsedmak@gmail.com

## 1. UVOD

Redovnim monitoringom cevovoda u hidroelektrani „Perućica“ u Crnoj Gori u 2024. godini otkrivene su neprihvatljive greške u kolenima napojnog cevovoda bloka 6 i 7. U donjem kolenu „A strana“, otkrivena je prslina dužine 500 mm i dubine 20 mm (Slika 1).



Slika 1. Prslina 500 x 20 mm na donjem kolenu

Imajući u vidu značaj HE i eventualne posledice njene havarije, integritet kolena napojnog cevovoda je analiziran primenom parametara mehanike loma da bi se procenio rizik od dalje upotrebe, odnosno potreba za sanacijom, [1]. Osnovni podaci za analizu su:

- Materijal - liveni čelik GS45, napon tečenja 245 MPa, zatezna čvrstoća 480 MPa, izduženje 29%, žilavost loma 1580 MPa√mm [2];
- Opterećenje: radni pritisak 5.9 MPa, ispitni pritisak 8.4 MPa;
- Geometrija: radijus R=400 mm, debljina t=42-52 mm;
- Prslina: dužina 500 mm, dubina 20 mm.

## 2. PROCENA INTEGRITETA I RIZIKA

Procena integriteta je dana na osnovu parametara linearno elastične mehanike loma (faktor intenziteta napona) u kombinaciji sa naponskim stanjem pomoću tzv. dijagrama analize loma (FAD) [2]. Faktor intenziteta napona je izračunat na uprošćen i konzervativan način za prslinu dubine  $a=20$  mm i dužine  $2c=500$  mm:

$$K_I = Y(a/t, c/a)(pR/t)\sqrt{\pi a} = 1.76(52.4)\sqrt{20\pi} = 731 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}},$$

gde je  $Y(a/t, c/a)$  određeno za  $a/t=20/42=0.47$  i  $c/a=25$ .

Količnik  $K_I/K_{Ic}=0.46$ , u tom slučaju pokazuje da je opasnost od krtog loma nivoa 46%.

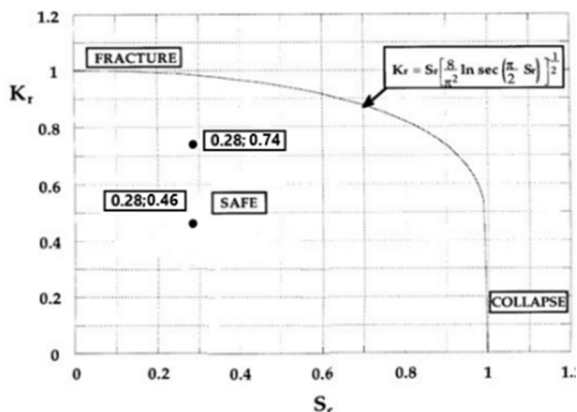
Količnik napona u poprečnom preseku prsline i kritičnog napona iznosi:

$$S_R = \sigma_R / \sigma_F = 52.4 \times 1.91 / 362.5 = 0.28,$$

gde je  $\sigma_F$  poluzbir napona tečenja i zatezne čvrstoće.

Prema tome koordinate radne tačke u FAD su (0.28; 0.46) (Slika 2), a opasnost od loma iznosi 0.47.

Ako se pretpostavilo da se prslina dubine 20 mm prostire celom dužinom kolena (ivična prslina), radna tačka bi imala koordinate (0.28; 0.74), pa bi opasnost od loma bila 0.75.



Slika 2. FAD za površinsku i ivičnu prslinu

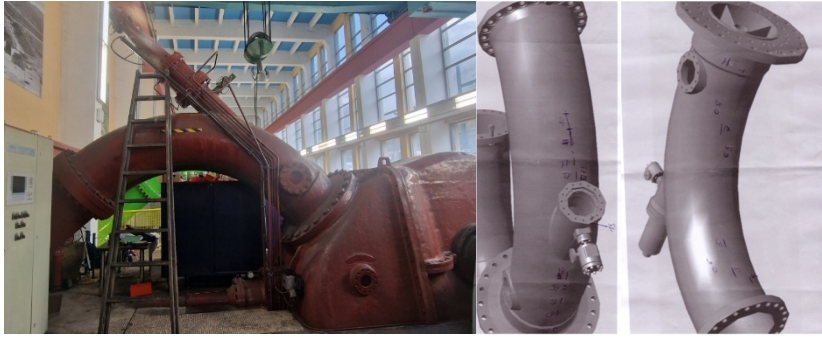
Imajući u vidu posledicu eventualne havarije, koja se ocenjuje kao najveća moguća (nivo 5), procena rizika je data na Slici 3. Prikazani rezultati ukazuju na moguć bezbedan dalji rad, ali je ipak doneta odluka da se koleno sanira žlebljnjem pslina i navarivanjem, kao što je prikazano u nastavku rada.

		Posledica					nivo
		1	2	3	4	5	
Verovatnoća	≤0.2						Vrlo nizak
	0.2-0.4						Nizak
	0.4-0.6				Povr. prslina 20x500 mm		Srednji
	0.6-0.8				Ivična prsl. 20 mm		Visok
	0.8-1.0						Vrlo visok

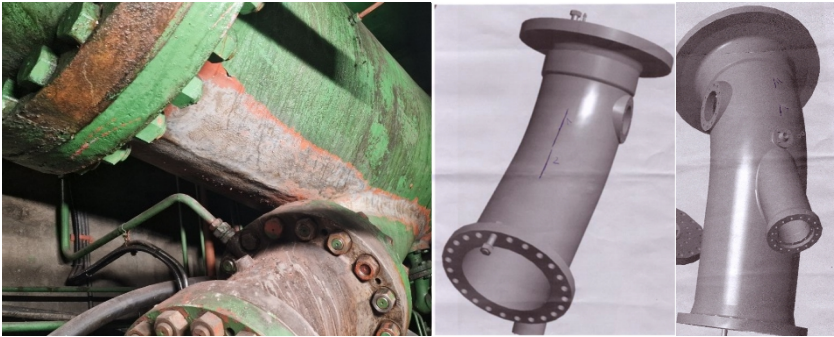
Slika 3. Matrica rizika za površinsku i ivičnu prslinu

### 3. ISPITIVANJE BEZ RAZARANJA

Na Slici 4 su prikazana kolena gornje i donje cevi 7A i 7B, sa ucrtanim greškama tipa prsline.



Gornja cev 7A



Donja cev 7A



Gornja cev 7B

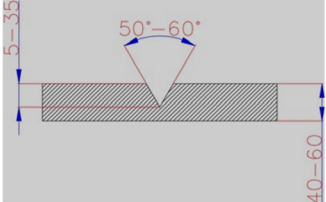
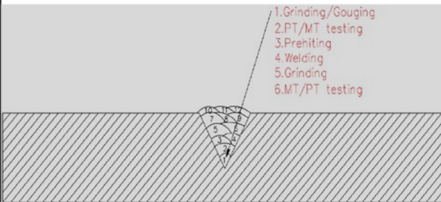


Donja cev 7B

Slika 4. Gronja i donja cev 7A i 7B sa ucrtanim greškama tipa prslina

# PRILOZI

## Tehnologija zavarivanja

		<b>UPUTSTVO ZA ZAVARIVANJE</b> WELDING PROCEDURE SPECIFICATION (WPS for Repair)		Reg.ozn.dok./Doc.reg.No	
				Broj/No:	
Naručilac/ Customer:		Voith Hydro GmbH & Co. KG	Crtež br./Drawing No.		
Projektat/ Project:		PERUĆICA	Proizvodni br./Job No.		
Objekt/ Object:		LOWER ELBOW PIPE	Standard		ISO 15609-1
Postupak zavarivanja broj Welding procedure No.ISO 4063		135		Osnovni materijal Base metals	
Atest postupka broj (WPAR) Supporting WPAR No.ISO 15614-1		ZAG 1600003/2	Oznaka/Mark	Grupa/Group ISO TR 15608	Debljina/Prečnik Thickness/Diameter
Ime zavarivača Welder name		-	S235JR	1.2	40-60 mm
Proces zavarivanja Welding process		Poluautomatsko/semi automatic			
Položaj zavarivanja Welding position ISO 6947		PA		Vrsta spoja/Groov type	BW
Način žljebljenja Method of back gouging		Žljebljenje+ručna brusilica/ Gauging + Grinder	Simbol vrste spoja/ Sign of groove design		“√”
Izvedba spoja/ Groove design			Redosled zavarivanja/ Welding order		
					

### Parametri zavarivanja /Welding parameters:

Sloj br. Pass No	Proces Process	Prečnik DM Size FM	Jačina struje Current (A)	Napon Voltage (V)	Vrsta/Polaritet Type and pole	Protok gasa Flow rate (l/min)	Brzina zavarivanja Travel speed (cm/min)	Brzina žice Wire speed (m/min)	Unos toplote Heat input (KJ/cm)
1	135	Ø1.2	230-250	22-26	DC+	12-15	20-24	-	-
2-N	135	Ø1.2	230-290	26-28	DC+	12-15	28-35	-	-

<b>Dodatni i pomoćni materijal</b> Filler and auxiliaries metal		<b>Temperatura predgrevanja</b> Preheat temperature		60-100 °C	
<b>Naziv i proizvođač</b> Designation and manufacturer		LINCOLN ELECTRIC Ultra Mag SG3		<b>Max.meduslojna temperatura</b> Max.interpass temperature	
<b>Klasifikacija</b> Classification		EN ISO 17632: T 46 3 M M 2 H5		<b>Toplotna obrada</b> Heat treatment	
<b>Tip obloge</b> Coat type		-		<b>Tehnika rada</b> Welding technique	
<b>Prašak za zavarivanje</b> Flux composition		-		<b>Max.širina sloja</b> Max.layer width	
<b>Prečnik i vrsta W-žice</b> Size and type W-wire		-		<b>Početno i meduslojno čišćenje</b> Cleaning initial and interpass	
<b>Sušenje dodatnog materijala</b> Drying FM		-		Pneumatski čistač/ Pneumatic cleaner	
<b>Zaštitni gas/</b> Shielding gas		M21-ENISO14175		<b>Kontrola/Inspection:</b> VT 100%, MT 100% EN ISO 5817 C	
				<b>Ostalo/ Other:</b> If repair is required a second time, the preheating temperature must be 20 degrees higher	

## Opseg kvalifikacije za 160003/2

Item	Code/ Standard reference	RANGE OF APPROVAL per qualification Code/Standard - BS EN ISO 15614:2004+A2:2012	
1	8.3.1	Parent metal grouping	1.2 and 1.1.combinations (t1 and t2 being both 1.2)
2	8.3.2.1	Material thickness and weld deposit thickness (mm)	Parent metal t1= 20– 80 ; Parent metal t2= 20– 80 ; Deposit: 20– 80
3	8.3.2.2	Material and Throat thickness "a" of fillet welds (mm)	Material thickness t1 ≥ 5 ; Material thickness t2 ≥ 5 ; a = All
4	8.3.2.3	Diameter of pipes and branch connections	Pipe outside diameter > 500 mm if fixed Pipe outside diameter > 150 mm if rotated in PA and PC
5	8.3.3	Angle of branch connections	None
6	8.4.1	Welding process	Same as welded single process 135 used for root, filling and cupping runs , partly mechanised welding
7	8.4.2	Welding positions	All except PG and J-L045 without impact. In case impact properties are considered/required only PF.
8	8.4.3	Type of joint/weld	Full and partial penetration butt and fillet welds on pipe and plate, multi run, ss and bs, without and with backing
9	8.4.4	Filler material, designation	Same or higher strength grading as recommended in the appropriate EN
10	8.4.5	Filler material, make	Same designation and nominal chemical composition according appropriate EN
11	8.4.6	Filler material size	Any size providing qualified heat input is achieved
12	8.4.7	Current type	DC (+)
13	8.4.8	Heat input	0,69 - 2,57 kJ/mm
14	8.4.9	Preheat temperature	Min. 95°C
15	8.4.10	Interpass temperature	Max. 187°C
16	8.4.11	Post-heating for H <sub>2</sub> release	Without. May be added
17	8.4.12	Post-weld heat treatment	Without
18	8.4.13	Initial heat treatment	Not applicable
19	8.5.2.1	Shielding gas	M21 (EN14175:08). CO <sub>2</sub> max 10% above 18%.
20	8.5.2.2.	Wire system	Single wire only
21	8.5.2.3.	Type of transfer	Spray and globular transfer

### LITERATURA

- [1] Sedmak, A., et al, Risk analysis of pipeline inlet elbows in hydro power plant Perućica based on fracture mechanics and structural integrity approach, IRAS 2026, Wroclaw, book of abstracts.
- [2] Golubović, T., Sedmak, A., Spasojević Brkić, V., Kirin, S., Rakonjac, I., Novel risk based assessment of pressure vessels integrity, Tehnicki Vjesnik, 25(3), pp. 803–807, 2018.



Društvo za  
Zavarivanje  
Crne Gore

1. Konferencija sa međunarodnim učešćem

## „TEHNOLOGIJE SPAJANJA MATERIJALA“

14 - 16. maj 2026. godine, Bečići, Crna Gora



MAŠINSKI  
FAKULTET  
PODGORICA

**Mersida Manjgo<sup>1,\*</sup>, Sabahudin Muharemović<sup>1</sup>, Mirza Manjgo<sup>2</sup>,  
Jasmin Halilović<sup>3</sup>**

### **DOPRINOS U OCJENI PONAŠANJA KONSTRUKCIJE U PRISUSTVU GREŠKE TIPRA PRSLINE**

**Rezime:** Pored strogih zahtjeva za kvalitetetom zavarenih spojeva, u praksi i dalje dolazi do otkaza i havarija. Glavni uzroci su greške koje nastaju tokom izrade zavarenih konstrukcija ili se javljaju kao površinske prsline tokom eksploatacije. Za bezbjednu upotrebu zavarenih konstrukcija potrebno je odrediti parametre mehanike loma koji omogućavaju procjenu njihovog integriteta u prisustvu prsline. U radu je prikazana primjena mehanike loma u procjeni integriteta konstrukcija opisana faktorom intenziteta napona  $K_{JIC}$  i brzina rasta zamorne prsline  $da/dN$ .

**Ključne riječi:** faktor intenziteta napona, rast prsline, prag zamora.

### **CONTRIBUTION TO THE ASSESSMENT OF STRUCTURAL BEHAVIOR IN THE PRESENCE OF CRACK-TYPE DEFECTS**

**Abstract:** Despite stringent quality requirements for welded joints, failures and accidents still occur in practice. The main causes are defects introduced during the fabrication of welded structures or those that appear as surface cracks during service. For the safe use of welded structures, it is necessary to determine fracture mechanics parameters that enable the assessment of their structural integrity in the presence of cracks. This paper presents the application of fracture mechanics in evaluating structural integrity, described by the stress intensity factor  $K_{JIC}$  and the fatigue crack growth rate  $da/dN$ .

**Keywords:** stress intensity factor, crack growth, fatigue threshold.

<sup>1</sup> Univerzitet Džemal Bijedić Mostar, Mašinski fakultet, Mostar, BiH

<sup>2</sup> Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, Maribor, Republika Slovenija

<sup>3</sup> Univerzitet Tuzla, Mašinski fakultet, Tuzla, BiH

\* Korespondentni autor, mail: mersida.manjgo@unmo.ba

## 1. UVOD

Integritet zavarenih spojeva predstavlja veoma značajan faktor pri eksploataciji zavarenih konstrukcija, usljed njihove heterogenosti i sklonosti ka pojavi i rastu prslina, kao posljedica samog postupka zavarivanja.

Prisustvo grešaka u zavarenim spojevima i odsustvo zahtjevanih mehaničko-tehnoloških osobina, može poremetiti eksploatacione karakteristike zavarene konstrukcije. Prsline nastaju u različitim etapama izrade zavarenih konstrukcija i jedan su od osnovnih uzroka sniženja eksploatacione sigurnosti proizvoda [1, 2].

Primjena mehanike loma je zasnovana na određivanju odgovarajućih parametara (faktora intenziteta napona,  $J$ -Integrala i otvaranja vrha prsline) na osnovu kojih se određuje preostali radni vijek konstrukcije. Ovi parametri su vezani za prisustvo prslina, koje su u slučaju zavarenih spojeva neizbježne, u manjoj ili većoj mjeri. U zavisnosti od svog položaja i opterećenja koja djeluju u njihovoj okolini, ove prsline mogu da krenu da rastu i pri dostizanju određene dužine, dovedu do otkaza i loma konstrukcije. Stoga je veoma bitno pratiti njihovo ponašanje tokom eksploatacije, kao i spriječavanje njihovog nastanka i/ili njihovo zadžavanje u dozvoljenim granicama, koje zavise prije svega od uslova eksploatacije [3, 4].

## 2. EKSPERIMENT

### 2.1. Materijal

Za eksperimentalna ispitivanja primjenjen je čelik NIOMOL 490K, napona tečenja minimalno 490 MPa i garantovanom prelaznom temperaturom krtosti na  $-60^{\circ}\text{C}$ . Proizveden je u željezari „SIJ Acroni d.o.o.“ Jesenice, Slovenija. Hemijski sastav i mehanička svojstva ispitivane šarže čelika su prikazana u Tabeli 1 i Tabeli 2.

Tabela 1. Hemijski sastav ispitivane šarže čelika NIOMOL 490K [5]

NIOMOL 490K; Šarža: 238287							
Element	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr
mas. %	0,10	0,41	0,57	0,008	0,002	0,042	0,53

Tabela 2. Mehanička svojstva ispitivanog čelika NIOMOL 490K [5]

Čelik	Pravac	Napon tečenja $R_{p0.2}$ (MPa)	Zatezna čvrstoća $R_m$ (MPa)	Izduženje $A$ (%)	Energija udara (J)
NIOMOL 490K	L-T	576	694	28,1	242
	T-L	571	699	22,8	245

Za zavarivanje predstavljenog čelika primjenjena je MAG tehnologija zavarivanja uz korištenje VAC 60 Ni dodatnog materijala (žice za

zavarivanje), proizvođača „SIJ Acroni d.o.o.“ Jesenice, Slovenija. Hemijski sastav dodatnog materijala je predstavljen u Tabeli 3, dok su mehanička svojstva dodatnog materijala predstavljena u Tabeli 4.

Tabela 3. Hemijski sastav dodatnog materijala [6]

Dodatni materijal: VAC 60 Ni						
Element	C	Si	Mn	Ni	S	P
mas.%	0,08	0,80	1,50	1,10	< 0,025	< 0,025

Tabela 4. Mehanička svojstva dodatnog materijala [6]

Dodatni materijal	Napon tečenja $R_{p0.2}$ (MPa)	Zatezna čvrstoća $R_m$ (MPa)	Izduženje $A$ (%)	Energija udara -40°C (J)
VAC 60 Ni	440 - 510	560 - 630	22 - 30	> 47

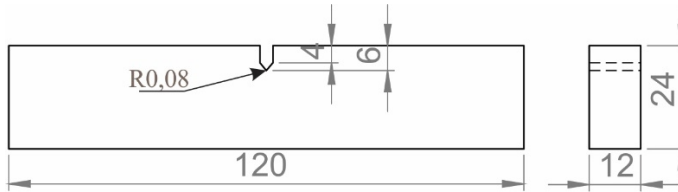
Priprema zavarenog spoja bila je sučeona sa pravilnim simetričnim X - žlijebom. Parametri zavarivanja za MAG postupak prikazani su u Tabeli 5.

Tabela 5. Parametri zavarivanja

Osnovni materijal	Dodatni materijal	Srednji napon (V)	Srednja jačina struje (A)	Brzina zavarivanja (cm/min)	Unos toplote (kJ/cm)
NIOMOL 490 K	VAC 60 Ni	28	300	32	15 - 17

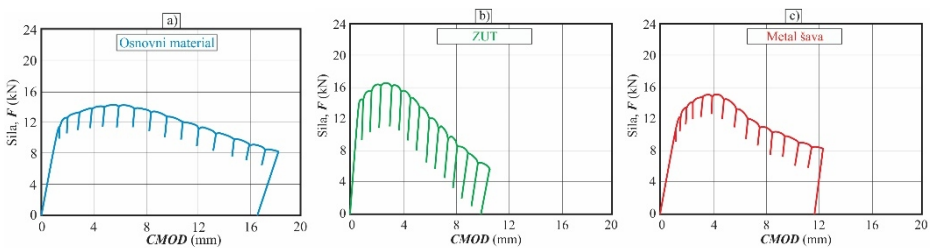
## 2.2. Eksperimentalno određivanje žilavosti loma

U periodu razvoja postupaka za određivanje žilavosti loma najpogodnije analize za karakterizaciju otpornosti materijala prema nestabilnom rastu prsline bile su one bazirane na linearno-elastičnoj mehanici loma. Iako se znalo da se većina strukturnih materijala pri lomu ne ponaša potpuno elastično, smatralo se da je plastična zona na vrhu prsline dovoljno ograničena da i male epruvete mogu biti korišćene za opisivanje pojave nestabilnog rasta prsline kod velikih komponenti. Iz tih razloga se morala propisati standardna procedura za određivanje žilavosti loma  $K_{JIC}$  u laboratorijskim uslovima, analogno postupcima za dobijanje mehaničkih karakteristika [7]. Na osnovu navedenih postavki uveden je koncept elasto-plastične mehanike loma, koji omogućava realnije opisivanje ponašanja materijala u uslovima značajnih plastičnih deformacija u zoni vrha prsline. Ovaj pristup utemeljen je na ASTM E1820 standardu [8], kojom se definiše metodologija za određivanje lomne žilavosti materijala izražene preko parametra  $K_{JIC}$ . Ispitivanje je sprovedeno na uzorcima za savijanje u tri tačke, tzv. SENB (Single Edge Notched Bend) uzorcima, koji su standardizovani za ovu vrstu analize. Geometrija korištenog uzorka prikazana je na Slici 1. Za eksperimentalna ispitivanja pripremljena su po tri uzoraka iz osnovnog materijala (OM), iz zone uticaja toplote (ZUT) i iz metala šava (MŠ).



Slika 1. Geometrija SENB uzorka

U skladu sa procedurom definisanom standardom ASTM E1820, ispitivanje je započeto formiranjem zamorne oštre prsline. Dužina inicijalne prsline  $a_0$  dovedena je u propisani opseg  $0,45W < a_0 < 0,55W$ , gdje  $W$  predstavlja visinu uzorka. Na taj način obezbijeđeni su uslovi za validno određivanje lomne žilavosti prema zahtjevima standarda. Proces zamaranja realizovan je na visokofrekventnom pulzatoru Amsler, čime je postignuto stabilno i kontrolisano napredovanje prsline do željene dužine. Nakon formiranja zamorne prsline, za dalju analizu primijenjena je metoda popuštanja (*“unloading compliance method”*), takođe definisana u okviru navedenog standarda. Dobijeni dijagrami popuštanja, odnosno zavisnost sile od otvaranja usta prsline ( $F-CMOD$ ), za sve posmatrane zone zavarenog spoja (osnovni materijal, zona uticaja topline i metal šava) prikazani su na Slici 2. Ovi dijagrami predstavljaju osnovu za dalju evaluaciju parametara elasto-plastične mehanike loma.



Slika 2. Dijagram F-CMOD; a) osnovni materijal, b) ZUT, c) metal šava

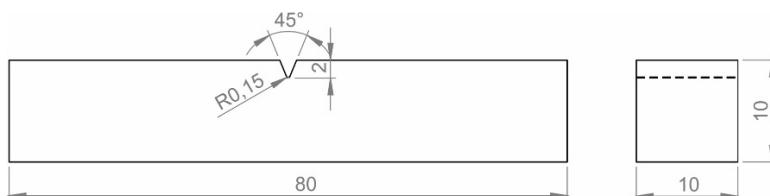
Nakon sprovedene faze popuštanja, uzorci su podvrgnuti dodatnom zamaranja primjenom opterećenja u iznosu od približno polovine maksimalno ostvarene sile. Ovim postupkom omogućeno je propagiranje prsline do konačnog loma.

### 2.3. Brzina rasta zamorne prsline

U uslovima promjenljivog opterećenja, na mjestima koncentracije napona dolazi do inicijacije i rasta prsline nakon određenog broja ciklusa, ukoliko je prekoračen prag zamora  $\Delta K_{th}$ . S obzirom na to da konstrukcija može bezbjedno funkcionisati sve dok prslina ne dostigne kritičnu veličinu, analiza brzine njenog rasta predstavlja ključni parameter za procjenu preostalog

vijeka trajanja [9]. Standard ASTM E647 [10] definiše metodologiju za određivanje brzine rasta zamorne prsline  $da/dN$  i odgovarajućeg opsega faktora intenziteta napona  $\Delta K$ , uz uslov da je brzina rasta veća od  $10^{-8}$  m/ciklus i da je opterećenje konstantne amplitude.

Ispitivanja su izvedena na uzorcima, sa gemoetrijom predstavljenom na Slici 3, metodom savijanja u tri tačke, na rezonantnom visokofrekventnom pulzatoru Cracktronic, uz kontrolu sile. Praćenje rasta prsline vršeno je pomoću mjernih folija RMF A-5 i uređaja Fractomat, zasnovanog na metodi promjene električnog otpora, koji linearno zavisi od dužine prsline. Eksperiment je proveden na po jednom uzoraku iz svake zone zavarenog spoja.



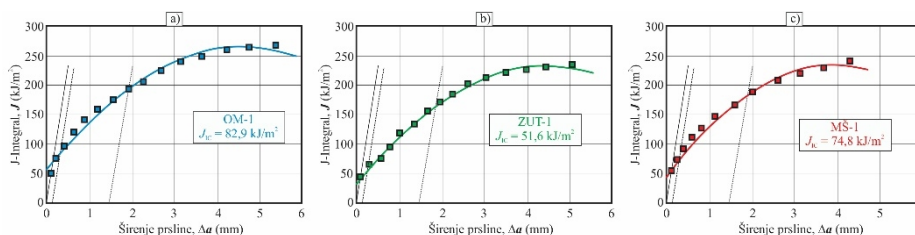
Slika 3. Geometrija uzorka za ispitivanje brzine rasta zamorne prsline

### 3. REZULTATI

#### 3.1. Rezultati lomne žilavosti

Kao rezultat ispitivanja lomne žilavosti dobija se otpornostna kriva  $J-\Delta a$ , koja opisuje otpornost materijala na stabilno širenje prsline. Vrijednost kritičnog  $J$ -integrala određuje se na presjecištu krive otpornosti i linije koja odgovara stabilnom porastu prsline od 0,2 mm. Na osnovu tako dobijene vrijednosti vrši se proračun kritičnog faktora intenziteta napona  $K_{JIC}$ , koji predstavlja mjeru lomne žilavosti materijala.

Otpornostne krive za sva ispitivana područja zavarenog spoja prikazane su na Slici 4, dok su odgovarajuće vrijednosti parametara mehanike loma sistematizovane u Tabeli 6.



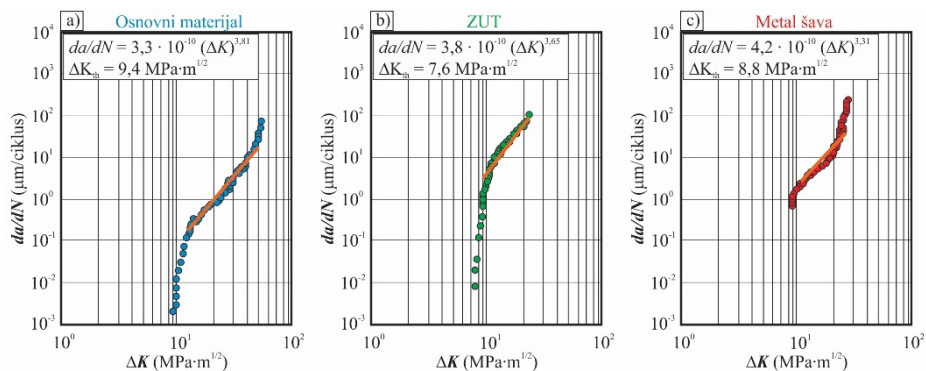
Slika 4. Otpornosne krive  $J-\Delta a$ ; a) osnovni material, b) ZUT, c) metal šava

Tabela 6. Vrijednosti parametara mehanike loma

Uzorak	Kritični J-Integral $J_{IC}$ (kJ/m <sup>2</sup> )	Kritični faktor intenziteta napona $K_{JIC}$ (MPa·m <sup>1/2</sup> )
OM-1	82,9	138,5
OM-2	79,3	135,3
OM-3	80,0	135,9
<b>Prosjeak</b>	<b>80,7</b>	<b>136,5</b>
ZUT-1	51,6	107,6
ZUT-2	53,9	110,7
ZUT-3	57,8	114,7
<b>Prosjeak</b>	<b>54,4</b>	<b>111,0</b>
MŠ-1	74,8	128,4
MŠ-2	71,7	127,1
MŠ-3	69,5	125,1
<b>Prosjeak</b>	<b>72,0</b>	<b>126,9</b>

### 3.2. Rezultati brzine rasta zamorne prsline

Kao rezultat procjene preostalog vijeka konstrukcije koristi se Parisova kriva, koja prikazuje zavisnost brzine rasta prsline od opsega faktora intenziteta napona pri cikličnom opterećenju, predstavljenu u logaritamskom dijagramu ( $\log da/dN - \log \Delta K$ ). Ova zavisnost formalizovana je Parisovim zakonom, kojim se opisuje stabilna faza napredovanja prsline, odnosno linearni dio Parisove krive. Eksperimentalni rezultati, zajedno sa Parisovim zakonom, prikazani su dijagramski na Slici 5, dok su prag širenja prsline ( $\Delta K_{th}$ ), kao i vrijednosti Parisove konstante ( $C$ ) i eksponenta ( $m$ ), prikazani u tabeli 7 za sve zone zavarenog spoja.



Slika 5. Rezultati brzine rasta zamorne prsline; a) osnovni materijal, b) ZUT, c) metal šava

Tabela 7. Vrijednosti praga za širenje  
prsline i Parisove konstante i eksponenta

Zona zavarenog spoja	Prag za širenje prsline $\Delta K_{th}$ (MPa·m <sup>1/2</sup> )	C (-)	m (-)
Osnovni materijal	9,4	3,3	3,81
ZUT	7,6	3,8	3,65
Metal šava	8,8	4,2	3,31

#### 4. ZAKLJUČCI

Na osnovu provedenih ispitivanja može se zaključiti da zavareni spoj čelika NIOMOL 490K, izveden MAG postupkom uz primjenu dodatnog materijala VAC 60Ni, pokazuje zadovoljavajuće, ali ipak nešto slabije karakteristike u odnosu na osnovni materijal. Dobijene vrijednosti lomne žilavosti ukazuju da osnovni materijal (136,5 MPa·m<sup>1/2</sup>) zadržava viši nivo otpornosti na inicijaciju i propagaciju prsline u odnosu na zonu uticaja topline (111,0 MPa·m<sup>1/2</sup>), dok metal šava (126,9 MPa·m<sup>1/2</sup>) zadržava vrijednost približno jednaku osnovnom materijalu.

Analiza praga širenja prsline pokazuje da metal šava ima nešto povoljnije vrijednosti (8,8 MPa·m<sup>1/2</sup>) u odnosu na ZUT (7,6 MPa·m<sup>1/2</sup>), što ukazuje na veću otpornost na inicijalno širenje zamorne prsline u toj zoni.

Ukupno posmatrano sa aspekta integriteta konstrukcije, osnovni materijal pokazuje najpovoljniju otpornosti na lom, što potvrđuje da proces zavarivanja, uprkos pažljivo odabranim parametrima i dodatnom materijalu, neminovno dovodi do određenog smanjenja lomno mehaničkih performansi u spoju.

Ovakvi rezultati ukazuju na značaj pravilnog izbora tehnologije zavarivanja i kontrole parametara procesa, posebno kada se radi o konstrukcijama izloženim cikličnim opterećenjima kao što su konstrukcije od pomenutog čelika koji ima široku primjenu u nosivim i energetski zahtjevnim konstrukcijama. Smanjenje otpornosti u zavarenim zonama može predstavljati potencijalno kritična mjesta za inicijaciju i rast prsline, te je u projektovanju potrebno primijeniti odgovarajuće sigurnosne faktore i eventualne dodatne mjere kontrole kvaliteta.

#### LITERATURA

- [1] Adedeji, A. A., Olatunji, O. O., Akinlabi, E. T., Structural Integrity of Welded Joints in Naval Ship Systems: Failure Mechanisms and Predictive Modelling Approach, Engineering Failure Analysis, 165 (2025), pp. 107–120.
- [2] Sedmak, A., Grbović, A., Gubeljak, N., Sedmak, S., Budimir, N., Numerical Simulation of Fatigue Crack Growth in Welded Structures, Materials, 17 (2024), 22, pp. 5531.
- [3] Kostić, N., Čamagić, I., Sedmak, A., Jovanović, M., Burzić, Z., Golubović, T.,

- Sedmak, S., Martić, I., Fracture and Fatigue Crack Growth Behaviour of A516 Gr 60 Steel Welded Joints, *Metals*, 14 (2024), 12, pp. 1447.
- [4] Islamović, F., Bajramović, E., Islamović-Čavkić, B., Bajramović, E., Experimental Testing and Comparative Analysis of Fracture Mechanics Parameters of Welded Sheet Steel Joints of New and Old Material, 15th International Scientific Conference on Manufacturing Engineering, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2025.
- [5] Acroni Jesenice, NIOMOL 490K – High Strength Structural Steel, Technical Data Sheet, Jesenice, Slovenija.
- [6] Acroni Jesenice, VAC 60 Welding Wire, Technical Data Sheet – Solid Copper Coated Welding Wire for MAG Welding, Jesenice, Slovenija.
- [7] Rice, J. R., A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks, *Journal of Applied Mechanics*, 35 (1968), 2, pp. 379–386.
- [8] ASTM E1820:23, Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2023.
- [9] Zhang, P., Wang, X., Liu, Y., Crack Propagation Analysis and Fatigue Life Assessment of High-Strength Steel Components, *Materials*, 16, 2023.
- [10] ASTM E647:22, Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2022.



Društvo za  
Zavarivanje  
Crne Gore

1. Konferencija sa međunarodnim učešćem

## „TEHNOLOGIJE SPAJANJA MATERIJALA“

14 - 16. maj 2026. godine, Bečići, Crna Gora



MAŠINSKI  
FAKULTET  
PODGORICA

**Aleksija Đurić<sup>1,\*</sup>, Srđan Samardžić<sup>1</sup>, Dragan Milčić<sup>2</sup>,  
Damajn Klobčar<sup>3</sup>, Miodrag Milčić<sup>2</sup>, Biljana Marković<sup>1</sup>**

### **ANALIZA SPOJEVA KOMPOZITNIH MATERIJALA POD USLOVIMA UDARNIH OPTEREĆENJA**

**Rezime:** Spojevi kompozitnih materijala predstavljaju kritične elemente savremenih lakih konstrukcija izloženih dinamičkim i udarnim opterećenjima. Njihovo ponašanje pod dejstvom udara karakterišu složeni mehanizmi oštećenja. Ovaj rad predstavlja pregled dosadašnjih istraživanja o mehaničkom ponašanju spojeva kompozitnih materijala pod uslovima udarnih opterećenja. Analizirani su eksperimentalni pristupi, numerički modeli zasnovani na metodi konačnih elemenata, kao i kriterijumi loma. Posebna pažnja posvećena je uticaju tipa spoja, geometrije i brzine udara na pouzdanost konstrukcije. Cilj rada je sistematizacija postojećih saznanja, identifikacija ključnih faktora koji utiču na performanse spojeva, kao i ukazivanje na pravce budućih istraživanja u oblasti projektovanja spojeva kod kompozitnih konstrukcija pod dejstvom udarnih opterećenja.

**Ključne riječi:** spojevi, kompozitni materijali, udarno opterećenje

### **ANALYSIS OF COMPOSITE MATERIAL JOINTS UNDER IMPACT LOADING CONDITIONS**

**Abstract:** Joints of composite materials represent critical elements of modern light constructions exposed to dynamic and impact loads. Complex damage mechanisms characterize their behavior under impact. This paper presents an overview of previous research on the mechanical behavior of composite material joints under impact loads. Experimental approaches, numerical

<sup>1</sup> Univerzitet u Istočnom Sarajevu, Mašinski fakultet, Istočno Sarajevo, Bosna i Hercegovina

<sup>2</sup> Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet, Niš, Republika Srbija

<sup>3</sup> Univerzitet u Ljubljani, Mašinski fakultet, Ljubljana, Republika Slovenija

\* Korespondentni autor, mail: aleksija.djuric@ues.rs.ba

models based on the finite element method, and fracture criteria were analyzed. Particular attention is paid to the influence of the joint type, geometry, and impact speed on the reliability of the structure. The aim of the work is the systematization of existing knowledge, the identification of key factors that influence the performance of joints, as well as indicating the directions of future research in the field of designing joints in composite structures under impact loads.

**Keywords:** joints, composite materials, impact load

## 1. UVOD

Kompozitni materijali predstavljaju kombinaciju najmanje dva odvojena materijala sa jasno definisanim poprečnim presjekom između konstituenata, koji su hemijski različiti i nerastvorljivi jedan u drugom [1]. Ovi materijali kombinuju ojačanja (vlakna) i matricu, dajući strukturalna svojstva koja su značajno bolja u odnosu na svaku pojedinačnu komponentu [1, 2]. Kompozitni materijali se koriste u brojnim oblastima mašingradnje, a posebno u vazduhoplovnoj i automobilskoj industriji prvenstveno zbog visokog odnosa čvrstoće i težine. Efikasnost cjelokupne strukture često je ograničena upravo spojevima, koji predstavljaju najslabije tačke konstrukcije posebno pri udarnim opterećenjima [3, 4]. Ovaj pregledni rad analizira mehaničko ponašanje, mehanizme otkazivanja i napredne tehnike spajanja kompozitnih materijala sa posebnim fokusom na uslove udarnog opterećenja (*impact*). Tehnologije spajanja kompozitnih materijala prikazane su na Slici 1.



Slika 1. Tehnologije spajanja kompozitnih materijala

## 2. ZAVARIVANJE TERMOPLASTIČNIH KOMPOZITNIH MATERIJALA

Spajanje zavarivanjem kompozitnih materijala moguće je na više načina, zavisno od tipa kompozita, a neke od tehnologija su [5]: (1) Elektrootporno zavarivanje (RW) - koristi grijač u obliku žice (elektrootpornik) postavljen između elemenata kroz koji se propušta struja radi zagrijavanja; (2) Ultrazvučno zavarivanje (UW) - koristi mehaničke vibracije visoke

frekvencije za stvaranje toplote usljed trenja na kontaktnoj površini; (3) Indukciono zavarivanje (IW) - zavarivanje se odvija postavljanjem grijača na pripremljenu površinu s tim da se struja dobija indukcijom magnetnog polja dobijenog od indukcionog kalema, itd.

Istraživanja pokazuju da su elektrotopno zavareni termoplastični spojevi (npr. PPS ojačan karbonskim vlaknima) otporniji na oštećenja od udara u poređenju sa zalijepljenim spojevima [3]. Takođe ultrazvučno zavareni spojevi pokazuju 10–12% duži životni vijek pri zamoru od zalijepljenih spojeva [6].

### 3. MEHANIČKO SPAJANJE KOMPOZITNIH MATERIJALA

Mehanički spojevi predstavljaju jednu od primarnih metoda spajanja komponenti materijala, pored lijepljenja i hibridnih pristupa. Ova metoda spajanja posebno je zastupljena u vazduhoplovnoj i automobilskoj industriji zbog prednosti kao što su jednostavnost montaže i demontaže, jednostavna kontrola kvaliteta, lako održavanje i robusnost. Za spajanje kompozitnih materijala najčešće se koriste zavrtnjevi i zakovice [7,8]. Studija autora *Arkuszyńska A.* i *Roškowicz M.* [9] pokazuje da je za spajanje kompozitnih materijala povoljnije koristiti zavrtnjeve u odnosu na zakovice jer imaju veću nosivost spoja, te bolju otpornost na udarna opterećenja.

Kada je riječ o spajanju kompozitnih materijala pomoću zavrtnjeva, moguća su tri osnovna moda otkaza, tj. tri načina loma [7]:

- Gnječenje (*Bearing failure*) Nastaje usljed pritisnih napona koje stablo zavrtnja vrši na zid rupe;
- Neto-zatezanje (*Net-tension*): Nagli lom koji se javlja u kritičnom poprečnom presjeku kroz rupu, obično kada je širina ploče mala u odnosu na prečnik rupe za zavrtnj;
- Cijepanje (*Shear-out*): Nastaje usljed visokih smičućih napona između rupe i ivice elementa ako je to rastojanje nedovoljno.

Pored navedenog *Andrew Vander Klok* u svojoj studiji [10] navodi da izduženje i izvijanje rupe su ključni načini loma pod dinamičkim uslovima opterećenja na pritisak, dok kidanje, zatezanje i lom cijepanjem predstavljaju dominantne načine loma pod dinamičkim uslovima opterećenja na zatezanje.

Zbog osjetljivosti kompozita na koncentraciju napona oko rupa, što je posebno značajno kod udarnih i dinamičkih opterećenja razvijene su različite metode ojačanja kao što su [7, 10]: (1) metalni umetci (*bonded inserts* - lijepljenje metalnih prstenova u rupu zbog bolje raspodjele napona); (2) Lokalna hibridizacija (*Titanium foil* - zamjena pojedinačnih slojeva kompozita titanijumskim folijama u zoni spoja što može značajno povećati čvrstoću spoja na pritisak); (3) Oblikovane rupe (*Moulded holes* - umjesto bušenja, vlakna se tokom proizvodnje slažu oko čivija, čime se zadržava kontinuitet vlakana i povećava nosivost); (4) Z-pinning i šivenje (*Stitching* -

uvođenje ojačanja kroz debljinu laminata što sprečava širenje delaminacije oko rupe).

#### **4. ADHEZIONO SPAJANJE – LIJEPLJENJE KOMPOZITNIH MATERIJALA**

Lijepljenje omogućava ravnomjerniju raspodjelu napona i smanjenje težine konstrukcije jer nema dodatnih materijala i metalnih elemenata. Najveća prednost lijepljenja je što nema oštećenja vlakana bušenjem i omogućava spajanje veoma tankih komponenata. Sa druge strane, pri lijepljenju kompozitnih materijala zahtijeva se detaljna priprema površine, a ljepila su osjetljiva na visoke temperature i vlažnosti. Na mehanička svojstva zalijepljenog spoja mogu uticati brojni faktori, uključujući vrstu ljepila, svojstva prijanjanja, geometriju spoja, pripremu površine i vrstu opterećenja. Konkretno, udarna opterećenja imaju značajan uticaj na mehanički odziv zalijepljenih spojeva [11].

Autori *Ali Gursel* i *Huseyin Murat Cekirge* u svojoj studiji objavljenoj 2019. godine [12] daju načine ispitivanja zalijepljenih spojeva pri udarnim opterećenjima. Navode da karakterizacija zaljepljivih spojeva izloženih udarnom opterećenju može se podijeliti na dva načina, i to određivanje intrinzičnih svojstava ljepila i procjenu ukupnog ponašanja cijelog zalijepljivog spoja. Za određivanje zatezne čvrstoće, krutosti, te smicajne čvrstoće ljepila koriste se, između ostalog, univerzalne mašine za ispitivanje zatezanjem, mašine za ispitivanje udarnim utezima, uređaji za ispitivanje udarnim klatnom i uređaji sa podijeljenom Hopkinsonovom šipkom za pritisak. Za određivanje žilavosti ljepila mogu se koristiti test dvostruke konzolne grede (DCB) za mod I, testovi savijanja sa zarezima na krajevima za mod II i uređaj sa zateznom Hopkinsonovom šipkom sa posebno dizajniranim uzorcima za mod I+II. Testovi za procjenu ukupnog ponašanja cijelog zalijepljenog spoja mogu se podijeliti u tri grupe, tj. testovi niske brzine udara, srednje brzine udara i visoke brzine udara.

Autor *A. Đurić* i *ostali* [13] istraživali su mehaničko ponašanje jednostruko preklopljenih zaljepljivih spojeva napravljenih od CFRP laminata lijepljenih epoksidnim lijepilom SikaPower®-1277 pri različitim brzinama ispitivanja. Ispitivanja na zatezanje-smicanje provedeno je pri brzinama ispitivanja od 2, 20, 100 i 500 mm/min i pokazala su jasan uticaj brzine ispitivanja na performanse spoja. Najveće opterećenje loma zabilježeno je pri brzini od 100 mm/min, dok se najniža vrijednost dogodila pri 2 mm/min.

#### **5. HIBRIDNI SPOJEVI**

Hibridni spojevi kod kompozitnih materijala u suštini predstavljaju strategiju koja kombinuje lijepljenje i mehaničko spajanje (zavrtnjeve ili zakovice) kako bi se prevazišli nedostaci svake pojedinačne metode spajanja. Ovakva konfiguracija nudi značajno veću nosivost i značajno duži životni vijek pri zamoru, što je čini idealnom za kritične vazduhoplovne i

transportne strukture [2]. Ključna prednost hibridnih spojeva je njihov "fail-safe" karakter, odnosno dvostepeni mehanizam otkazivanja: pri nižim nivoima opterećenja zalijepljeni sloj ima primarnu ulogu i omogućava ravnomjernu raspodjelu napona, dok mehanički elementi postaju aktivni tek nakon popuštanja ljepila [14]. Takođe, prisustvo adhezivnog sloja efikasno smanjuje napone ljuštenja na krajevima preklopa i ublažava pritisak stabla zavrtnja na zidove rupe u kompozitnom laminatu. Numeričko modelovanje hibridnih spojeva najčešće se sprovodi primjenom metode konačnih elemenata (FEM) i modelovanja zona kohezije (CZM) u softverskim paketima kao što su ANSYS i Abaqus radi preciznog predviđanja raspodjele napona, inicijacije oštećenja i ukupne nosivosti konstrukcije [15].

## 6. ZAKLJUČCI

Spojevi su kritične tačke kompozitnih struktura čija efikasnost pod udarnim opterećenjima direktno zavisi od složenih mehanizama poput delaminacije, pucanja matrice i kidanja vlakana. Hibridni i zavareni termoplastični spojevi nude superiornu otpornost na udar u poređenju sa klasičnim adhezivnim (zalijepljenim) spojevima. Brzina deformacije značajno utiče na nosivost, pri čemu visoke brzine udara često povećavaju maksimalnu silu koju spoj može izdržati, ali istovremeno podstiču prelazak sa kohezionog loma na brzu delaminaciju. Pravci budućih istraživanja obuhvataju kvazi-dinamička ispitivanja za razumijevanje ponašanja pri prelaznim brzinama opterećenja, analizu uticaja vlage i temperature na dugotrajnost spojeva, razvoj hibridnih spojeva sa naprednim materijalima, kao i usavršavanje numeričkih modela za preciznije predviđanje loma u realnim uslovima eksploatacije

## ZAHVALNICA

Ovaj rad je podržan od strane COST akcije HISTRATE (CA21155) koju finansira COST (European Cooperation in Science and Technology).

## LITERATURA

- [1] Fathi, P., Oskouei, A. N., Vahedi, K., Petrucci, A. M., Numerical and Experimental Analysis of Stacking Sequences Effects Composite Mechanical Joints under Impact Loadings, *Frattura ed Integrità Strutturale*, 53 (2020) 457-473.
- [2] Kaplan, N., Gulluoglu, A.N., Turkmen, H.S., Mechanical study on hybrid joining type carbon fiber reinforced composite, *Polym Compos*, 45 (2024).
- [3] Tarpani, J. R., Castro, C. E. G., Pickering, S. G., & Almond, D. P., Failure analysis of impact-damaged/hygrothermally aged fiber-reinforced polymer matrix composite joints subjected to bend loading, *In 16th European Conference on Composite Materials, ECCM 2014*, European Society for Composite Materials, (2014).

- [4] Awı, M., Abdullah, A. S., A review on mechanical properties and response of fibre metal laminate under impact loading (experiment), (2023) 111-129.
- [5] Aleksić, B., Postupci spajanja keramike i kompozitnih matrijala, Postupci zavarivanja i oprema, Kurs za internacionalnog inženjera (IWE) I internacionalnog tehnologa zavarivanja (IWT), CZZK, Mašinski fakultet Niš (2019).
- [6] Reis, J. P., de Moura, M., Samborski, S. Thermoplastic composites and their promising applications in joining and repair composites structures: a review, *Materials* 13 (2020) 5832.
- [7] Galińska, A., Mechanical joining of fibre reinforced polymer composites to metals—A review. Part I: Bolted joining, *Polymers*, 12.10 (2020): 2252.
- [8] Galińska, A., Galiński, C., Mechanical joining of fibre reinforced polymer composites to metals—a review. Part II: riveting, clinching, non-adhesive form-locked joints, pin and loop joining, *Polymers*, 12.8 (2020): 1681.
- [9] Arkuszyńska A, Rośkiewicz M. Analysis of the Possibility of Increasing the Load-Bearing Capacity and Fatigue Life of CFRP Material Mechanical Joints. *Materials*. 2025; 18(16):3735.
- [10] Vanderklok, A., Mechanical Behaviour of Bolted Joints Under Impact Rates of Loading, A thesis, Michigan State University (2012).
- [11] Machado, J. J. M., Marques, E. A. S., & da Silva, L. F., Adhesives and adhesive joints under impact loadings: An overview, *The Journal of adhesion*, 94 (2018) 6, 421-452.
- [12] Gursel, A., Cekirge, H. M., Adhesive joints subjected to impact loading: A review, *International Journal of Materials Engineering*, 9 (2019) 1, 16-21.
- [13] Đurić, A., Milčić, D., Klobčar, D., Milčić, M., Markovića, B., Samardžić, S., Experimental Investigation of the Mechanical Behavior of CFRP Adhesive Joints at Different Strain Rates, *Welding Technology Day 2026, Celje Fair, Celje, April 2026*.
- [14] Malekinejad, H., Carbas, R. J., Akhavan-Safar, A., Marques, E. A., Castro Sousa, F., da Silva, L. F., Enhancing fatigue life and strength of adhesively bonded composite joints: A comprehensive review. *Materials*, 16 (2023)19, 6468.
- [15] Blier, R., Monajati, L., Mehrabian, M., Boukhili, R., Strength optimisation of hybrid bolted/bonded composite joints based on finite element analysis. *Materials*, 17 (2024) 13, 3354.



**Resul Hamzić<sup>1\*</sup>, Namik Džibrić<sup>1</sup>, Alen Hodžić<sup>2</sup>**

## **SANACIJA PUKOTINE NA ČEONOJ STIJENI MLINA CEMENTA**

**Rezime:** U ovom radu dat je kompletan proces sanacije kritičnog oštećenja na čeonoj stijeni mlina cementa. Predmet sanacije je pukotina dužine 700 mm i dubine 160 mm, locirana u zoni radijusa stijene, koja je ugrožavala stabilnost i kontinuitet proizvodnje. Rad detaljno opisuje tehnologiju reparaturnog zavarivanja prilagođenu osnovnom materijalu livenom čeliku GS30Mn5V, uz primjenu specijalnih elektroda na bazi nikla E Ni 6182. Poseban fokus stavljen je na tehnološke korake, uključujući precizno kontrolisano predgrijavanje u opsegu 180 ÷ 200°C, metodu žljebljenja grafitnom elektrodom, zatim višeslojno zavarivanje s obaveznim međufaznim iskivanjem radi relaksacije zaostalih napona. Pored tehnološkog aspekta, rad analizira i proces stručnog nadzora koji je obuhvatio ispitivanja bez razaranja (NDT) u svim fazama rada. Bez obzira na otežane uslove rada u ograničenom prostoru i veću dubinu pukotine od inicijalno procijenjene, primjenjena metodologija osigurala je uspješnu sanaciju bez pojave novih pukotina i bez deformacija.

**Ključne riječi:** reparaturno zavarivanje, mlin cementa, liveni čelik GS30Mn5V, pukotina

## **REPAIR OF A CRACK ON THE CEMENT MILL END WALL**

**Abstract:** This paper presents a comprehensive procedure for the rehabilitation of critical damage on the front wall of a cement mill. The repair addressed a crack measuring 700 mm in length and 160 mm in depth, located in the wall radius zone, which posed a significant risk to structural integrity and production continuity. The study provides a detailed analysis of the repair welding technology tailored to the base material, GS30Mn5V cast steel, with the application of specialized nickel-based electrodes (E Ni 6182). Particular

<sup>1</sup> Institut za zavarivanje d.o.o., Tuzla, Bosna i Hercegovina

<sup>2</sup> Tehnopetrol d.o.o., Tuzla, Bosna i Hercegovina

\* Korespondentni autor, mail: resul.hamzic@izz-bh.ba

*emphasis is placed on the technological sequence of operations, including carefully controlled preheating within the temperature range of 180÷200°C, groove preparation using a graphite electrode, and subsequent multilayer welding. Mandatory interpass peening was applied to promote relaxation of residual stresses. In addition to the technological aspects, the paper examines the process of professional supervision, which encompassed non-destructive testing (NDT) at all stages of the repair. Despite challenging working conditions in a confined space and a crack depth exceeding initial estimates, the implemented methodology enabled a successful repair, with no occurrence of new cracks or permanent deformation.*

**Keywords:** repair welding, cement mill, GS30Mn5V cast steel, crack

## 1. UVOD

U toku eksploatacionog vijeka, uslijed stalnih dinamičkih i termičkih opterećenja, komponente mlina su podložne pojavi različitih oštećenja, od kojih su posebno kritične pukotine (Slika 1).



Slika 1. Mlin cementa sa lokacijom oštećenja u toku predgrijavanja

U praksi, ovakva oštećenja mogu za kratko vrijeme dovesti do ozbiljnih posljedica, od smanjenja nosivosti konstrukcije pa do potpunog zastoja proizvodnje. Upravo iz tog razloga komponente mlina se periodično provjeravaju i kontrolišu. Tokom takve jedne redovne kontrole identifikovana je pukotina dužine *cca* 700 mm u zoni radijusa čeone stijene mlina. S obzirom na potencijalne gubitke uslijed zastoja u radu na duži period i znatno većih troškova nabavke i ugradnje nove čeone stijene, odlučeno je da se pristupi sanaciji pukotine na licu mjesta.

U ovom radu dat je kompletan prikaz pristupa rješavanju ovog problema, od izbora tehnologije i dodatnog materijala, do samog izvođenja i kontrole kvaliteta radova. Cilj je bio osigurati dugoročno pouzdano rješenje.

## 2. TEHNOLOGIJA REPARATURNOG ZAVARIVANJA

### 2.1. Osnovni materijal i njegova zavarljivost

Uvidom u tehničku dokumentaciju došlo se do podatka da je predmetni dio izrađen od livenog čelika tipa GS30 Mn5V. Ovdje se radi o ugljeničnom čeličnom livu koji ima primjenu u izradi odlivaka komponenti koje su izložene dinamičkim opterećenjima, kao što su kućišta mlinova, glave čekića i slični masivni dijelovi. Tipičan hemijski sastav čeličnog liva GS30 Mn5V dat je u Tabeli 1.

Tabela 1. Hemijski sastav čeličnog liva GS30 Mn5V

Elementi	Sadržaj (%)
C	0,25÷0,32
Si	< 0,6
Mn	1,2÷1,8
P	< 0,035
S	< 0,03

Čelični liv GS30 Mn5V posjeduje dobru zavarljivost uz uslov prethodnog predgrijavanja.

### 2.2. Izbor postupka zavarivanja

Prema pristupačnosti zone sanacije kao i tipa proizvoda (masivni odlivak složene geometrije), odabran je postupak zavarivanja 111 (REL - ručno elektrolučno zavarivanje obloženom elektrodom). REL postupak omogućava fleksibilan pristup teško dostupnim mjestima s obzirom na ograničen prostor i geometriju pukotine.

### 2.3. Dodatni i pomoćni materijal za zavarivanje

Na osnovu odabranog postupka zavarivanja, materijala za zavarivanje i pristupačnosti zone sanacije, reparaturno zavarivanje se vršilo obloženom elektrodom tipa E Ni 6182 prema EN ISO 14172, oznake kod proizvođača *Castolin Xuper NucleoTec 2222*.

Ova elektroda osigurava visoku postojanost na pojavu pukotina, naročito pri stalnim temperaturama i mehaničkim opterećenjima.

U Tabeli 2 dat je prikaz mehaničkih i fizičkih osobina elektrode E Ni 6182, a u Tabeli 3 preporuke parametara zavarivanja.

Tabela 2. Mehaničke i fizičke osobine elektrode E Ni 6182

Osobina	Vrijednost
Zatezna čvrstoća [Rm]	620÷690 (N/mm <sup>2</sup> )
Granica tečenja [Rp]	ca. 390 (N/mm <sup>2</sup> )
Izduženje [l=5d]	40÷45(%)
Udarni rad [Aw]	ca. 120 (J)*
Tvrdoća [HV]	180÷220

\*Pri ekstremnim temperaturama

Tabela 3. Preporuke parametara za zavarivanje od strane proizvođača

Parametar	Vrijednost
Vrsta struje/polaritet	DC (+) ili AC
Jačina struje za zavarivanje [I]	Ø 2,4 [mm] = 50÷70[A]
	Ø 3,25 [mm] = 70÷90[A]
	Ø 4,0 [mm] = 90÷100[A]
	Ø 5,0 [mm] = 110÷140[A]

Nakon procesa očvršćavanja, ohlađena masa osigurava nehrđajući zavareni spoj koji se odlikuje visokom elastičnošću. Spoj je žilav do - 269°C i otporan je na oksidaciju do 1000°C. Elektrode su sušene u mobilnoj peći na temperaturi od 250°C u vremenu od 1 časa.

## 2.4. Tehnologija reparaturnog zavarivanja

Prije postupka reparaturnog zavarivanja, bilo je neophodno rasteretiti i pozicionirati mlin, tako da pukotina bude u najpogodnijem položaju za pripremu i zavarivanje.

Izvršena je zaštita osjetljivih dijelova u blizini mjesta reparaturnog zavarivanja, a zatim pozicioniranje termoelemenata na predviđenim mjestima u zoni pukotine. Izvršeno je kontrolisano zagrijavanje komada (Slika 2). Kontrola temperature vršena je na rastojanju 50 mm od pukotine.



Slika 2. Kontrolisano zagrijavanje zone reparacije

Nakon što je temperatura na komadu dostigla vrijednost od minimalno 100°C, pristupljeno je žljebljenju grafitnom elektrodom.

Postupak žljebljenja (Slika 3) izvođen je dok se pukotina potpuno nije odstranila.

U toku žljebljenja vršena je kontrola temperature komada. Prilikom postupka žljebljenja korišten je pneumatski čekić za čišćenje i opuštanje materijala. Žlijeb je pripremljen u obliku slova „U” sa blagim prelazima bez oštih ivica, srhova ili bilo kakvih nedostataka (Slika 4a).

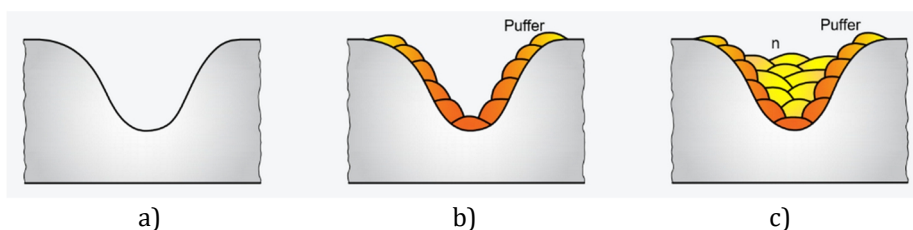


Slika 3. Proces žljebljenja

Nakon završenog postupka žljebljenja, provedeno je kontrolisano hlađenje komada do 50°C. Žljebljena površina je pripremljena do fine glatkoće.

Nakon provedene penetrantske kontrole koja je bila zadovoljavajuća, komad je kontrolisano dogrijavan do 200°C, nakon čega se pristupilo zavarivanju.

Reparaturno zavarivanje izvođeno je na način da se prvo nanio sluj „puffer” (Slika 4b), a zatim popuna žlijeba (Slika 4c), uz obavezno iskivanje i čišćenje.



a)

b)

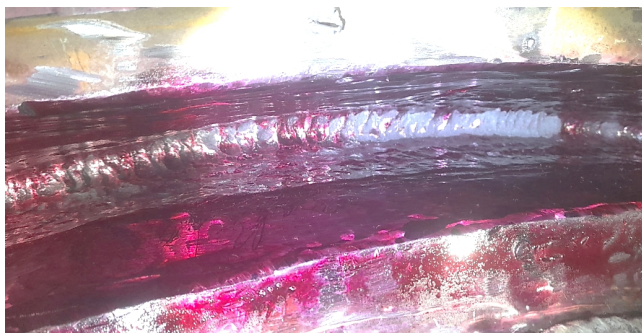
c)

Slika 4. Priprema i ispuna žlijeba;  
a) blagi prelazi, b) puffer sloj, c) popuna

### 3. REZULTATI I DISKUSIJA

Tokom i nakon provedenog reparaturnog postupka zavarivanja vršena je vizuelna i penetrantska kontrola, radi prevencije pojave nedostataka.

Penetrantska kontrola potvrdila je da je kompletna pukotina odstranjena žljebljenjem, ali i da ne postoje površinski nedostaci u zoni zavarivanja nakon zavarivanja (Slika 5).



Slika 5. Penetrantska kontrola u toku žlijebljenja

U toku procesa reparaturnog zavarivanja nije došlo do pojave novih pukotina, što daje poseban značaj s obzirom na početnu kompleksnost oštećenja i dubinu pukotine.

Kontrolisani režimi predgrijavanja i međuprolazne temperature imali su ključnu ulogu za smanjenje zaostalih napona i pojavu hladnih pukotina. Izbor postupka 111 (REL) pokazao se kao optimalan za uslove rada, prvenstveno zbog ograničene pristupačnosti (Slika 6). Odabrani dodatni materijal na bazi nikla bio je ključan za kvalitetno reparaturno zavarivanje (Slika 7).



Slika 6. Proces reparaturnog zavarivanja postupkom 111



Slika 7. Utrošeni dodatni materijal

Nakon kompletnog procesa reparaturnog zavarivanja, hlađenja i kontrole, pristupilo se oblikovanju navarene površine brušenjem, što je u konačnom dovelo do homogene geometrije na samom komadu (Slika 8).



Slika 8. Obrušena površina nakon reparaturnog zavarivanja

#### **4. ZAKLJUČCI**

Kompletna reparacija oštećenog dijela čeone stijene mlina cementa sprovedena je u skladu s definisanom tehnologijom zavarivanja, što je dovelo do efikasnog i ekonomski opravdanijeg rješenja u odnosu na zamjenu dijela.

Ključni faktori koji su osigurali kvalitetno reparaturno zavarivanje su priprema žlijeba, kontrolisano zagrijavanje, dogrijavanje i hlađenje, zatim iskivanje u toku procesa reparaturnog zavarivanja kao i kontrola u svim fazama.

Još jednom se pokazalo da uprkos otežanim uslovima rada i većoj dubini pukotine od očekivane, primijenjena tehnologija i kvalitetan nadzor omogućili su sanaciju oštećenja bez pojave novih pukotina.

Nakon puštanja u rad nije došlo do deformisanja niti degradacije spoja, što potvrđuje dugoročnu pouzdanost izvršene reparacije.

#### **LITERATURA**

- [1] Jürgen Tuchtfield, Thomas Assion, Issam Chiguer; Efficient welding repairs in the cement industry, 7. Međunarodno znanstveno-stručnom savjetovanje SBZ 2013.
- [2] Wolfgang Martini, Stella Ruiz; Cement mill - Cracks in the mill ends - Short Paper on an interesting case of damage; Machinery Insurance; Prepared for IMIA, Munich Re; Feb. 2008.





Društvo za  
Zavarivanje  
Crne Gore

1. Konferencija sa međunarodnim učešćem

## „TEHNOLOGIJE SPAJANJA MATERIJALA“

14 - 16. maj 2026. godine, Bečići, Crna Gora



MAŠINSKI  
FAKULTET  
PODGORICA

**Maja Lindič<sup>1</sup>, Nikolaj Mole<sup>1</sup>, Aleš Nagode<sup>2</sup>, Borut Žužek<sup>3</sup>, Tomaž Vuherer<sup>4</sup>, Miodrag Milčić<sup>5</sup>, Dragan Milčić<sup>5</sup>, Nataša Zdravković<sup>5</sup>, Aleksija Đurić<sup>6</sup>, Marek Polanski<sup>7</sup>, Damjan Klobčar<sup>1,\*</sup>**

### UTICAJ NAKNADNE TERMIČKE OBRADNE NA MEHANIČKA SVOJSTVA STRUKTURE OD MAREJDŽING ČELIKA DOBIJENE WAAM POSTUPKOM

**Rezime:** U ovom radu prikazan je uticaj naknadne termičke obrade na mehanička svojstva strukture od marejdžing čelika proizvedene postupkom aditivne proizvodnje taloženjem sa fokusiranim izvorom energije aktivacije pomoću žice i električnog luka u zaštitnoj atmosferi gasa (Wire Arc Additive Manufacturing - WAAM). Optimizacija procesnih parametara omogućila je uspešno formiranje strukture. Karakterizacija je izvršena u tri stanja materijala: (i) nakon taloženja bez naknadnog tretmana (as-built), (ii) nakon rastvarajućeg žarenja i (iii) nakon starenja. Sprovedena ispitivanja obuhvatila su: vizuelni pregled, optičku mikroskopiju, SEM analizu, fraktografiju, merenje tvrdoće, zatezno ispitivanje i ispitivanje udarne žilavosti. Mikrostruktura u stanju nakon taloženja karakteriše se izduženim zrnima i mikrosegregacijama orijentisanim duž pravca odvođenja toplote. Rastvarajuće žarenje rezultiralo je hemijski homogenom i finostrukturnom mikrostrukturom. Rezultati pokazuju da WAAM struktura od marejdžing čelika u stanju potpunog starenja dostiže zateznu čvrstoću od 1947 MPa, tvrdoću od 657 HV5 i udarnu žilavost od 11 J, što je uporedivo sa konvencionalno proizvedenim marejdžing čelikom.

**Ključne riječi:** WAAM, GMAW, meredžing čelik, termička obrada, mehanička svojstva

<sup>1</sup> University of Ljubljana, Faculty of Mechanical Engineering, Ljubljana, Republic of Slovenia

<sup>2</sup> University of Ljubljana, Faculty of Natural Sciences and Engineering, Ljubljana, Republic of Slovenia

<sup>3</sup> Institute of Metals and Technology, Ljubljana, Republic of Slovenia

<sup>4</sup> University of Maribor, Faculty of Mechanical Engineering, Maribor, Republic of Slovenia

<sup>5</sup> University of Niš, Faculty of Mechanical Engineering, Niš, Republic of Serbia

<sup>6</sup> University of East Sarajevo, Faculty of Mechanical Engineering East Sarajevo, East Sarajevo, Republic of Srpska, Bosnia and Herzegovina

<sup>7</sup> Military University of Technology, Faculty of Advanced Technologies and Chemistry, Warsaw, Poland

\* Corresponding author, mail: damjan.klobcar@fs.uni-lj.si

## INFLUENCE OF POST-DEPOSITION HEAT TREATMENT OF WAAM MARAGING STEEL ON MECHANICAL PROPERTIES

**Abstract:** *An article shows an influence of post deposition heat treatment of Wire Arc Additive Manufactured maraging steel using a Gas Metal Arc (GMA) power source. An optimisation of deposition process parameters enabled a flawless deposition of maraging steel. The material characterisation was done in different conditions: (i) the as-built, (ii) solution annealed and (iii) aged. The research included visual examinations of deposited surface, optical microscopy, SEM, fractography, hardness testing, tensile testing and impact toughness testing. The as-deposited state exhibited a microstructure with long crystal grains and microsegregations orientated the direction of the heat sink. An optimized solution annealing produced a chemically uniform fine-grained microstructure. The results show that additively manufactured maraging steel reaches a tensile strength of 1947 MPa, a hardness of 657 HV5 and a Charpy impact toughness of 11 J at peak aging condition, which is comparable to conventionally manufactured maraging steel.*

**Keywords:** WAAM, GMAW, maraging steel, heat treatment, mechanical properties

### 1. INTRODUCTION

Maraging steels are characterized by high strength, which is achieved through precipitation hardening of intermetallic compounds and martensitic transformation, rather than by the carbon-induced strengthening mechanism typical of conventional steels. Due to their exceptional mechanical properties, good weldability, and the absence of preheating requirements for welding applications, they are highly suitable for demanding applications in the tooling industry (e.g., injection molding and die-casting tools) [1].

While WAAM - Wire Arc Additive Manufacturing demonstrates significant advantages among additive manufacturing technologies, the high heat input and repeated thermal cycles during deposition lead to the formation of complex microstructures. These microstructures, including elongated columnar grains, microsegregations, and martensite, require subsequent post-processing to achieve optimal mechanical properties. Such properties can be enhanced through various mechanical treatments or heat treatment processes [1–3]. Studies on WAAM-deposited maraging steels have mainly focused on process optimization, microstructural characterization, analysis of mechanical behavior, and heat treatment procedures.

## 2. EKSPERIMENT

For WAAM deposition, E 4-UM-40 PT welding wire of 1.2 mm in diameter was used. Filler material was deposited onto an X2NiCoMo18-9-5 base plate with the chemical composition listed in Table 1.

Table 1. Chemical composition of the substrate and filler materials [wt.%].

	Ni	Co	Mo	Mn	Si	C	Ti	Al	Fe
Filler wire [4]	17-19	10-12	4-4.5	<0.3	<0.8	<0.03	+	+	rest
Substrate [5]	18.5	9.0	5.0	≤0.1	≤0.1	<0.03	0.7	0.1	rest

The deposition was carried out using the WAAM-MIG process with a Fronius Trans Pulse Synergic 3200 welding power source, as shown in Figure 1. Process parameters are listed in Table 2.

Table 2. Process parameters

Parameter	Parameter value
welding current	200 A
shielding gas mixture	50% Ar, 50% He
gas flow rate	15 l/min
travel speed	3 mm/s
interpass temperature	250°C
welding program	Fronius Cold Metal Transfer welding program in pulsed mode (1 CMT cycle and 9 pulse cycles)
Manipulator	ABB IRB 140 welding robot

Specimens of different geometries for mechanical testing were sectioned from the deposited walls. The samples were oriented longitudinally with respect to the build direction. A tensile test was performed using an Instron 8802 servo-hydraulic testing machine equipped with an extensometer, in accordance with ISO 6892-1 – Method B. Charpy impact toughness testing was carried out using an Amsler Charpy pendulum RPK300, according to ASTM E2290-15, using V-notched specimens with dimensions 10 × 10 × 55 mm.

Vickers hardness measurements were performed using a Zwick Roell ZHU 2.5 testing system with a 5 kg load, in accordance with EN ISO 6507. Optical microscopy was conducted using a Keyence VHX-6000 digital microscope, together with automatic particle analysis - APA. Scanning electron microscopy - SEM was performed using a ZEISS Supra 55VP microscope. For the microstructural analysis, the samples were etched using Kalling's No. 2 reagent (100 mL ethanol, 100 mL HCl, 2 mg CuCl<sub>2</sub>).



Figure 1. Experimental setup for the WAAM deposition process.

Material characterization was performed at three different conditions. First, the material was tested in the as-built state - AB. Subsequently, it was evaluated after each completed heat treatment cycle: solution annealing – SA and precipitation hardening, i.e., ageing – SA+A. Two solution annealing routes were investigated:

- SA-1: Single-step process at 920°C for 1 hour.
- SA-2: Three-step process consisting of homogenization at 1150°C for 1 hour, grain refinement annealing at 595°C for 1 hour, and solution annealing at 850°C for 1 hour.

SA-2 approach was selected based on recommendations for cast materials, since WAAM-deposited maraging steel exhibits similar characteristics due to high heat input and slow cooling rates.

Solution annealing served as the basis for the subsequent heat treatment cycle-ageing. The material was aged at 480°C for 4 hours, which is a commonly specified ageing treatment for maraging steels [4].

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

#### 3.1. Microstructure analysis

The material in the as-built condition - AB, exhibited a markedly heterogeneous microstructure, as shown in Figure 2a. It was characterized by an elongated grains oriented along the heat dissipation direction, microsegregation, and a dendritic martensitic microstructure. Variations in the microstructure were caused by thermal cycling during deposition.

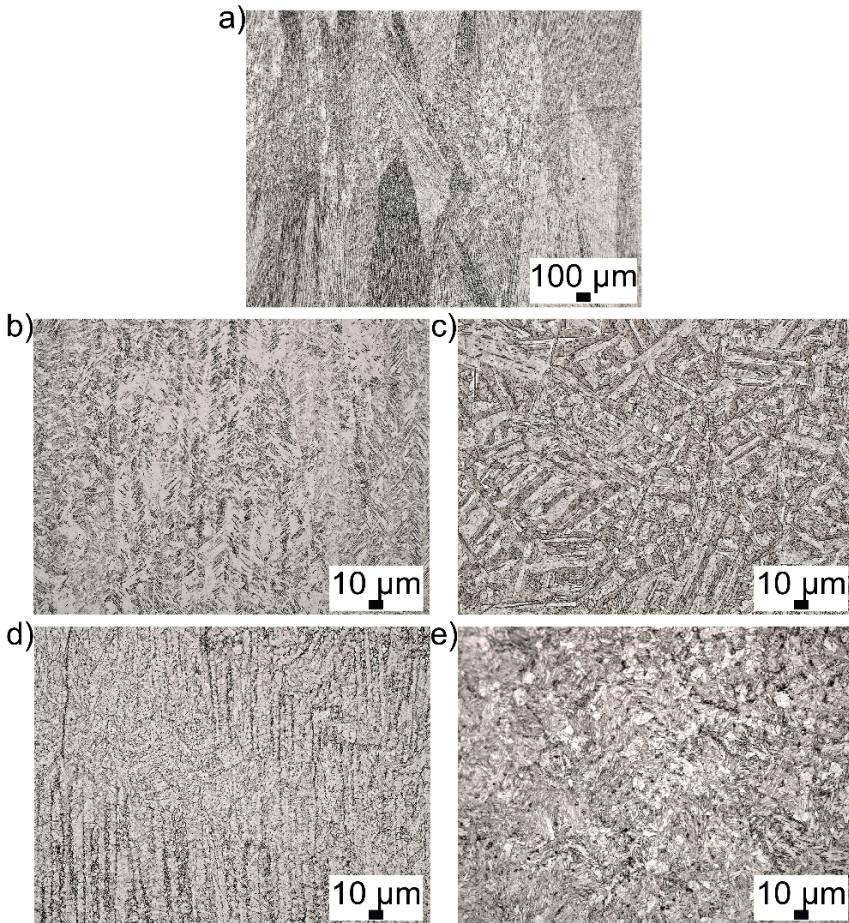


Figure 2. Optical micrographs of the material in different conditions: (a) AB, (b) SA-1, (c) SA-2, (d) SA-1+A, (e) SA-2+A.

Solution annealing SA-1 partially homogenized the microstructure; however, heterogeneity was not completely eliminated, as shown in Figure 2b. Characteristic features similar to those observed in the as-built state were still present. In contrast, solution annealing SA-2 resulted in a fully homogeneous and fine-grained microstructure, effectively removing the effects of the manufacturing process, as presented in Figure 2c. The preliminary steps in SA-2 (homogenization and grain refinement) were crucial for the formation of reverted austenite, which acts as a nucleation site for fine-grained structure formation and ensures uniform distribution of alloying elements. Microstructural homogeneity after solution annealing is essential for achieving optimal results after ageing, since the ageing temperature is too low to further influence homogenization. This is clearly demonstrated by the microstructures of the aged states, namely SA-1+A in Figure 2d and SA-2+A in Figure 2e.

The results of automatic particle analysis - SEM-APA for the as-built sample are shown in the chart in Figure 3. The highest amount of inclusions was found in the 1–2  $\mu\text{m}$  size range. The number of inclusions monotonically decreased with increasing particle size. The high concentration of oxides (AlO, TiO) in the smallest size class indicates the formation of oxide phases during the WAAM process, most likely due to local interaction of the melt pool with oxygen or oxide films present on the wire/substrate surface. In the 2–3  $\mu\text{m}$  class, the number of inclusions decreased by approximately one half, while inclusions larger than 5  $\mu\text{m}$  were rare and those above 10  $\mu\text{m}$  were practically negligible. The absence of larger inclusions has a positive effect on mechanical properties, since such particles represent critical sites for crack initiation or local stress concentration. Among all inclusions, oxides (AlO, TiO) predominated in all size classes, while carbides (TiMoC) and sulfides (TiS) were observed mainly in the smaller fractions. Nitrides (TiN) and oxynitrides (TiON) were rare.

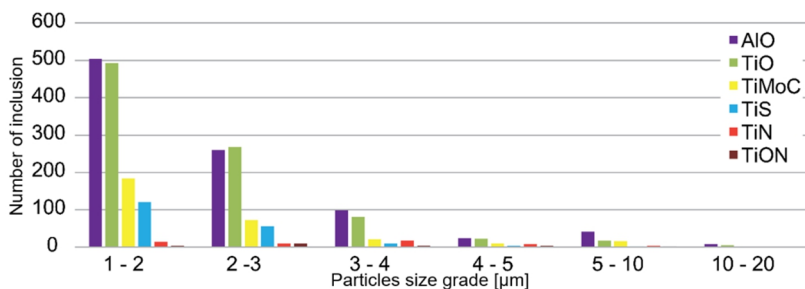


Figure 3. APA inclusion analysis results in the as-built condition.

### 3.2. Analysis of Mechanical Properties

The results of all mechanical tests are shown in Figure 4. In the as-built condition, the material exhibited an average Vickers hardness of 465 HV5. Solution annealing reduced hardness to 331 HV5 for SA-1 and 321 HV5 for SA-2. Ageing increased hardness due to precipitate formation, reaching 605 HV5 for SA-1+S and 657 HV5 for SA-2+S.

The as-built material showed an ultimate tensile strength of 1340 MPa with 13.1% elongation. Solution annealing reduced tensile strength to 1036 MPa for SA-1 and 955 MPa for SA-2. Ageing markedly increased strength but reduced ductility, yielding 1943 MPa with 1.6% elongation for SA-1+A and 1947 MPa with 2.0% elongation for SA-2+A.

In the as-built condition, a Charpy impact toughness value of 18 J was measured. The fracture mode was characterized by mixed ductile behaviour. Dimples formed on the fracture surface, observed by SEM, are shown in Figure 5a. These dimples were deep and distinctly elongated in the heat dissipation direction during deposition. Their morphology can be described as highly heterogeneous.

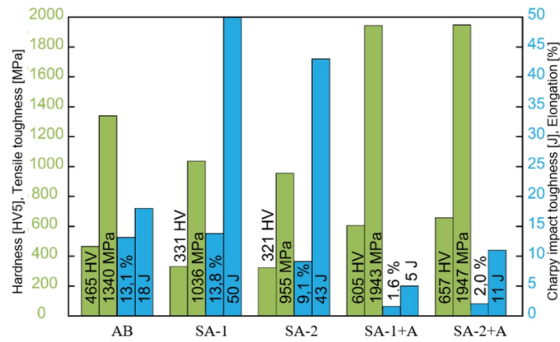


Figure 4. Mechanical properties at different material conditions.

Solution annealing increased toughness to 50 J for SA-1 and 43 J for SA-2. Consequently, the dimple morphology also changed. For SA-1, shown in Figure 5b, the dimples were more uniform compared with the as-built state. However, heterogeneous regions remained visible as a consequence of deposition and incomplete solution annealing. The fracture surface of the SA-2 sample showed a completely homogeneous morphology with deep, rounded dimples, as presented in Figure 5c.

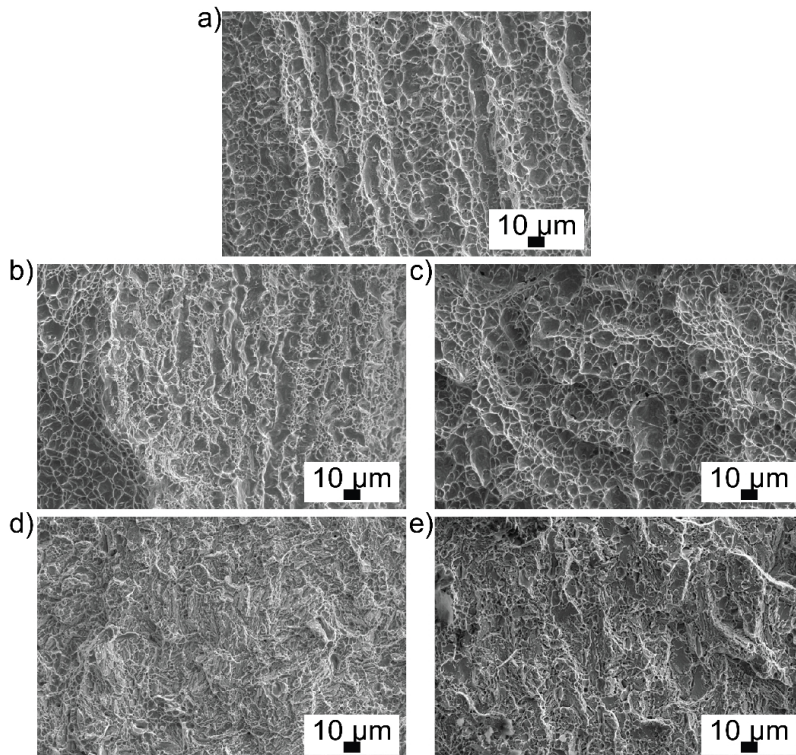


Figure 5. Fracture surfaces of Charpy impact specimens recorded using SEM for different material conditions: (a) AB, (b) SA-1, (c) SA-2, (d) SA-1+A, (e) SA-2+A

After ageing, toughness decreased due to precipitate formation. SA-1+A reached 5 J, while SA-2+A achieved 11 J. The SA-1+A fracture surface showed pronounced brittle behaviour with local cleavage regions (Figure 5d). Dimples were shallow and elongated, reflecting insufficient solution annealing. In contrast, the fracture surface of the SA-2+A sample in Figure 5Figuree showed characteristically rounded dimples, similarly shallow as in SA-1+A, but without visible features indicating cleavage fracture.

#### **4. CONCLUSIONS**

The study confirms that WAAM, combined with suitable heat treatment conditions, can be successfully used for deposition of maraging steel with mechanical properties comparable to conventionally manufactured material. The investigation showed that:

- Solution annealing SA-1 (920°C/1 h) improved the as-built condition but did not fully remove deposition-induced heterogeneity and grain orientation.
- Solution annealing SA-2 (1150°C/1 h, 595°C/1 h, 850°C/1 h) provided microstructural homogenization and grain refinement, ensuring proper preparation for ageing.
- Charpy specimens in the SA-1+A condition (920°C/1 h, 480°C/4 h) exhibited cleavage fracture and pronounced brittleness, unfavorable for mechanical performance.
- Under ageing at 480°C/4 h and solution annealing SA-2+A achieved very high hardness (657 HV5) and tensile strength (1947 MPa), but low toughness (11 J). Since toughness decreases with increasing hardness and strength, ageing parameters must be optimized according to the intended application.

#### **ACKNOWLEDGMENT**

The research of the authors was partially funded by the Slovenian Research and Innovation Agency (ARIS) under grant number P2-0270, and bilateral project Weave N2-0328, and by ARIS and the European Union Next Generation EU through DIGITOP project. This work was also partly supported by the Slovenian Research Agency, under grant number BI-BA/24-25-034. The paper was also partly supported by EU ERASMUS+ Strategic Partnership Key Action 2, number: 2024-1-RO01-KA220-HED-000244949 (SMARTIE) and 2023-1-RO01-KA220-HED-000158031 (ANGIE).

#### **REFERENCES**

- [1] ASM Handbook, Volume 4: Heat treating, 9. print, ASM International, Materials Park, Ohio, 2009.

- [2] F.H. Lang, N. Kenyon, *Welding of Maraging Steels - A practical guide to the use of nickel-containing alloys no 584*, The Nickel Institute 2021 (n.d.) 0-41.
- [3] X. Xu, S. Ganguly, J. Ding, S. Guo, S. Williams, F. Martina, Microstructural evolution and mechanical properties of maraging steel produced by wire + arc additive manufacture process, *Materials Characterization*, 143 (2018), pp. 152-162. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2017.12.002>.
- [4] Schweissmaterialien GmbH, *Capilla - Part catalogue; 4. Welding consumables for welding of tool steels*, Schweissmaterialien GmbH, Leopoldshoehe, Germany, (2017).
- [5] Voestalpine BÖHLER Edelstahl GmbH & Co KG, *BÖHLER - W720VMR hot work tool steel*, voestalpine BÖHLER Edelstahl GmbH & Co KG, Kapfenberg, Austria, (2026).





**Darko Šarančić<sup>1,\*</sup>, Luka Kuč<sup>1</sup>, Darko Bajić<sup>2</sup>**

## **TEHNOLOŠKI POSTUPAK UGRADNJE NOSAČA KOČIONE MLAZNICE NA KUĆIŠTE TURBINE AGREGATA A6 I A7 HE „PERUĆICA“**

**Rezime:** U radu je prikazan tehnološki postupak pozicioniranja i zavarivanja nosača kočione mlaznice na ubetoniranom dijelu turbinskog kućišta šestog i sedmog agregata u HE „Perućica“. Nosač kočione mlaznice izrađen je od nerđajućeg čelika 1.4571. Ugradnja je izvršena u prethodno obrađeni otvor na čeličnom odlivku kućištu. Funkcija nosača kočione mlaznice je precizno pozicioniranje mlaznice sistema kočenja. Ovaj element pod pritiskom usmjerava mlaz vode ka radnom kolu turbine u cilju njengovog zaustavljanja. Rad obuhvata opis funkcije sistema kočenja, postupak rezanja i pripreme otvora, proceduru pozicioniranja nosača, kao i tehnologiju zavarivanja. Poseban akcenat stavljen je na kontrolu geometrijske tačnosti, kao i tehnološki postupak zavarivanja.

**Ključne riječi:** nosač kočione mlaznice, geometrijska kontrola, zavarivanje

## **TECHNOLOGICAL PROCEDURE FOR INSTALLATION OF THE BRAKE NOZZLE HOLDER ON THE TURBINE CASING OF UNITS A6 AND A7 AT HPP “PERUCICA”**

**Abstract:** This paper presents the technological procedure for positioning and welding the brake nozzle holder onto the embedded section of the turbine casing of units six and seven at HPP “Perućica.” The brake nozzle holder is manufactured from stainless steel grade 1.4571. Installation was performed into a previously machined opening in the steel cast turbine housing. The function of the brake nozzle holder is to ensure precise positioning of the braking nozzle. This pressurized component directs a water jet toward the turbine runner in order to bring it to a stop. The paper includes a description

<sup>1</sup> Hiperion d.o.o., Nikšić, Crna Gora

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

*of the braking system function, the cutting and preparation procedure of the opening, the positioning procedure of the holder, as well as the welding technology applied. Special emphasis is placed on the control of geometric accuracy and the welding procedure specification (WPS).*

**Keywords:** brake nozzle holder, geometric control, welding

## 1. UVOD

Usled razlika u hemijskom sastavu, koeficijentima termičkog širenja i mehaničkim osobinama, zavarivanje raznorodnih materijala predstavlja poseban izazov u oblasti tehnologija spajanja materijala [1-4]. Prilikom zavarivanja nerđajućeg i konstrukcionog čelika dolazi do miješanja osnovnih i dodatnog materijala u metalu šava (MŠ) i formira se nehomogena mikrostruktura. Novoformirana struktura u MF, stvara mogućnosti pojave krtih faza, što značajno utiče na mehanička svojstva i pouzdanost zavarenog spoja.

U cilju obezbjeđenja kvalitetnog i pouzdanog spoja, neophodno je primijeniti odgovarajuću tehnologiju zavarivanja, uz kontrolu unosa toplote i međuprolazne temperature, kao i pravilan izbor dodatnog materijala. Dodatni materijal treba da obezbijedi uslove kompatibilnosti različitih materijala. U industrijskoj praksi, ovakvi spojevi se često primjenjuju u energetskim postrojenjima, gdje su zahtjevi za pouzdanošću i sigurnošću rada izrazito visoki. Jedan od primjera predstavlja ugradnja nosača kočione mlaznice na turbinskom kućište (Slika 1) u okviru modernizacije agregata A6 i A7 HE „Perućica“.



Slika 1. Radno kolo turbine i položaj kočione mlaznice u turbinskom kućištu

Cilj rada je prikaz tehnološkog postupka pozicioniranja i zavarivanja nosača kočione mlaznice na ubetoniranom dijelu turbinskog kućišta, sa posebnim

osvrtno na primijenjenu tehnologiju zavarivanja i kontrolu geometrijske tačnosti.

## 2. EKSPERIMENT

### 2.1. Opis sistema kočenja turbine

Sistem kočenja radnog kola Pelton turbine omogućava kontrolisano usporavanje i zaustavljanje radnog kola primjenom različitih metoda, uključujući elektronsko kočenje i kočenje pomoću mlaza vode.

Kočiona mlaznica usmjerava mlaz vode pod pritiskom ka radnom kolu turbine, pri čemu dolazi do smanjenja brzine obrtanja usljed djelovanja mlaza na lopatice radnog kola. Efikasnost ovog načina kočenja direktno zavisi od pravilnog usmjerenja mlaza, odnosno od tačnog položaja i orijentacije mlaznice. Postupak pozicioniranja i zavarivanja nosača predstavlja značajnu fazu u realizaciji sistema kočenja.

### 2.2. Materijal

Nosač kočione mlaznice izrađen je od nerđajućeg čelika oznake EN 1.4571 (X6CrNiMoTi17-12-2), koji pripada grupi austenitnih nerđajućih čelika legiranih hromom, niklom i molibdenom, sa dobrim mehaničkim osobinama i otpornošću na koroziju (Tabela 1).

Turbinsko kućište izrađeno je kao čelični odlivak konstrukcionog tipa i ubetonirano u konstrukciju agregata. Prema specifikaciji postupka zavarivanja, osnovni materijal odgovara oznaci EN 1.0446 (GS-45.3) (Tabela 1).

Tabela 1. Mehanička svojstva materijala

Materijal	$R_{p0,2}$ , MPa	$R_m$ , MPa	$A_5$ , %
EN 1.4571	>200	570	35
EN 1.0446	≥230	≥450	≥22

Zavarivanjem raznorodnih materijala zahtjeva primjenu odgovarajućeg dodatnog materijala i kontrolisan unos toplote.

### 2.3. Pozicioniranje nosača

Otvor je formiran postupkom plamenog rezanja, uz obezbjeđenje potrebne geometrije i pristupa za dalje faze ugradnje i zavarivanja. Posebna pažnja posvećena je kontroli dimenzija i položaja otvora, kako bi se omogućilo pravilno pozicioniranje nosača i funkcionalno usmjerenje mlaza kočione mlaznice. Pozicioniranje nosača izvršeno je uz primjenu odgovarajućih mjernih metoda, pri čemu je bilo neophodno obezbijediti tačno centriranje i orijentaciju elementa. U cilju obezbjeđenja potrebnog usmjerenja mlaza, korišćen je laserski uređaj za pozicioniranje u kombinaciji sa pomoćnim

alatima. Na dijelu turbinskog sklopa postavljen je referentni element sa definisanom ciljnom tačkom, dok je laserski uređaj montiran u nosač na vrhu kočione mlaznice. Postupak pozicioniranja prikazan je na Slici 2.



Slike 2. Pozicioniranje mlaznice

## 2.5. Tehnologija zavarivanja

Zavarivanje nosača kočione mlaznice na turbinsko kućište izvedeno je u skladu sa specifikacijom postupka zavarivanja (WPS) (Slika 3), primjenom kombinovanog postupka TIG (141) za zavar korijena i REL (111) za zavare popune. Položaj zavarivanja je prikazan na Slici 4.

HIPERION d.o.o. – Nikšić									
WPS		05-E		UPUSTVO PROIZVOĐAČA - ZA ZAVARIVANJE					
WPQR		020000-07/24							
Revizija / Datum									
Narednica / Customer		IEE		Kodni nalog / Work order					
Br. crteža		PERU-01-16-112-30-022		Vrsta pregovora i ciljeva / Type of preparing and aim		brusjenje...			
Dizajner		Brake Nozzle		Vrsta pripreme i ciljeva / Type of preparing and aim					
Procedura zavarivanja / Welding procedure				Specifikacija ozn. materijala / Specification of material		CL.0401, CL.0446, GS-45.3, 1.4571			
Postupak zavarivanja / Welding process		TIG(141), REL (111)		Debljina obrabka (mm) / Thickness range (mm)		S=35-60mm, t=73mm			
Vrsta spoja / Type of joint		FW		Vanjski promjer (mm) / Exterior diameter (mm)		250			
Oznaka lica / Type of work				Položaj zavarivanja / Welding position		PF			
Oblik zavarivanja / Joint detail				Redukovani neredovnosti / Reduced irregularities					
Položaj zavarivanja / Welding position		141		Napon (V) / Voltage (V)		Vrsta napajanja / Type of power		Brzina dotoka / Wire feed speed	
1-2		PF		70-110		12-16		DC-	
3-4		PF		80-120		/		DC-	
Dodatni materijal - oznaka i naziv / Filler material / specification and trade name		Korijen/Root		Popuna/Fill passes		EN ISO 14343-A: W 23 12 L S EN 1600: E 23 12 LR 12 8			
Posebni zahtjevi za sušenje / Special de-hydration for drying		300°C / 2h							
Zaštita plin/prirak / Protective gas/shield		Argon							
Zaštita plin (l/min) / Flow rate (l/min)		6 - 9 l/min							
Temperatura predzavarivanja / Preheat temperature		Ta							
Maksimalna temperatura / Maximum temperature		Tt < 120 °C							
Temperatura zavarivanja - vrijeme, temp., postupak / Post-weld heat treatment / Temperature-time		/							
NAPOMENE/Kontrola / Remarks		VT, PT							
Izradio / Prepared by:		D. Sarančić		Provodio / Approved by:					
Ime, datum i potpis / Name, date and signature:		22.11.2024.		Ime, datum i potpis / Name, date and signature:					

Slika 3. Specifikacija postupka zavarivanja



Slika 4. Položaj zavarivanja

U skladu sa definisanim postupkom, za formiranje korijenskog zavara korišćen je dodatni materijal oznake W 23 12 L Si koji pripada grupi visokolegiranih austenitno-feritnih materijala sa  $\approx 23\%$  Cr,  $12\%$  Ni, niskim procentom sadržaja C ( $\leq 0.03\%$ ). Mehanička svojstva ovog dodatnog materijala su prikazana u Tabeli 2.

Za popunu i završne prolaze primijenjena je elektroda oznake E 23 2 2 LR koja pripada grupi visokolegiranih oplaštenih elektroda. Ovaj dodatni materijali sa povećanim sadržajem hroma ( $\approx 23\%$ ) i nikla ( $\approx 12\%$ ) pogodni su za zavarivanje raznorodnih spojeva između nerđajućih i konstrukcionih čelika. Mehanička svojstva ovog dodatnog materijala su prikazana u Tabeli 2.

Tabela 2. Mehanička svojstva dodatnih materijala

Dodatni materijal	$R_{p0,2}$ , MPa	$R_m$ , MPa	$A_5$ , %
W 23 12 L Si	$\geq 400$	550-700	$\geq 30$
EN 1.0446	$\geq 230$	$\geq 450$	$\geq 22$

U cilju ograničavanja unosa toplote i smanjenja rizika od pojave krtih faza u zoni zavara, zavarivanje je vršeno uz kontrolu međuprolazne temperature, koja je održavana ispod  $120^\circ\text{C}$ . Oplaštena bazična elektroda korišćene za zavare popune prije upotrebe sušena je u skladu sa zahtjevima postupka zavarivanja (Slika 3).

Tokom izvođenja zavarivanja posebna pažnja posvećena je redosljedu nanošenja zavarenih prolaza, pri čemu je zavarivanje izvođeno sa obje strane spoja. Ravnomjernom raspodjelom unosa toplote kao preduslovom za minimalnom deformacijom materijala, očuvano je geometrijsko pozicioniranje elementa. Kontrola kvaliteta zavarenog spoja izvršena je primjenom vizuelne (VT) i penetrantske (PT) metode ispitivanja (Slika 5), u skladu sa zahtjevima definisanim postupkom zavarivanja.



Slika 5. Penetrantska kontrola zavarenog spoja nosača kočione mlaznice

### **3. REZULTATI I DISKUSIJA**

Primijenjeni tehnološki postupak omogućio je uspješnu ugradnju nosača kočione mlaznice uz obezbjeđenje zahtijevane geometrijske tačnosti i kvaliteta zavarenog spoja.

Primjenom odgovarajućih parametara zavarivanja ostvaren je kvalitetan i pouzdan zavareni spoj bez vidljivih površinskih nedostataka. Izvođenjem zavarivanja sa obje strane spoja uspješno su minimizirane deformacije i očuvana geometrijska tačnost.

Kontrola kvaliteta primjenom vizuelne (VT) i penetrantske (PT) metode potvrdila je visok nivo kvaliteta zavarenog spoja.

### **4. ZAKLJUČCI**

Korišćenjem odgovarajućih dodatnih materijala obezbjeđuje se pouzdan spoj između nerđajućih i konstrukcionih čelika.

Primijenjena kombinacija TIG i REL postupaka omogućila je ostvarivanje kvalitetnog i pouzdanog zavarenog spoja, uz kontrolisan unos toplote i ograničenje pojave nepovoljnih strukturnih promjena u zoni spoja.

Kontrolom tehnoloških parametara i redosljeda zavarivanja moguće je minimizirati deformacije i očuvati geometrijsku tačnost sklopa.

Primijenjeni postupak predstavlja efikasno i pouzdano rješenje za realizaciju raznorodnih zavarenih spojeva.

### **LITERATURA**

- [1] Li, X., Nie, J., Wang, X., Li, K., Zhang, H., Failure Analysis of Dissimilar Metal Welds between Ferritic Heat Resistant Steels and Austenitic Stainless Steels in Power Plant, Chinese Journal of Mechanical Engineering, 37 (2024), 1, 76.
- [2] Sonar, T., Ivanov, M., Trofimov, E., Liu, K., Shcherbakov, I., Shaburova, N., Samoiloovskikh, P., A critical review on dissimilar welding of ferritic-martensitic steel and austenitic stainless steel using gas tungsten arc welding process: Weldability issues, processing, and performance characteristics of joints, Journal of Manufacturing Processes, 133 (2025), pp. 811-864.
- [3] Giudice, F., Missori, S., Scolaro, C., Sili, A., A Review on Fusion Welding of Dissimilar Ferritic/Austenitic Steels: Processing and Weld Zone Metallurgy, Journal of Manufacturing and Materials Processing, 8 (2024), 96.
- [4] Lukić, B., Zavarivanje raznorodnih čelika, Stručna knjižara, Preduzeće za zavarivanje i intelektualne usluge, Užice, 2013.



Društvo za  
Zavarivanje  
Crne Gore

1. Konferencija sa međunarodnim učešćem

## „TEHNOLOGIJE SPAJANJA MATERIJALA“

14 - 16. maj 2026. godine, Bečići, Crna Gora



MAŠINSKI  
FAKULTET  
PODGORICA

**Edvard Bjelajac<sup>1,\*</sup>, Andrej Skumavc<sup>2</sup>, Tomaž Vuherer<sup>3</sup>,  
Nenad Gubelj<sup>3</sup>, Damjan Klobčar<sup>4</sup>, Gorazd Lojen<sup>3</sup>**

### **POREĐENJE ZAVARENIH SPOJEVA DOBIJENIH LASERSKIM POSTUPKOM ZAVARIVANJA U ATMOSFERI RAZLIČITIH ZAŠTITNIH GASOVA**

**Rezime:** Zavarivanje konstrukcionog čelika S235 u dekapiranom stanju urađeno je na laserskoj ćeliji Trumpf TruLaser 5000 kako bi se utvrdio utjecaj zaštitne atmosfere na parametre zavarivanja, mikrostrukturu i mehaničke osobine zavarenog spoja. Zavarene su tri serije uzoraka. Prve dvije serije uzoraka zavarene su u zaštitnoj atmosferi argona i azota. Treća serija uzoraka obrađena je bez upotrebe zaštitnog gasa. Pripremljeni su metalografski uzorci, ispitana je mikrostruktura i geometrija zavarenih spojeva. Na kraju su bila sprovedena ispitivanja na zatezanje i mjerenje tvrdoće.

**Ključne riječi:** lasersko zavarivanje, zaštitni gasovi, svojstva na zatezanje, tvrdoća

### **COMPARISON OF WELDS MADE WITH A LASER WELDING MACHINE UNDER DIFFERENT SHIELDING GASES**

**Abstract:** Welding of S235 pickled structural steel sheets was performed in a Trumpf TruLaser 5000 laser cell to determine the effect of the protective atmosphere on welding parameters, microstructure, and mechanical properties of the welded joint. Three series of samples were welded. The first two were produced in a protective atmosphere of argon and nitrogen. The third series of samples was processed without shielding gas. Metallographic cross-sections were prepared, the microstructure was examined, geometry of

<sup>1</sup> Messer Slovenija d.o.o., Ruše, Republic of Slovenia

<sup>2</sup> SIJ Acroni, Jesenice, Republic of Slovenia

<sup>3</sup> Faculty of Mechanical Engineering, University of Maribor, Maribor, Republic of Slovenia

<sup>4</sup> Faculty of Mechanical Engineering, University of Ljubljana, Ljubljana, Republic of Slovenia

\* Corresponding author, mail: edvard.bjelajac@messergroup.com

*welded joints was analyzed, tensile tests and hardness measurements were done.*

**Keywords:** laser welding, shielding gases, tensile properties, hardness

## **1. INTRODUCTION**

MAG welding with an active shielding gas or the MIG process using inert gas are the most commonly used arc process for joining metal materials in industrial practice. MAG processes are highly productive, and their productivity can be further increased by optimizing the composition of the shielding gas mixture. The advantages of the MAG process also include easy inspection of the welded joint, the possibility of precise observation of the weld pool, the possibility of combining a wide range of materials, good mechanical properties of joints, and easy mechanization and robotization of the welding process [1 - 3].

As the thickness of the base material decreases, technological problems arise in practice during MIG/MAG processes. These are mainly related to high heat input, resulting in internal stresses and deformations in the product [4, 5]. In addition, spatter often occurs, which reduces the aesthetic appearance of the weld and increases the amount of work required after welding [6].

Laser welding, with or without filler material, has recently become established for welding thin sheets of non-alloy structural steels, high-alloy steels, and non-ferrous metals. It should be noted that the laser heat source differs significantly from the classic MAG source. The metallurgical processes that take place during laser welding differ from those in arc welding methods. Consequently, the properties of laser-welded joints also differ from those achieved using conventional technologies [7 - 9].

One of the modern solutions in the field of laser welding are hand-held laser welding devices, which have been developing rapidly in recent years. They operate with a laser beam generated by power sources mostly between 1 kW and 3 kW. Currently, sources with a power of 2 kW are most commonly used in industrial environments [4, 10].

The choice of shielding gases depends on the base material. In MAG arc welding, argon-based shielding gases containing active components such as carbon dioxide, oxygen, nitrogen, and hydrogen, as well as the inert gas helium, are commonly used. The active components react with the base material and affect the mechanical properties in the weld area [11].

In laser welding, in addition to inert gas argon, nitrogen is also very often used as a basic shielding gas, for welding of unalloyed structural steels, high-alloy stainless steels, as well as non-ferrous metals [11].

The effect of nitrogen on steel during arc and laser welding was investigated by Kokawa [11]. He found that the absorption/desorption of nitrogen by molten metal is influenced by many factors, including the chemical composition of the base material, the partial pressure of the gas, the

equilibrium solubility of nitrogen, reaction rate, melt pool configuration, and its change over time. By defining these factors, it is possible to understand the absorption/desorption in the molten metal and make a quantitative prediction of the nitrogen content. It is assumed that the phenomenon can be understood by using empirical data on the chemical composition of materials and the welding process, taking into account only a few predominant factors. It should be noted that absorption/desorption of nitrogen is closely related to formation of porosity [11].

The aim of this research was to produce butt welds on the base material S235 by laser welding without a filler material. The laser beam power was the same for all samples, while the welding speed varied depending on the type of protective atmosphere. To determine the effect of shielding gases on microstructure, geometry, and mechanical properties of the welded joint, three groups of experiments were conducted: welding with argon, welding with nitrogen, and the third, welding in air, without any shielding gas. Microstructures of the welds were examined, geometries of weld metal and HAZ cross-sections analyzed, and tensile strengths and hardness were determined.

## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1. Material

For this study, 6 mm-thick structural steel S235JR+N, in accordance with EN 10025-2, was used as the base material. The chemical composition of the steel is presented in Table 1. According to EN 10204 3.1 ATEST of the steel, the yield stress of the steel ( $R_{eH}$ ) is 322 MPa, the ultimate tensile strength ( $R_m$ ) is 437 MPa, and the elongation of the steel ( $A_5$ ) is 34 %.

Table 1. Chemical composition of the base material S235 JR+M

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	N
0.14	0.51	0.01	0.011	0.006	0.03	0.01	0.01	0.034	0.004

### 2.2. Welding

Welding was carried out in a laser robotic cell TruLaser Weld 5000. A Trumpf fiber laser TruLaser 5000 was used in combination with a Kuka's six-axis high-precision industrial robot KR 30 HA, The robot payload capacity is 30 kg and its reach is 2033 mm. The robotic cell is shown in Figure 1.



Figure 1. The laser robotic cell TruLaser Weld 5000

The specimen designations and welding parameters are presented in Table 2. During the welding process, the laser power was kept constant at 3000 W. The focal position of the laser beam was varied, with the focal point located at different depths below the surface of the weldment ( $f = -2$  mm to  $-4$  mm), and the welding speed was also adjusted ( $v = 5$  mm/s to  $10$  mm/s). Consequently, the linear heat input varied in the range of  $0.3$  kJ/mm to  $0.6$  kJ/mm. Welding was performed either with or without shielding gas. When applied, the shielding gas was either argon or nitrogen, each at a flow rate of  $20$  l/min. The third laser welding was performed without any shielding gas.

Table 2. Designation of the specimens and parameter of laser welding

Specimen mark	LA-1	LA-2	LA-3	LA-4
$P = 3000$ W Shielding gas Ar	$f = -3$ mm $v = 5$ mm/s $Q = 0.6$ KJ/mm	$f = -3$ mm $v = 5$ mm/s $Q = 0.6$ KJ/mm	$f = -4$ mm $v = 5$ mm/s $Q = 0.6$ KJ/mm	$f = -2$ mm $v = 5$ mm/s $Q = 0.6$ KJ/mm
Specimen mark	LN-1	LN-2	LN-3	
$P = 3000$ W Shielding gas $N_2$	$f = -3$ mm $v = 5$ mm/s $Q = 0.6$ KJ/mm	$f = -3$ mm $v = 7$ mm/s $Q = 0.43$ KJ/mm	$f = -3$ mm $v = 8$ mm/s $Q = 0.375$ KJ/mm	-
Specimen mark	LB-1	LB-2	LB-3	
$P = 3000$ W Without gas	$f = -3$ mm $v = 5$ mm/s $Q = 0.6$ KJ/mm	$f = -3$ mm $v = 8$ mm/s $Q = 0.375$ KJ/mm	$f = -3$ mm $v = 10$ mm/s $Q = 0.3$ KJ/mm	-

### 2.3. Macro section and weld geometry measurement

We prepared macro-polished sections from all welded samples. Grinding was performed using wet-grinding papers with various grain sizes ranging from P100 to P1000. Final polishing was performed using  $0.5 \mu\text{m}$   $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Finally, the macro-polished surfaces were etched with 3 % nitric acid (3 % nital) for 15 seconds.

All macro samples were photographed and analyzed using a Leica Wild M10 light microscope. Particular attention was paid to the geometry of the welded joint, where the weld width (WW), root width (RW) and penetration depth (P) of the weld were measured (Figure 2). The face reinforcement (FR) and root reinforcement (RR) were also measured, as well as concavities, i.e. the weld face negative reinforcement (-FR) and negative root reinforcement (-RR) of the weld. The weld cross-sectional area was also measured.

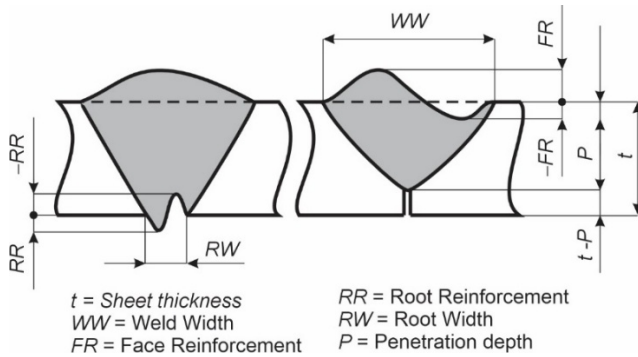


Figure 2. Measured weld geometry

### 2.3. Mechanical properties

Based on the best-measured weld geometry on the macro-grinds and welds free of any defects, we selected one weld from each group as a reference weld for further analysis.

The microstructure of the reference welds was analyzed, and Vickers hardness was measured using a 10 kg load. Hardness was measured in the root and root-face regions of the weld, as shown in Figure 3. At least three measurements were taken in each area (BM, HAZ, WM, HAZ, BM).

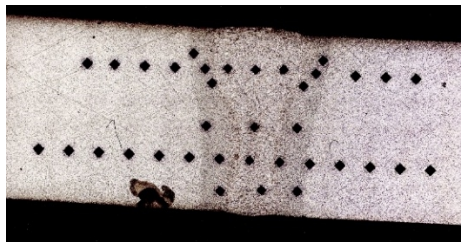


Figure 3. Vickers hardness measurements in the crown and root of the weld

Tensile tests were performed on the base materials of selected welded joints in accordance with EN ISO 6892-1[12], and tensile tests on the welded joints were performed in accordance with EN ISO 5178[13]. Two tensile tests were performed on each part using a flat tensile test specimen (10 mm wide and 6 mm thick). A total of 12 tensile tests were performed, 6 on the base metal and 6 on the welds.

### **3. RESULTS AND DISCUSSION**

#### **3.1. Macrosection**

Macrographs were prepared for all 10 welds, as shown in Figure 4. The figures include the focal length of the laser beam below the weld surface and the linear heat input. The first column shows macro-sections of laser welding where argon 4.6 was used as the shielding gas during welding. These welds are labelled LA-1 through LA-4. As can be seen, porosity is present in the weld, which we attempted to eliminate by adjusting the focal depth of the laser beam below the weld surface. We succeeded to some extent by increasing or decreasing the focal depth, but we achieved complete penetration only by reducing the focal depth to – 2 mm. This weld was then further analysed.

The middle column in Figure 4 shows samples of welds made in a nitrogen 5.0 shielding gas, labelled LN-1 through LN-3. In the first two samples, we achieved complete fusion, but not in the third, as the heat input was too low ( $Q = 0.375$  kJ/mm). In the first case, at the maximum heat input ( $Q = 0.6$  kJ/mm), occasional drips appeared at the root along the weld, so we selected weld LN-2 for further analysis.

The last column in Figure 4 shows macrographs of welds where no shielding gas was used during welding, labelled LB-1 through LB-3. In the case of the highest heat input LB-1 ( $Q = 0.6$  kJ/mm), a lack of material appeared at the crown and sagging at the root. In the case of the lowest heat input at LN-3 ( $Q = 0.3$  kJ/mm), we were unable to fully penetrate the weld, and an increased crown height of the weld also appeared. For this reason, we selected sample LB-2 for further analysis, where we were able to fully penetrate the weld without material loss at the crown and without an increased undercut at the root of the weld.

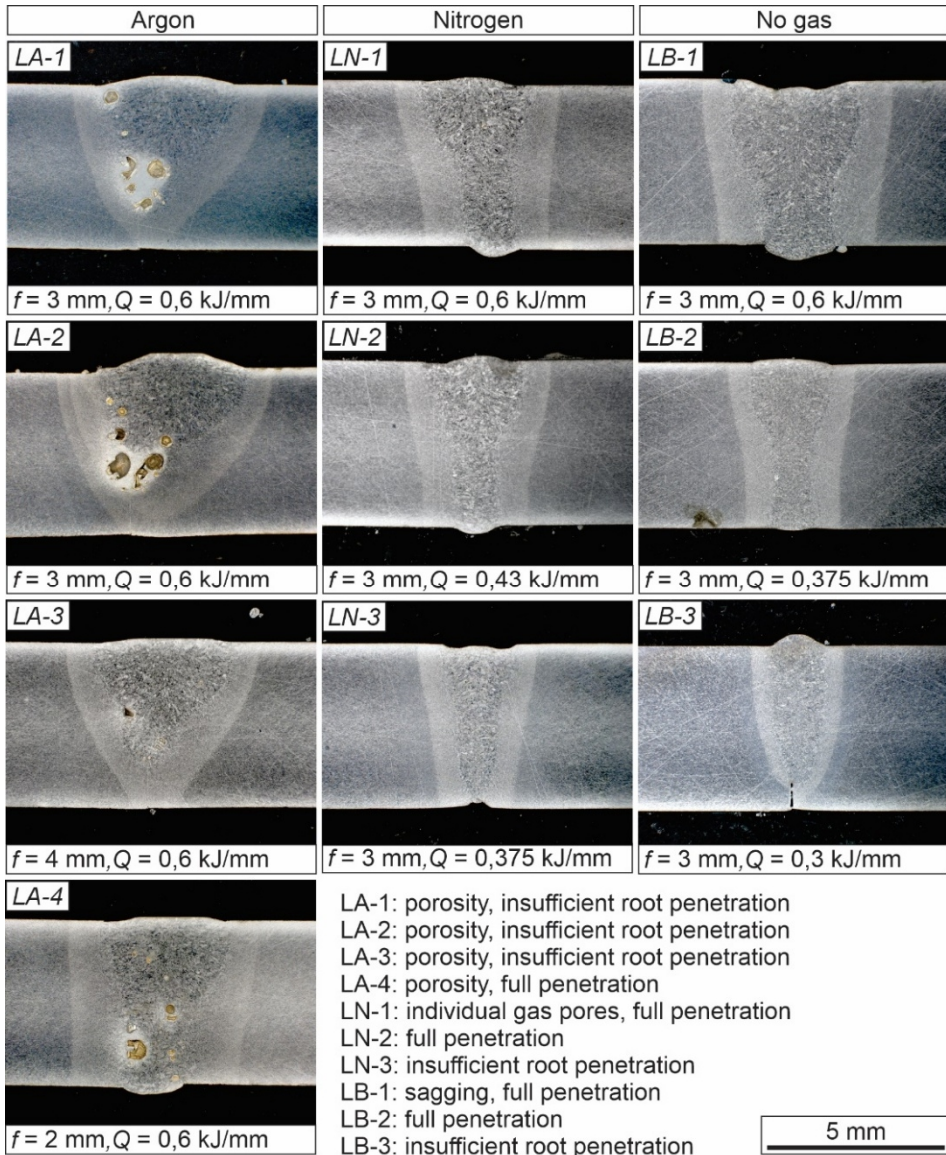


Figure 4. Macro-scale examination of laser-welded joints with different welding parameters and various shielding atmospheres

### 3.2. Analysis of weld geometry measurements results

The geometry of the welded joints on selected LA-4, LN-2, and LB-2 macro sections was analyzed in detail in accordance with the designations shown in Figure 5. The results of the measurements of the weld geometries and the surfaces of the weld sections are presented in Table 3 and Table 4.

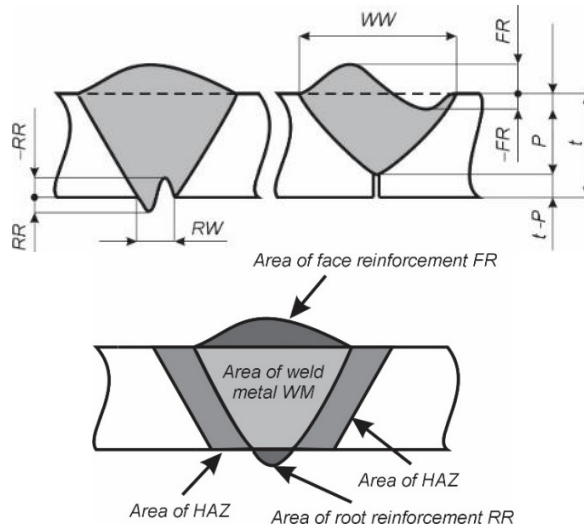


Figure 5. Weld geometry; a) dimensions; b) surfaces

Table 3. Analysis of dimensions of welded joints in accordance with Figure 5a

Specimen	LA-4	LN-2	LB-2
Weld face width $WW$ / mm	4.67	3.91	2.70
Face reinforcement $FR$ / mm	0.12	0.21	0.17
Root width $RW$ / mm	2.33	1.78	1.63
Root reinforcement $RR$ / mm	0.37	0.26	0.01
Max HAZ width / mm	2.08	1.39	1.1
Min. HAZ width / mm	1.08	0.79	0.78
Max. weld width of affected area / mm	7.16	5.49	4.80

Table 4. Analysis of the areas of welded joints according to Figure 5b

Specimen	LA-4	LB-2	LN-2
Face reinforcement $FR$ / mm <sup>2</sup>	3.46	0.38	0.28
Root reinforcement $RR$ / mm <sup>2</sup>	5.21	0.07	0.29
Weld metal area $WM$ / mm <sup>2</sup>	20.46	12.66	15.03
HAZ area / mm <sup>2</sup>	19.56	12.07	13.21
Weld metal + HAZ mm <sup>2</sup>	41.00	24.73	28.24
Porosity	Yes	No	No

The measured dimensions and surface areas show that the widest weld and the weld with the largest surface area is achieved when welding with argon; however, there may be a problem with insufficient penetration, as can be seen from the cross-sectional images. Porosity also occasionally occurs here due to trapped gases during welding and insufficient degassing of the weld pool. A wider heat-affected zone (HAZ) and a larger HAZ surface area are also observed in argon welding.

When comparing welding with nitrogen and without shielding gas, we observed that a welds of the same shape were achieved even when the heat inputs differer slightly. In the case of welding with nitrogen, an approximately 13 % higher heat input was necessary for the same weld area. This can be attributed to the difference in thermal conductivity between the individual gases. In both cases, however, it can be observed that there is no porosity in the weld. When the heat input is the same ( $Q = 0.6 \text{ kJ/mm}$ , Figure 4), we can observe a lack of material at the weld crown in the weld made without shielding gas and an increased sagging at the root of the weld. The root is also wider.

### 3.3. Hardness measurement results

Figures 6 through 8 show the results of Vickers hardness measurements using a 10 kg load in individual sections of the weld. In all three cases, the highest hardness is found in the weld. In the heat-affected zone, however, the hardness gradually decreases toward the base material as the distance from the weld increases. The lowest hardness was measured in the base material.

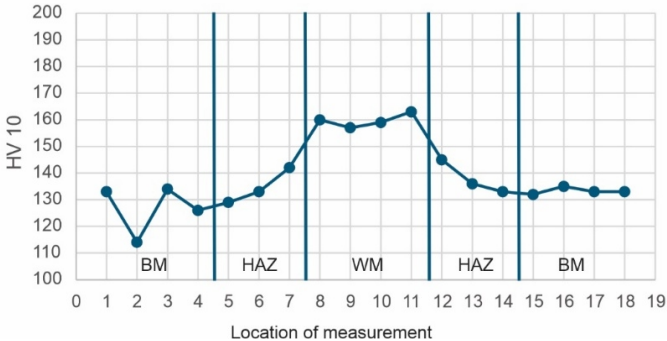


Figure 6. Hardness measurements on a laser-welded joint in an argon atmosphere – LA-4

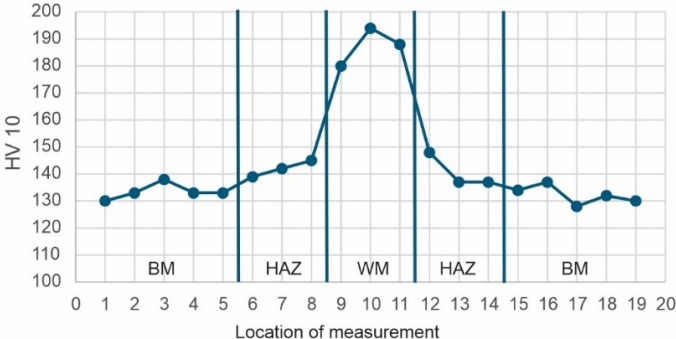


Figure 7. Hardness measurements on a laser-welded joint in a nitrogen atmosphere – LN-2

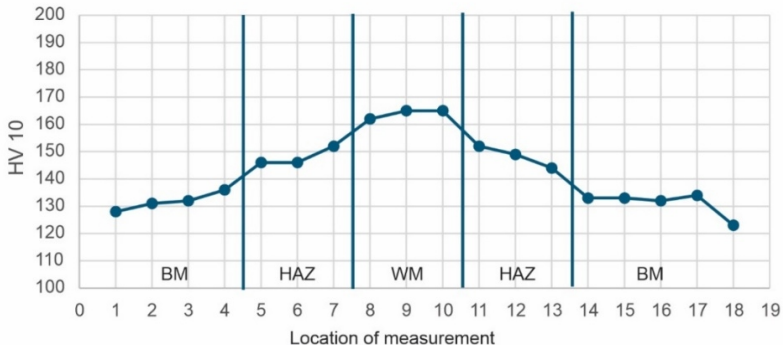


Figure 8. Hardness measurements on an unprotected laser weld – LB-2

We measured the highest hardness in the weld on the LN-2 sample, which was welded in a nitrogen shielding gas, where heat input was minimal. Compared to the base material, the hardness increased by approximately 50% to about 195 HV10.

The lowest hardness in the welds was measured in samples welded with argon shielding gas. The increase in hardness relative to the base material was approximately 23% in the weld, reaching about 160 HV10.

We observed a similar result in welding without shielding gas, where the increase in hardness in the weld compared to the base material was approximately 28% to 169 HV10. This weld, however, was made with the lowest heat input ( $Q = 0.375 \text{ kJ/mm}$ ) among the welds selected for analysis.

### 3.4. Results of tensile tests

A total of 12 test specimens were tested - 6 welded specimens and 6 made solely of the base material, with four from each series, Figure 9, Figure 10, and Figure 11. All fractures occurred in the base material. In the specimens with a weld in the middle, the material failed in the middle between the clamping and the weld; in the specimens without a weld, the failure occurred near the middle of the tensile specimen.

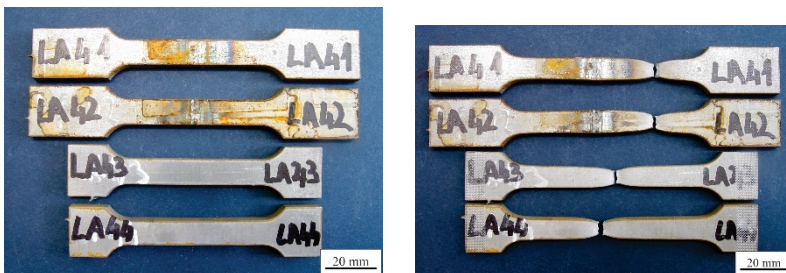


Figure 9. Tensile test specimens LA-4, welded with argon and base metal: (a) before and (b) after the tensile test

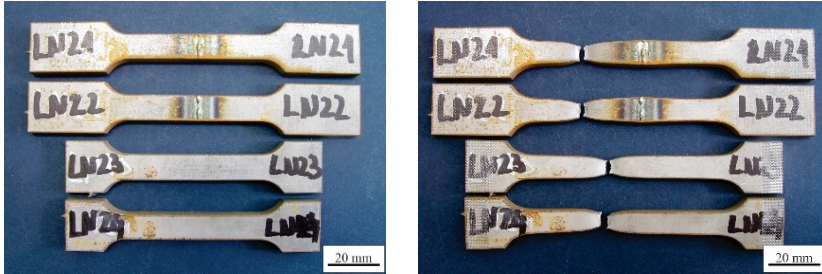


Figure 10. Tensile test specimens LN-2, welded with nitrogen and base metal: (a) before and (b) after the tensile test

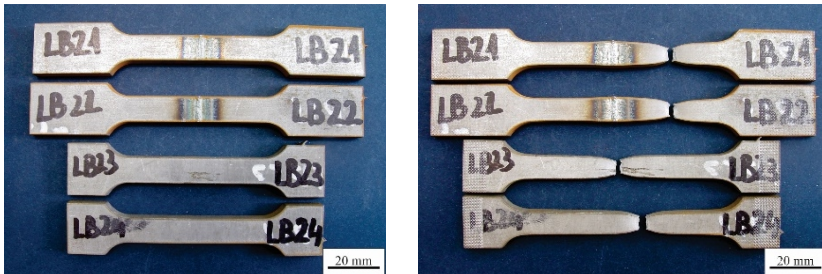


Figure 11. Tensile test specimens LB-2, welded without shielding gas and base metal: (a) before and (b) after the tensile test

As can be seen, all welded samples fractured in the base material, and the stress-strain curves were very similar to those of the base material. For this reason, we present only one typical tensile test curve, shown in Figure 12.

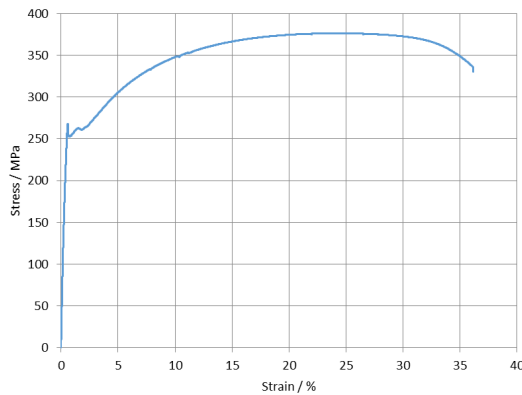


Figure 12. Strain-Stress diagram of the tensile test specimen LB-23

The results of the tensile tests are presented in Table 5, which shows the yield strength  $R_{p0.2}$  or  $R_{eH}$ , the tensile strength  $R_m$ , the elongation  $A$ , and the reduction in area  $Z$ . All the breaks are in the BM, so the results are very similar.

Table 5. Results of tensile tests on welds and base material

Specimen ID	$R_{p0.2}$ / MPa	$R_{eH}$ / MPa	$R_m$ / MPa	A / %	Z / %
LB21	243	-	380	34	75
LB22	229	-	378	34	68
LB23	268	268	376	33	58
LB24	260	261	374	35	47
LA41	248	-	383	33	69
LA42	241	-	382	32	63
LA43	263	263	374	34	43
LA44	264	267	376	33	71
LN21	251	-	381	33	65
LN22	240	-	382	34	70
LN23	257	262	376	34	50
LN24	262	265	376	33	60

#### 4. CONCLUSIONS

We compared the properties of laser welds made with argon and nitrogen as shielding gases, as well as without a shielding gas.

We optimized the welding parameters and conducted a detailed analysis of the welds produced using the optimized welding parameters.

It has been found that the type of shielding gas at laser welding significantly affects the weld geometry and the heat-affected zone.

We found that the choice of shielding gas affects the hardness of the weld. As expected, argon has the least effect on hardness.

The porosity of welded joints is highest when argon is used as a shielding gas.

The tensile test revealed no differences in the measured values among the samples under consideration, as all fractures occurred in the base material.

#### REFERENCES

- [1] D. Stanisz, T. Machniewicz, S. Parzych, G. Jeż, L. Dvorkin, and M. Hebda, Microstructure and Mechanical Properties of Joints Depending on the Process Used, *Materials*, vol. 15, no. 15, Aug. 2022, doi: 10.3390/ma15155171.
- [2] A. K. Sehgal, An investigation of variable welding current on impact strength of metal inert gas welded specimen, in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2020, pp. 3679–3682. doi: 10.1016/j.matpr.2020.10.151.
- [3] K. R. Madavi, B. F. Jogi, and G. S. Lohar, Metal inert gas (MIG) welding process: A study of effect of welding parameters, in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2021, pp. 690–698. doi: 10.1016/j.matpr.2021.06.206.

- [4] H. Danielewski et al., Numerical and metallurgical analysis of laser welded, sealed lap joints of s355j2 and 316l steels under different configurations, *Materials*, vol. 13, no. 24, pp. 1–22, Dec. 2020, doi: 10.3390/ma13245819.
- [5] E. Dogan, M. Ay, M. Kurtulmus, A. I. Yukler, and A. Etyemez, Effects of welding parameters on the angular distortion of welded steel plates, *Open Chem.*, vol. 20, no. 1, pp. 417–423, Jan. 2022, doi: 10.1515/chem-2022-0152.
- [6] M. Suban, Determination of Stability of MIG/MAG Welding Processes, *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 17, pp. 345–353, (2001).
- [7] I. Vishev, C. P. Feuring, and O. Bringmann, Implementation and evaluation of an echo state network for a quality inspection system for laser welding, in *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., 2021, pp. 496–501. doi: 10.1016/j.procir.2021.03.070.
- [8] G. Casalino, S. L. Campanelli, U. D. Maso, and A. D. Ludovico, Arc leading versus laser leading in the hybrid welding of aluminium alloy using a fiber laser, in *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., 2013, pp. 151–156. doi: 10.1016/j.procir.2013.09.027.
- [9] A. Sadeghian and N. Iqbal, A review on dissimilar laser welding of steel-copper, steel-aluminum, aluminum-copper, and steel-nickel for electric vehicle battery manufacturing, Feb. 01, 2022, Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.optlastec.2021.107595.
- [10] P. Zhang et al., A review on the effect of laser pulse shaping on the microstructure and hot cracking behavior in the welding of alloys, Aug. 01, 2021, Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.optlastec.2021.107094.
- [11] H. Kokawa, Nitrogen absorption and desorption by steels during arc and laser welding, *Welding International*, vol. 18, no. 4, pp. 277–328756, 2004, doi: 10.1533/wint.2004.3235.
- [12] ISO 6892-1Metallic materials-Tensile testing-Part 1: Method of test at room temperature. [Online]. Available: [www.randb.co.kr](http://www.randb.co.kr),
- [13] ISO 5178, 2001.





Društvo za  
Zavarivanje  
Crne Gore

1. Konferencija sa međunarodnim učešćem

## „TEHNOLOGIJE SPAJANJA MATERIJALA“

14 - 16. maj 2026. godine, Bečići, Crna Gora



**Marko Frajzman<sup>1\*</sup>, Zoran Kožuh<sup>1</sup>, Jadranka Eržišnik<sup>1</sup>,  
Natalija Dolić<sup>2</sup>**

### **SPECIFIČNOSTI FIBER LASERSKOG ZAVARIVANJA TITANIJA**

**Rezime:** *Titanij i njegove legure se sve više koriste kao inženjerski materijal zbog svojih karakterističnih svojstava. Široka primjena titanija se prvenstveno bazira na povoljnom omjeru visoke čvrstoće i težine, korozivnoj postojanosti i dobroj oblikovljivosti. Unatoč izvrsnim svojstvima, proces zavarivanja ovih materijala je izrazito zahtjevan zbog visoke kemijske reaktivnosti titanija na povišenim temperaturama. Apsorpcija vodika, kisika i dušika često dovodi do stvaranja plinskih pora, koje smanjuju poprečni presjek spoja i postaju mjesta inicijacije pukotina, čime se direktno narušava čvrstoća konstrukcije. Zavarivanje fiber laserom time se nameće kao jedna od mogućih tehnologija spajanja ove vrste metala zbog svoje visoke koncentracije energije i uske zone utjecaja topline. U eksperimentalnom dijelu rada provedeno je obostrano sučeono zavarivanje fiber laserom ploča od titanija Gr. 2 sa i bez dodatnog materijala. Nakon zavarivanja provedena je analiza mikrostrukture i tvrdoće ispitnih uzoraka.*

**Ključne riječi:** titanij, lasersko zavarivanje, mehanička svojstva

### **SPECIFICS OF FIBER LASER WELDING OF TITANIUM**

**Abstract:** *Titanium and its alloys are increasingly used as engineering materials due to their characteristic properties. The widespread application of titanium is primarily based on its favourable high strength-to-weight ratio, corrosion resistance, and good formability. Despite these excellent properties, the welding process for these materials is highly demanding due to the high chemical reactivity of titanium at elevated temperatures. The absorption of*

---

<sup>1</sup> University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, Zagreb, Republic of Croatia

<sup>2</sup> University of Zagreb, Faculty of Metallurgy, Zagreb, Republic of Croatia

\* Corresponding author, mail: marko.frajzman@fsb.unizg.hr

*hydrogen, oxygen, and nitrogen often leads to the formation of gas pores, which reduce the cross-section of the joint and become crack initiation sites, directly compromising the structural strength. Fiber laser welding is thus emerging as a viable joining technology for this type of metal due to its high energy concentration and narrow heat-affected zone. In the experimental part of this study, double-sided Fiber laser butt welding was performed on Grade 2 titanium plates, both with and without filler material. Following the welding process, an analysis of the microstructure and hardness of the test samples was conducted.*

**Keywords:** titanium, laser welding, mechanical properties

## **1. INTRODUCTION**

Laser welding of pure titanium (Ti Gr. 2) using a Fiber laser is distinguished by its high precision, low heat input and narrow heat-affected zone, which minimizes distortion and preserves the material's desired corrosion resistance [1]. This enables the production of high-quality joints across a wide range of thicknesses and component complexities, particularly in aerospace, medical implants and the chemical industry [1]. A key characteristic is titanium's high reactivity with oxygen, nitrogen and hydrogen at elevated temperatures ( $>450^{\circ}\text{C}$ ), which requires strict inert-gas shielding (argon) on both the front and back sides of the weld joint [2]. The shielding gas prevents the formation of brittle  $\alpha$ -phase, oxidation and weld embrittlement, since insufficient protection can cause discoloration, porosity and a significant reduction in mechanical and corrosion properties [2]. Thanks to its high laser-beam power density, the Fiber laser enables welding with deep and narrow penetration as well as extremely rapid cooling [3]. As a result, the fusion zone undergoes a transition from equiaxed  $\alpha$ -grains to coarser equiaxed or acicular  $\alpha$ -grains, accompanied by a slight hardness increase of 10–20 % depending on the process parameters [4]. Owing to its high reactivity at elevated temperatures, its tendency to absorb atmospheric gases and its propensity to form brittle intermetallic compounds, titanium welding demands extremely precise process control and high-quality protection of the weld [5].

## **2. EXPERIMENT**

Within the experimental work, two samples of Grade 2 titanium were prepared. The samples were made from square plates measuring  $150 \times 150$  mm with a thickness of 7 mm. Double-sided butt welding of the test samples was carried out in the PA position (HRN EN ISO 6947:2019 [6]) using an automated Fiber laser welding process. One sample (1) was welded with filler material, while the other sample (2) was welded without filler material. The shielding gas used during welding was pure argon, designation I1 4.8 (HRN EN ISO 14175:2008 [7]). The filler material was a wire with the trade

name Daiko Ti 2, diameter 1.2 mm. Welding of the test samples was performed on the BUG-O SYSTEMS MPD-1002 welding carriage, and a HUGONG HGLW/HGLC-3000E device was used as the Fiber laser. Prior to welding, the workpiece plates were thoroughly cleaned and degreased with 96 % denatured ethanol, the edges were aligned into a butt joint, and the plates were clamped in a fixture.

For both samples, the laser beam power was set to 2000 W, the welding speed was 40 cm/min, the shielding gas flow rate was 12 L/min, and the scanning with ( $s_w$ ) was 5 mm. After welding, the welded samples were cut with a band saw at the marked cross-sections into dimensions suitable for microstructural analysis and mechanical testing (hardness measurement). Following cutting, the samples for microstructural analysis underwent rough grinding on a Mecatech 250 machine using abrasive papers with grit sizes P80, P120, P240, P320, and finally P400. Polishing was performed on the same machine with grit sizes P500, P1000, P2000, and finally P4000. After polishing, the samples were etched in an acid solution consisting of 10 ml hydrofluoric acid, 5 ml nitric acid, and 85 ml distilled water for 30 seconds. Figure 1 shows the samples after polishing and etching.

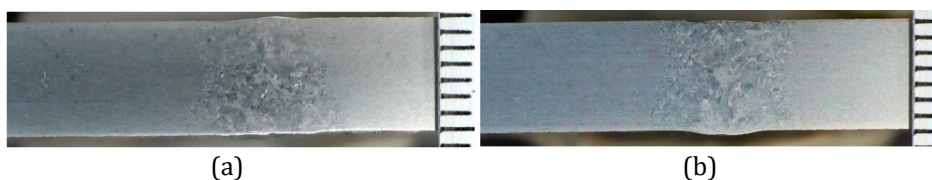


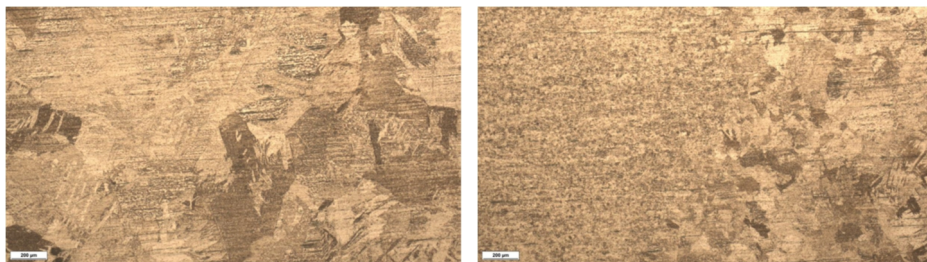
Figure 1. (a) Sample 1, (b) Sample 2 after polishing and etching

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

#### 3.1. Microstructure Analysis

Microstructural analysis of sample 1 (Figure 2a) shows that the structure in the weld metal zone is lamellar. The lamellae are uniformly distributed due to the rapid cooling typical of laser welding. The microstructure is homogeneous with no significant variations in lamella morphology. The base metal microstructure (Figure 2b) consists of relatively large  $\alpha$ -grains with a globular morphology. The grains are homogeneously distributed throughout the volume without visible orientation or preferential growth. The heat-affected zone is shown on the right side (Figure 2b). A progressive transition from the globular structure of the base metal to the lamellar structure of the weld metal is visible. On the side of the heat-affected zone closer to the weld metal, a coarse lamellar structure is observed, resulting from the transformation of the  $\beta$ -phase formed during welding (due to reaching approximately 800°C) back into the  $\alpha$ -phase upon cooling. On the side of the heat-affected zone closer to the base metal, the structure varies between

globular and lamellar. Due to heating to higher temperatures, the grains are recrystallized and larger than in the base metal.



(a)

(b)

Figure 2. Microstructure of sample 1; (a) weld metal, (b) base metal and heat-affected zone

Microstructural analysis of the weld metal of sample 2 (Figure 3a) shows a lamellar structure in the weld metal zone, similar to sample 1. However, in sample 2 the structure is coarser and more irregular with larger lamellae. The microstructures of the weld metal in the two samples differ because sample 2 had no filler material, so all the energy of the laser beam was used to melt the base metal. The base metal structure (Figure 3b) is the same as in sample 1. The heat-affected zone structure of sample 2 (Figure 3b) is lamellar but coarser than in sample 1.



(a)

(b)

Figure 3. Microstructure of sample 2; (a) weld metal, (b) base metal and heat-affected zone

### 3.2. Analysis of Hardness Measurement Results

Hardness testing of the samples was performed using the Vickers HV10 method (test force 98.04 N). Measurements were repeated at three levels on each sample (upper, middle, and lower part) according to HRN EN ISO 9015 to obtain sufficient data for result comparison. Emphasis was placed on measuring the hardness of the weld metal zone.

Analysis of the hardness profile results for sample 1 (Figure 4a) shows that the base metal exhibits uniform hardness with average values between 154

HV10 and 166 HV10. Approaching the heat-affected zone, an increase in hardness is visible. The maximum values were recorded at the transition between the base metal and the heat-affected zone, ranging from 206 HV10 to 216 HV10. The highest value of 216 HV10 was measured on the middle measurement line. The hardness of the weld metal gradually decreases toward the center, where the lowest value of 193 HV10 was recorded on the middle line. The increase in hardness in the weld zone compared to the base metal is approximately 30 %, which is a common occurrence in laser welding of titanium due to rapid cooling and the formation of specific microstructural phases.

Analysis of the hardness measurement results for sample 2 (Figure 4b), which was welded without filler material, shows a similar trend of hardness increase in the weld zone, but with specific variations in distribution. The base metal retains consistent values between 157 HV10 and 166 HV10, confirming the uniformity of hardness in Grade 2 titanium base metal. In the weld metal and heat-affected zone, a characteristic hardness change profile is observed, most pronounced on the upper and lower measurement lines. Maximum hardness values reach up to 208 HV10 at the transition between the base metal and the heat-affected zone. In sample 2 (Figure 4b) there is a more pronounced drop in hardness in the center of the weld metal, where values fall to 172 HV10 on the upper line and 179 HV10 on the lower line. Measurements on the middle line revealed a narrower hardness increase zone compared to sample 1 (Figure 4a). Hardness values range from 195 to 208 HV10, indicating a narrower fusion zone of the base metal during welding without filler material. It is important to note that the measured values in both samples remain well below the critical limit of 250 HV10.

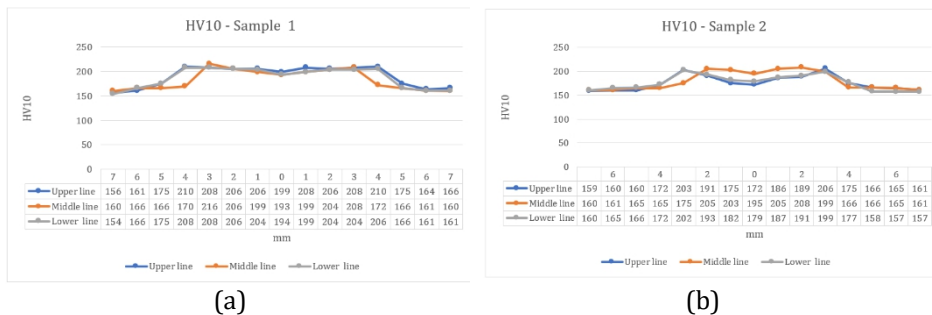


Figure 4. Hardness measurement results; (a) sample 1, (b) sample 2

#### 4. CONCLUSIONS

Based on the microstructural analysis and hardness measurement results of test samples 1 and 2, the following conclusions can be drawn regarding the suitability of the applied technology for welding titanium:

- The use of filler material results in a homogeneous microstructure

characterized by finer grains and a more uniform hardness profile in the welded joint area.

- Welding without filler material leads to a coarse-grained microstructure in the fusion zone and more pronounced hardness variations within the weld metal.
- Higher hardness values were obtained in the sample where filler material was used.

Based on the conducted tests, the use of filler material is recommended in Fiber laser welding of Grade 2 titanium to achieve more favourable microstructural characteristics and better mechanical properties.

## **ACKNOWLEDGEMENTS**

This paper has been funded by the European Union (NextGenerationEU) under the National Recovery and Resilience Plan 2021–2026 (NRRP), through the UNIZAG FSB institutional project “An integral approach to the strategy of data structuring for the application of artificial intelligence in the production and exploitation of welded structures”, approved by the Ministry of Science, Education and Youth of the Republic of Croatia (component C3.2, source 581).

## **REFERENCES**

- [1] Yu, S., Wang, Y., The influence of laser welding process parameters on welding joint of TA15 titanium alloy sheets, *Journal of Physics: Conference Series*, 3006 (2025), 1, p. 012026.
- [2] Li, J., Yu, H., Yin, X., Kong, B., Wen, K., Sun, Q., Zeng, X., Welding characteristics of medium titanium plates with autogenous laser welding and narrow-gap laser filling welding modes, *Materials*, 17 (2024), 19, 4722.
- [3] Li, Y., Gao, Y., Pan, H., Tao, D., Zhang, H., Keyhole Depth Prediction in Laser Deep Penetration Welding of Titanium Alloy Based on Spectral Information, *Metals*, 15 (2025), 5, 527.
- [4] Abdulridha, M. M., Jilabi, A. S. J. A. Z., Effect of fibre laser welding parameters on the microstructure and weld geometry of commercially pure titanium, *Archives of Materials Science and Engineering*, 117 (2022), 1, pp. 34-41.
- [5] Chen, T., Wang, Z., Pang, X., Tong, Y., Ji, X., Zhang, M., Jia, Q., The effect of laser oscillating welding on formation and properties of titanium alloy, *Surface Review and Letters*, 32 (2025), 03, 2450119.
- [6] HRN EN ISO 6947:2019.
- [7] HRN EN ISO 14175:2008.



Društvo za  
Zavarivanje  
Crne Gore

1. Konferencija sa međunarodnim učešćem

## „TEHNOLOGIJE SPAJANJA MATERIJALA“

14 - 16. maj 2026. godine, Bečići, Crna Gora



MAŠINSKI  
FAKULTET  
PODGORICA

**Mirza Manjgo<sup>1</sup>, Gorazd Lojen<sup>1</sup>, Rene Peklar<sup>1</sup>, Jure Bernetič<sup>2</sup>,  
Tomaž Vuherer<sup>1,\*</sup>**

### **ISPITIVANJE MEHANIČKIH SVOJSTAVA ZAVARENOG SPOJA OD OKLOPNOG ČELIKA OSTVARENOM UPOTREBOM AUSTENITNOG NERĐAJUĆEG DODATNOG MATERIJALA**

**Rezime:** U ovom radu analiziran je uticaj procesa zavarivanja na mehanička svojstva oklopnog čelika SA 500. Kao dodatni materijal korištena je žica od austenitnog nerđajućeg čelika EZ-MIG 307Si. Budući da zavarivanje kao termički proces dovodi do degradacije osnovnog materijala, koji pripada grupi čelika ultra-visoke čvrstoće i tvrdoće, izvršena je analiza mehaničkih svojstava svih zona zavarenog spoja. Eksperimentalna ispitivanja obuhvatila su ispitivanje zatezanjem i mjerenje tvrdoće. Dobijeni rezultati pokazali su da zavareni spoj ima do 50% manju tvrdoću i nižu zateznu čvrstoću u odnosu na osnovni materijal. Rezultati ukazuju na značaj izbora dodatnog materijala u cilju optimizacije performansi zavarenih spojeva kod oklopnih čelika.

**Ključne riječi:** oklopni čelik, zavareni spoj, mehanička svojstva.

### **INVESTIGATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF AN ARMOUR STEEL WELDED JOINT PRODUCED USING AUSTENITIC STAINLESS FILLER MATERIAL**

**Abstract:** This work investigates the influence of the welding process on the mechanical properties of SA 500 armour steel. Austenitic stainless steel wire EZ-MIG 307Si was used as the filler material. Since welding, as a thermal process, leads to degradation of the base material, which belongs to the group of ultra-high-strength and high-hardness steels, an analysis of the mechanical properties of all welded joint zones was performed. Experimental investigations included tensile testing and hardness measurements. The

<sup>1</sup> Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, Maribor, Republika Slovenija

<sup>2</sup> SAAT d.o.o., Bled, Slovenija

\* Korespondentni autor, mail: tomaž.vuherer@um.si

*obtained results showed that the welded joint exhibits up to 50 % lower hardness and reduced tensile strength compared to the base material. The results highlight the importance of filler material selection in order to optimize the performance of welded joints in armour steels.*

**Keywords:** armour steel, welded joint, mechanical properties.

## 1. UVOD

U savremenim inženjerskim primjenama, oklopni čelici zauzimaju posebno mjesto zbog svoje sposobnosti da obezbijede visok nivo zaštite uz relativno povoljnu masu konstrukcije. Njihova primjena je najizraženija u vojne svrhe, gdje se koriste za izradu oklopnih vozila, transportera, tenkova, zaštitnih barijera, kao i različitih vrsta balističke zaštite. Osnovni zahtjevi koji se postavljaju pred ove materijale uključuju visoku tvrdoću, čvrstoću, otpornost na habanje, ali i dovoljnu žilavost kako bi se spriječilo krto lomljenje pri udarnim opterećenjima. Upravo kombinacija ovih, često suprotstavljenih svojstava, čini razvoj i obradu oklopnih čelika kompleksnim i tehnološki zahtjevnim procesom [1-2].

Standardni postupci proizvodnje oklopnih čelika zasnivaju se na pažljivo kontrolisanim termomehaničkim procesima, pri čemu ključnu ulogu imaju postupci kaljenja i otpuštanja. Nakon valjanja i oblikovanja, čelici se podvrgavaju kaljenju, čime se postiže martenzitna mikrostruktura visoke tvrdoće. Međutim, kako bi se smanjila zaostala naprezanja i poboljšala žilavost, materijal se zatim podvrgava niskotemperaturnom otpuštanju. Ovim postupkom se postiže optimalan balans između čvrstoće i žilavosti, što je presudno za balističke performanse. Rezultat su čelici izuzetno visokih mehaničkih svojstava, koji mogu efikasno apsorbovati i raspršiti energiju projektila [3-4].

U realnim konstrukcijama od oklopnih čelika, neizbježna je primjena tehnologija spajanja, pri čemu zavarivanje predstavlja dominantan postupak. Međutim, upravo zavareni spoj često predstavlja najkritičniji dio konstrukcije. Razlog tome leži u činjenici da se tokom zavarivanja lokalno dostižu visoke temperature koje prevazilaze temperature niskotemperaturnog otpuštanja osnovnog materijala. Time dolazi do promjene mikrostrukture u zoni uticaja toplote (ZUT), što za posljedicu ima smanjenje tvrdoće, čvrstoće i otpornosti na penetraciju. Ova degradacija može značajno narušiti ukupne performanse konstrukcije, posebno u balistički zahtjevnim uslovima [5].

Pored problema vezanih za ZUT, dodatni izazov predstavlja izbor dodatnog materijala, odnosno žice za zavarivanje. Naime, ne postoje komercijalno dostupne žice koje mogu u potpunosti replicirati visoka mehanička svojstva oklopnih čelika. Kao posljedica toga, u metalu šava se obično dobijaju znatno niža mehanička svojstva u odnosu na osnovni materijal. U praksi se ovaj problem često rješava primjenom austenitnih nerđajućih žica, koje iako

nemaju visoku tvrdoću, posjeduju dobru žilavost i otpornost na pucanje, posebno u uslovima visokih naprezanja i dinamičkih opterećenja [6].

U posljednje vrijeme, više naučnih istraživanja bilo je usmjereno na analizu ponašanja zavarenih spojeva oklopnih čelika uz primjenu austenitnih dodatnih materijala. Na primjer, rad autora Zhang i sar. [7] analizirao je mikrostrukturne promjene i raspodjelu tvrdoće u zavarenim spojevima visokočvrstih oklopnih čelika korištenjem austenitne žice. Takođe, Kumar i sar. [8] istraživali su mehanička svojstva i otpornost na pucanje u zavarenim spojevima oklopnih čelika sa austenitnim dodatnim materijalom, naglašavajući uticaj unosa toplote. Nadalje, Savić i sar. [9] fokusirali su se na optimizaciju parametara MIG zavarivanja oklopnih čelika sa ciljem smanjenja degradacije ZUT-a, pri čemu su koristili austenitnu nerđajuću žicu kao dodatni materijal. Ovi radovi potvrđuju značaj pravilnog izbora dodatnog materijala i kontrolisanih parametara zavarivanja.

U ovom radu opisan je postupak MAG zavarivanja oklopnog čelika pri čemu je poseban naglasak stavljen na minimiziranje unosa toplote tokom procesa. Kao dodatni materijal korištena je EZ-MIG 307Si žica, a parametri zavarivanja su pažljivo odabrani s ciljem smanjenja širine i degradacije zone uticaja toplote. Ideja je bila da se bez pregrijavanja osnovnog materijala očuvaju njegova mehanička svojstva u što većoj mjeri.

Nakon izrade zavarenog spoja, izvršena su ispitivanja mehaničkih svojstava kako bi se ocijenio kvalitet spoja i stepen degradacije materijala. Ispitivanja su obuhvatila mjerenje tvrdoće duž presjeka zavarenog spoja, sa posebnim fokusom na zonu uticaja toplote, kao i ispitivanje zatezne čvrstoće. Dobijeni rezultati omogućavaju bolji uvid u uticaj smanjenog unosa toplote na očuvanje mehaničkih svojstava, te predstavljaju osnovu za dalju optimizaciju tehnologije zavarivanja oklopnih čelika.

## **2. EKSPERIMENT**

### **2.1. Materijali i zavarivanje**

Kao osnovni materijal u ovom radu korišten je oklopni čelik SA 500 (proizvođača Swenor Armour, Luleå, Švedska), debljine 8 mm. Ovaj materijal pripada grupi visokočvrstih čelika, sa nominalnom tvrdoćom od približno 500 HB, te je namijenjen za balističku zaštitu od projektila brzine manje od 1000 m/s. Kao dodatni materijal korištena je žica za zavarivanje od austenitnog nerđajućeg čelika EZ-MIG 307Si, prečnika 1,2 mm. Zahvaljujući povišenom sadržaju mangana, ova žica omogućava povećanu otpornost na pojavu hladnih pukotina u metalu šava. Hemijski sastav osnovnog i dodatnog materijala prikazan je u Tabeli 1, dok su njihove mehaničke osobine prikazane u Tabeli 2.

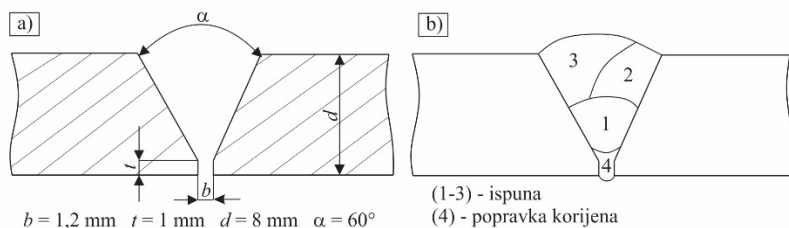
Tabela 1. Hemijski sastav osnovnog i dodatnog materijala (mas. %) [10, 11]

Materijal	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	P+S
SA 500	0,3	1,0	1,2	0,8	0,6	0,5	0,005
EZ-MIG 307Si	0,07	0,7	6,9	18,5	8,0	-	-

Tabela 2. Mehaničke osobine osnovnog i dodatnog materijala [10, 11]

Materijal	SA 500	EZ-MIG 307Si
Napon tečenja, $R_{p0.2}$ (MPa)	1200	> 350
Zatezna čvrstoća, $R_m$ (MPa)	1700	> 500
Izduženje, $A_5$ (%)	10,0	> 25
Udarna osobina, $KV$ (J)	35 (-40°C)	> 100 (20°C)
Tvrdoća (HB)	480÷530	200÷420

Dvije ploče osnovnog materijala pripremljene su za izradu sučeonog zavarenog spoja, u skladu s geometrijom prikazanom na Slici 1a. Kao postupak zavarivanja odabran je MAG postupak, pri čemu je zavarivanje izvedeno uz primjenu industrijskog robota OTC FD-V8L (Daihen Varstroj, Lendava, Slovenija) te izvora zavarivanja Welbee 500 (Daihen Varstroj, Lendava, Slovenija). Redosljed izvođenja prolaza zavara prikazan je na slici 1b, dok su odgovarajući parametri zavarivanja za sve prolaze sistematizirani u Tabeli 3. Tokom procesa nije bilo potrebe za primjenom predgrijavanja osnovnog materijala.



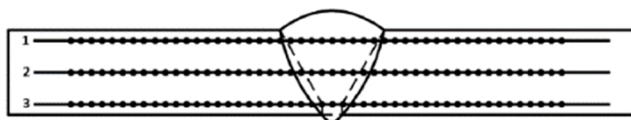
Slika 1. Zavareni spoj; a) geometrija sučeonog spoja; b) redosljed prolaza zavarivanja

Tabela 3. Parametri zavarivanja

Postupak: 135 (MAG); Protok plina: 18 l/min; Osnovni materijal: SA 500 d = 8 mm Dodatni materijal: EZ-MIG 307Si (EN ISO 14343-A: G 18 8 Mn) $\phi = 1,2$ mm				
Parametri zavarivanja	1	2	3	4
Jačina struje (A)	110	131	144	141
Napon (V)	18,7	19,5	20,3	20,4
Polaritet	DC+	DC+	DC+	DC+
Brzina zavarivanja (m/min)	25	25	25	25
Unos toplote (kJ/cm)	3,9	4,9	5,6	5,5

## 2.2. Mjerenje tvrdoće

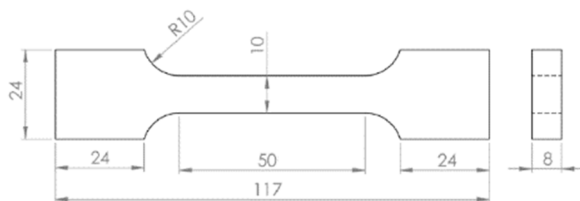
Tvrdoća zavarenog spoja određena je primjenom Vickersove metode ispitivanja tvrdoće (HV10), u skladu sa standardom EN ISO 9015-1 [12]. Ispitivanje je izvršeno na uređaju Zwick 3202 (ZwickRoell, Ulm, Njemačka), pri opterećenju od 98,1 N i vremenu zadržavanja sile u trajanju od 10 do 15 sekundi. Prije mjerenja, uzorci su metalografski pripremljeni standardnim postupkom koji je obuhvatao brušenje (brusnim papirima granulacije od P200 do P1200), zatim fino poliranje (suspenzijom glinice granulacije 0,3  $\mu\text{m}$ ). Nakon toga je izvršeno hemijsko nagrivanje 3 % otopinom nitala, s ciljem jasne identifikacije mikrostrukturnih zona zavarenog spoja (metal šava, zona utjecaja topline i osnovni materijal). Mjerenje tvrdoće provedeno je duž cijelog presjeka uzorka u tri karakteristične linije: (1) tjeme vara, (2) sredina vara i (3) korijen vara, što je shematski prikazano na Slici 2. U svakoj od navedenih linija izvršeno je po 50 pojedinačnih mjerenja (utisaka), kako bi se dobila detaljna raspodjela tvrdoće od metala šava preko zone utjecaja topline do osnovnog materijala. Dobivene vrijednosti tvrdoće izražene u Vickersovoj skali (HV10) dodatno su preračunate u Brinellovu skalu (HB), u skladu sa zahtjevima važećih standarda za oklopne čelike, radi lakše usporedbe i interpretacije rezultata.



Slika 2. Shematski prikaz mjerenja tvrdoće po cijelom uzorku

## 2.2. Ispitivanje na zatezanje

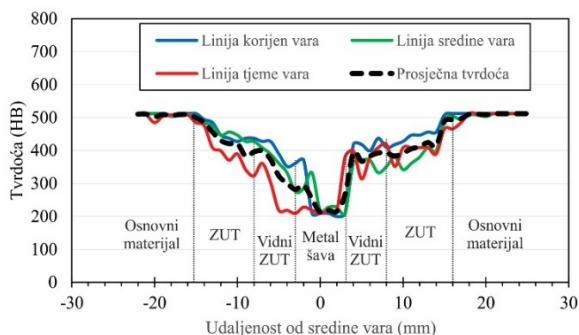
Ispitivanje zateznih osobina provedeno je u skladu sa standardom EN ISO 6892-1 [13] na servo-hidrauličnoj kraljici Amsler 20 t (ZwickRoell, Ulm, Njemačka). Za potrebe ispitivanja pripremljena su ukupno četiri uzorka: dva uzorka iz osnovnog materijala i dva uzorka iz zavarenog spoja. Geometrija uzoraka definirana je u skladu s važećim standardom i prikazana je na Slici 3.



Slika 3. Geometrija zateznog uzorka

### 3. REZULTATI

Rezultati raspodjele tvrdoće po zonama zavarenog spoja prikazani su dijagramski na Slici 3. Sa dijagrama je moguće uočiti distribuciju tvrdoće kroz različite zone zavarenog spoja, pri čemu su analizirane tri linije mjerenja: korijen vara, sredina vara i tjeme vara. Također je prikazana i prosječna vrijednost tvrdoće dobijena na osnovu sva tri mjerenja. Prosječne vrijednosti tvrdoće za svaku pojedinačnu zonu zavarenog spoja prikazane su u Tabeli 4.



Slika 3. Raspodjela tvrdoće kroz zone zavarenog spoja

Tabela 4. Rezultati mjerenja tvrdoće po zonama zavarenog spoja

Zona	Prosječna tvrdoća (HB)	Minimalna vrijednost (HB)	Maksimalna vrijednost (HB)	Standardna devijacija (HB)
Osnovni materijal	507	485	512	8,3
ZUT	410	333	475	38,9
Vidni ZUT	360	418	418	45,6
Metal šava	238	200	399	57,0

U cilju određivanja zateznih osobina osnovnog materijala i zavarenog spoja, proveden je zatezni eksperiment. Rezultati ispitivanja za sve analizirane uzorke prikazani su u Tabeli 5.





Tabela 5. Rezultati zateznog ispitivanja

Uzorak	$R_{p0.2}$ (MPa)	$R_m$ (MPa)	$A_5$ (%)
1-OM	1427	1578	7,4
2-OM	1415	1532	7,3
Prosjek	1421	1555	7,4
1-ZS	581	650	4,9
2-ZS	644	874	5,7
Prosjek	613	762	5,3

\*OM - osnovni materijal; ZS - zavareni spoj;  $R_{p0.2}$  - napon tečenja;  
 $R_m$  - zatezna čvrstoća;  $A_5$  - izduženje

U Tabeli 6 su prikazane slike prelomnih površina zateznih uzoraka te područje u kojem se lom desio.

Tabela 6. Prelomne površine zateznih uzoraka i područja loma

Uzorak	1-OM	2-OM	1-ZS	2-ZS
Prelomna površina uzorka				
Područje loma	OM	OM	Metal šava	Metal šava

#### 4. ZAKLJUČCI

Oklopni čelici spadaju u grupu teško zavarljivih i tehnološki zahtjevnih materijala. Konstrukcije oklopnih vozila nezamislive su bez zavarenih spojeva, koji ujedno predstavljaju najkritičnije dijelove takvih konstrukcija. Izbor dodatnog materijala, tehnologije zavarivanja, kao i optimizacija parametara procesa, imaju presudan uticaj na kvalitet i pouzdanost zavarenog spoja. U ovom radu analiziran je oklopni čelik SA 500, pri čemu je primijenjena MAG tehnologija zavarivanja uz upotrebu dodatnog materijala od austenitnog nerđajućeg čelika. Proces zavarivanja izveden je bez predgrijavanja, uz kontrolisan unos toplote. Kvalitet zavarenog spoja ocijenjen je na osnovu ispitivanja mehaničkih svojstava, odnosno tvrdoće i zatezne čvrstoće. Rezultati mjerenja tvrdoće pokazali su da osnovni materijal posjeduje tvrdoću od 507 HB, dok je u zoni uticaja toplote zabilježeno smanjenje tvrdoće za približno 20÷30%, a u metalu šava smanjenje od oko 50% usljed primjene odabranog dodatnog materijala. Ispitivanja zateznih svojstava ukazala su na visok napon tečenja i zateznu čvrstoću osnovnog materijala, ali i izraženu krtoš loma. S druge strane, zavareni spoj ostvario je zatezna svojstva u skladu s kataloškim vrijednostima, koja su niža u odnosu na osnovni materijal, ali uz znatno povoljnije, žilavije karakteristike loma. Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da primijenjena kombinacija MAG postupka i austenitnog dodatnog materijala omogućava postizanje zavarenog spoja zadovoljavajućih mehaničkih svojstava, uz poboljšanu žilavost, što predstavlja kompromis između čvrstoće i otpornosti na lom, te potvrđuje opravdanost ovakvog pristupa pri zavarivanju oklopnih čelika.

## LITERATURA

- [1] Li, D., Huang, F., Ren, B., Zhang, W., Xiong, J., Zhou, B., Guo, X., Ballistic analysis of high-performance armor steel by numerical simulation, *Scientific Reports*, 14 (2024).
- [2] Cheng, Y.H., Wu, H., Jiang, P.F., Fang, Q., Ballistic resistance of high-strength armor steel against ogive-nosed projectile impact, *Thin-Walled Structures*, 183 (2023).
- [3] Jena, P.K., Mishra, B., Babu, R.M., Babu, A., Singh, A.K., Kumar, S.K., Bhat, T.B., Effect of heat treatment on mechanical and ballistic properties of a high strength armour steel, *International Journal of Impact Engineering*, 37 (2010).
- [4] Basmaci, M., Saklakoglu, I.E., Classification of modern armor steels, history, material properties and heat treatment procedures, *International scientific journal machines technologies materials*, 3 (2025).
- [5] Nicolescu, C., Tiganescu, T.V., Antoniac, A., Iorga, C., Ghiban, B., Pascu, A., Streza, A., Antoniac, J., Mechanical Properties and Ballistic Performance for Different Coatings on HARDOX 450 Steel for Defense Applications, *Crystals*, 15(8) (2025).
- [6] Gürol, U., Çelik, C., Çoban, O., Göçmen, M., Koçak, M., Mechanical and ballistic performance of high-hardness armor steels welded with ASS-LHF sandwich joint design, *Materials Today Communications*, 42 (2025).
- [7] Zhang, Q., Zhuo, Z., Wang, J., Microstructure analysis and hardness prediction based on microstructure evolution theory in multi-pass welded joint, *Journal of Mechanical Engineering Science*, 236 (2022).
- [8] Kumar, N., Balasubramanian, Malarvizhi, Rahman, Balaguru, Effect of welding consumables on shielded metal arc welded ultra-high hard armour steel joints, *J. Mech. Behav. Mater*, 31(1) (2022).
- [9] Savić, B., Čabrilo, A., Effect of Heat Input on the Ballistic Performance of Armor Steel Weldments, *Materials*, 14(13) (2021).
- [10] Swebor, Swebor Armor™ 500 Ballistic Protection Steel: Product data sheet, 2025.
- [11] CEWELD, 307Si Welding Wire (ER307Si), Austenitic Stainless Steel MIG/MAG Filler Metal for Dissimilar and Armor Steel Welding, Product Catalogue, 2023.
- [12] EN ISO 9015-1:11, Destructive tests on welds in metallic materials — Hardness testing — Part 1: Hardness test on arc welded joints, European Committee for Standardization, Brussels, 2011.
- [13] EN ISO 6892-1:19, Metallic materials — Tensile testing — Part 1: Method of test at room temperature, European Committee for Standardization, Brussels, 2019.



Društvo za  
Zavarivanje  
Crne Gore

1. Konferencija sa međunarodnim učešćem

## „TEHNOLOGIJE SPAJANJA MATERIJALA“

14 - 16. maj 2026. godine, Bečići, Crna Gora



**Đorđe Hadži Đokić<sup>1</sup>, Mladen Mitić<sup>2,\*</sup>, Nikola Jović<sup>3</sup>, Dragan Mitić<sup>2</sup>**

### **UPOREĐIVANJE POSTUPAKA MAG-IBE-135 I SS-FCAW 114 ZAVARIVANJE BLOKOVA TRAMVAJSKIH SKRETNICA OD COGIDURA**

**Rezime:** U radu se upoređuju postupci MAG-IBE 135 i SS-FCAW 114 zavarivanja blokova od Cogidura (W-n 1.8715 grupa 3.2) tramvajskih skretnica sa podloškom od bakra. MAG postupkom je zavarivano sa punom žicom Ø1,2 mm a SS-FCAW punjenom žicom Ø2,0 mm. Takođe je dat uporedni pregled ispitivanja bez razaranja vizuelnom metodom (VT), ispitivanje penetrantima (PT) i ispitivanje ultrazvučnom metodom. (UT) kao i makrošlif sa ispitivanjem tvrdoće.

**Ključne riječi:** tramvajska skretnica, Cogidur, SS-FCAW, MAG-IBE

### **COMPARING PROCEDURES MAG-IBE 135 AND SS-FCAW 114 WELDING BLOCKS OF COGIDUR TRAM SWITCHES**

**Abstract:** This paper compares the MAG-IBE 135 and SS-FCAW 114 welding processes applied to Cogidur blocks (W.nr. 1.8715, group 3.2) used in tramway switches, welded with a copper backing. In the MAG process, welding was performed using a solid wire with a diameter of Ø1.2 mm, while the SS-FCAW process used a flux-cored wire with a diameter of Ø 2.0 mm. In addition, a comparative overview of non-destructive testing (VT, PT, UT) is presented, as well as macro-etch examinations and hardness testing.

**Keywords:** tramway switch, Cogidur, SS-FCAW, MAG-IBE

<sup>1</sup> Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet, Niš, Republika Srbija

<sup>2</sup> Nivar d.o.o., Niš, Republika Srbija

<sup>3</sup> Vossloh MIN skretnice d.o.o., Niš, Republika Srbija

\* Korespondentni autor, mail: mitanivar@gmail.com

## 1. UVOD

Postupci kojim se spajaju tramvajske skretnice prema standardu EN 14811 su:

- Aluminotermijsko zavarivanje (AT),
- Elektrootporno zavarivanje (ET),
- Zavarivanje samozaštitnom punjenom žicom (FCAW),
- Zavarivanje MAG-IBE postupkom sa punom žicom.

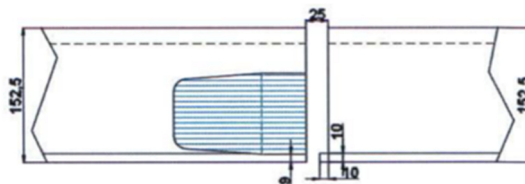
Elektrootporno zavarivanja šina ET se najčešće upotrebljava u radioničkim uslovima, mada danas postoje mobilni uređaji za zavarivanje na terenu, dok se najčešće upotrebljava aluminotermijsko zavarivanje šina (AT), kako u radionici, tako i na terenu. Od 1996 godine, američka firma Lincoln Electric uz odobrenje Deutsche Bahn AG, počinje da primenjuje zavarivanje samozaštitnom punjenom žicom FCAW za spajanje šinskih skretnica od materijala čvrstoće  $685\text{N/mm}^2$  do  $885\text{N/mm}^2$  (za pruge sa osovinskim opterećenjem od 10 t i brzinom manjom od 80 km/h).

Pošto je zavarivanje samozaštitnom žicom američka tehnologija zavarivanja, dodatni materijal i oprema za zavarivanje ovim postupkom je proizvedena u Sjedinjenim Američkim Državama (SAD). U Evropi, a naročito u Francuskoj se javila želja, da se tramvajske skretnice zavaruju evropskom tehnologijom, dodatnim materijalom i opremom koja se proizvodi u Evropi. Tako je nastao postupak zavarivanja šina, i blokova MAG postupkom, gde se na pištolju postavlja nastavak, kako bi se moglo zavarivati u žlebu dubine preko 150 mm.

## 2. EKSPERIMENT

### 2.1. Osnovni materijal

Prilikom izrade tramvajskih skretnica na ukrštajima, izvršena je zamena šina blokovima od Cogidura (Hardox 400), zbog veće tvrdoće blokova. Na njima se nakon zavarivanja mašinskom obradom pravi žleb, kao kod šine. Materijal blokova je Cogidur (1.8715 grupa 3.2) tvrdoće veće od 400HB.



Slika 1. Crtež pripreme spoja blokova

Tabela 1. Hemijske karakteristike osnovnog materijala

Osn. Mat	C %	Mn %	Si %	Ni %	Cr %	Mo %	Ti %	V %	Cu %
Cogidur	0,17	1,3	0,42	0,47	1,8	0,1	0,005	0,003	0,35

Tabela 2. Mehaničke karakteristike osnovnog materijala

Osnovni materijal	Rm N/mm <sup>2</sup>	Rv N/mm <sup>2</sup>	L %	Pv (J)	Tvrdoća HB
Cogidur	1355	1005	13	-40°C 53J	414-427

## 2.2. Metodologija rada

Pre zavarivanja, blokovi se postavljaju na rastojanju od 25 mm. Ivice blokova su obrušene do metalnog sjaja, a nakon provjere centričnosti blokova, postavljaju se stege, koje ih drže na tačnom rastojanju. Nakon toga se postavljaju bakarni podmetači sa strane blokova, dok je pre toga postavljen bakarni podmetač sa žlebom ispod blokova. Pre samog zavarivanja, predgrevaju se blokovi propan-butan gasom u dužini od 500 mm levo i desno od spoja, kako bi se materijal predgrejao po dubini bloka. Temperatura predgrevanja iznosi 150°C, a maksimalna je 200°C. Nakon predgrevanja, blokovi zavaruju se u dva prolaza, a nakon toga se skidaju bakarni podmetači i blokovi se zavaruju kroz još jedan prolaz.



Slika 2. Predgrevanje spoja



Slika 3. Kontrola temperature predgrevanja

Pošto su postavljeni bakarni podmetači, ponovo se vrši predgrevanje, zato što dolazi do gubitka toplote i podhlađivanja materijala, jer postavljanje bakarnih podmetača na predhodno zagrejani spoj nije lako izvesti i zahteva veštinu zavarivača. Tokom procesa, meri se temperatura materijala blokova i ako ona ne odstupa više od 10% od preporučene vrednosti, nastavlja se sa zavarivanjem i to neprekidno sve dok se ne dođe do nekih 30 mm do kraja visine spoja. Tada se sklanjaju bakarni podmetači, zavar se očisti od šljake pneumatskim uređajem sa vibrirajućim žicama. Sledećih 30 mm visine spoja

se zavaruje nerđajućom elektrodnom žicom MAG-IBE postupkom, a kod SS-FCAW postupka navaruje se samozaštitnom žicom za navarivanje tvrdoće oko 30HRC. Sve vreme zavarivanja prate se vrednosti jačine struje, koje minimalno odstupaju od vrednosti koje su date u WPS listi.



Slika 4. Zavareni spoj - presek po visini

### 2.3. Dodatni materijal za zavarivanje spoja

Za zavarivanje blokova od Cogidura MAG-IBE postupkom, korištena je elektrodna žica EN 14341-A G42 5 M/CG3Si1, komercijalne oznake OK AristoRod 12.50, prečnika  $\varnothing 1,2$  mm. Zadnjih 30 mm zavaruje se nerđajućom elektrodnom žicom EN 14343-A G 18 8 Mn, komercijalne oznake OK Autrod 16.95, prečnika  $\varnothing 1,2$  mm.

Tabela 3. Hemijski sastav dodatnog materijala

Dodatni materijal	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Ni %	Mo %	Ti %	Cu %
OK AristoRod 12.50	0,07	0,87	1,46	0,009	0,013	0,02	0,01	0,01	/	0,02
OK AutRod 16.95	0,08	0,9	6,9	0,03	0,01	19,0	8,1	0,02	/	/

Tabela 4. Mehaničke karakteristike dodatnog materijala

Dodatni materijal	Rm (N/mm <sup>2</sup> )	Rv (N/mm <sup>2</sup> )	Izduženje (%)	Pv (J)
OK AristoRod 12.50	560	480	26	-40°C 60
OK AutRod 16.95	640	450	41	-20°C 130

Za zavarivanje blokova od Cogidura SS-FCAW postupkom, korištena je samozaštitna elektrodna žica EN 17632 T 38 Z V N3, komercijalne oznake NS 3M, prečnika  $\varnothing 2,0$  mm, a zadnjih 30 mm navarivano je sa samozaštitnom elektrodnom žicom EN 14700 T Fe 1, komercijalne oznake Lincore 33, prečnika žice  $\varnothing 2,0$  mm.

Tabela 5. Hemijski sastav dodatnog materijala

Dodatni materijal	C %	Si %	Mn %	Al %	Cr %
Innershield NS-3M	0,2	0,26	0,36	1,36	/
Lincore 33	0,15	0,7	2,0	1,6	2,0

Tabela 6. Mehaničke karakteristike dodatnog materijala

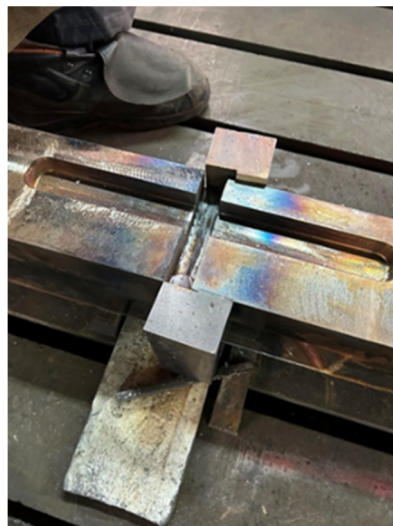
Dodatni materijal	Rm (N/mm <sup>2</sup> )	Rv (N/mm <sup>2</sup> )	A5 (%)
Innershield NS -3M	570	410	26

## 2.4. Zavarivanje

Postoje dve tehnike zavarivanja, u prvoj električni luk se vodi po sredini spoja, ali se zavaruje sa većim vrednostima jačine struje. Druga tehnika podrazumeva niže vrednosti jačine struje, ali se električni luk usmerava u jednom prolazu na levu stranu spoja, a u drugom prolazu na desnu stranu. Ova tehnika omogućava veće uvarivanja u bokove.



Slika 5. Zavarivanje SS-FCAW postupak



Slika 6. Izgled zavarenog spoja pre navarivanja

Predgrevanje uzorka kod MAG-IBE postupka je na temperaturi od 200°C, a kod zavarivanja SS-FCAW je na 150°C. Nakon zavarivanja MAG-IBE postupkom uzorak se dogreva na temperaturu od 200°C u trajanju od 1h, a nakon toga se pokriva vatrostalnim platnom i ostavlja da se polagano hladi, dok kod zavarivanja SS-FCAW postupkom nema dogrevanja nakon zavarivanja, ali se uzorak pokriva vatrostalnim platnom.

Parametri zavarivanja MAG-IBE postupkom dati su u WPS listi, a vrednost

jačine struje se kreće od  $250 \div 270$  A, napon je oko 29 V, brzina zavarivanja od  $25 \div 27$  cm/min, zavisno da li se zavaruje podnožje spoja ili se zavaruju završni prolazi. Unos toplote se kreće između 1,22 KJ/mm do 1,39 KJ/mm. Parametri zavarivanja SS-FCAW postupkom dati su u WPS listi, a vrednost jačine struje se kreće od  $300 \div 320$  A, napon je oko 30 V, brzina zavarivanja od  $22 \div 24$  cm/min, zavisno da li se zavaruje podnožje spoja ili se zavaruju završni prolazi. Unos toplote se kreće između 1,83 KJ/mm do 2,09 KJ/mm.



Slika 7. Zavareni uzorak SS-FCAW

### 3. REZULTATI I DISKUSIJA

#### 3.1. Ispitivanje bez razaranja

Nakon 24h od zavarivanja, izvršena je vizuelno dimenzionalna kontrola, kako samog zavarenog spoja, tako i paralelnost blokova, kao i moguća deformacija - skupljanje. Posle su urađena ispitivanja penetrantskom tečnošću i ultazvukom zavarenih uzoraka. Kritično mesto je kada se skidaju bakarni kalupi i nakon čišćenja i predgrevanja kada se nastavlja sa zavarivanjem. Tada se mogu javiti greške, kao što su nalepljivanje i nemetalni uključci.

#### 3.2. Ispitivanje sa razaranjem

Pošto su rezultati ispitivanja bez razaranja uzoraka bili zadovoljavajući za oba postupka, uzorci su podvrgnuti ispitivanju sa razaranjem (makrostruktura i tvrdoća). Uzorak koji je zavaren MAG-IBE postupkom je dinamički ispitan na lom sa promenljivim opterećenjem. Ispitivanje sa razaranjem je obavila laboratorija RD Dijagnostika d.o.o. Beograd, koja ima ovlašćenje od TUV, SUD Industrie Service GMBH.



Slika 7. Ispitivanje ultrazvučnom metodom



I-II

Slika 8. Makrošlif zavarenog uzorka MAG-IBE postupkom



1114/26 (PA)

Slika 9. Makrošlif zavarenog uzorka SS-FCAW postupkom

### 3.3. Ispitivanje tvrdoće (MAG-IBE postupak)

Tabela 7. Vrednosti ispitivanja tvrdoće

Art./Last: - Type / Load: - Type / Charge: HV 10 – nur informationen / only information

Nr. No. N°	Meßreihe Measuring Line Ligne de mesure	Grundwerkstoff Base Material Métal de base			WEZ HAZ ZAT			Schweißgut Weld Metal Métal déposé			WEZ HAZ ZAT			Grundwerkstoff Base Material Métal de base		
366/24	1-5-11-7-3	423	425	420	212	214	216	161	164	158	225	224	221	430	428	427
366/24	2-6-13-8-4	426	419	422	215	218	219	163	161	157	218	216	220	431	426	424
366/24	1-5-11-7-3	421	420	425	214	212	215	159	157	155	224	220	218	432	430	427
366/24	2-6-13-8-4	420	421	427	218	220	221	161	162	158	219	223	225	428	427	424
366/24	1-5-11-7-3	414	424	426	208	210	212	158	156	154	224	221	218	420	424	425
366/24	2-6-13-8-4	422	425	427	211	213	215	159	161	163	216	214	217	415	417	419
366/24	1-5-11-7-3	417	419	421	210	212	215	157	159	161	215	217	218	421	419	417
366/24	2-6-13-8-4	415	414	418	213	216	218	155	157	159	210	212	214	414	415	418

Tabela 8. SS-FCAW postupak

HARTEPRÜFUNG EN ISO 9015 \*)  
HARDNESS TEST \*) - ESSAI DE DURETÉ \*)

Lage der Messungen (Skizze) \*)  
Location des mesures (croquis) \*)



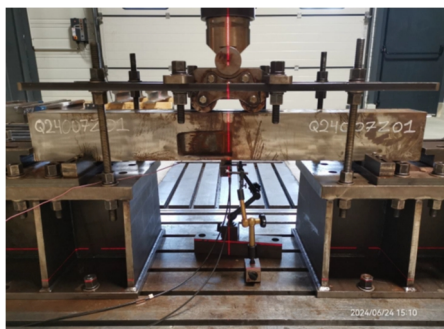
Art./Last: - Type / Load: - Type / Charge: HV 10 (Anforderung / requirement: max – 425 Hv)

Nr. No. N°	Meßreihe Measuring Line Ligne de mesure	Grundwerkstoff Base Material Métal de base			WEZ HAZ ZAT			Schweißgut Weld Metal Métal déposé			WEZ HAZ ZAT			Grundwerkstoff Base Material Métal de base		
111425	1-5-11-7-3	376	385	391	335	337	340	301	304	305	344	346	351	388	392	401
111425	2-6-13-8-4	368	395	405	311	333	342	311	318	321	366	369	378	377	384	398

### 3.4 Ispitivanje na lom

Test opterećenja je urađen na uzorku QJB429 AWBW Cogidur an Cogidur-VMS, prema proceduri T15002P01, ukupne dužine uzorka 1200 mm, koji je zavaren MAG-IBE postupkom u preduzeću VOSSLOH MIN SKRETNICE d.o.o. Niš. Test savijanja u četiri tačke je obavljen u Tehnološkom centru Vossloh Cofiger u Reichshoffen-Francuska. Rastojanje između oslonca je iznosilo 1100 mm. Amplituda savijanja je merena sa dva laserska senzora.

Pre ispitivanja izvršena je sertifikacija hidrauličkog cilindra i etaloniranje laserskih senzora. Maksimalno opterećenje iznosilo je 130 MPa sa amplitudom od 13 do 130 MPa, broj ciklusa 3.000.000, a frekvencija 5 Hz. Ispitivanje je urađeno u periodu od 24.06. do 01.07.2024.



Slika 10. Uređaj za ispitivanje na lom

Nakon ispitivanja na lom nije nađena prslina u zavarenom spoju, što znači da je zavarivanje uspešno urađeno.

Ispitivanje uzorka od Cogidura na lom nije urađeno, zato što je u prethodnom periodu urađeno ispitivanje uzoraka šina-šina i šina-blok od Cogidura. Oba uzorka su uspešno prošli ispitivanje na lom, s tim što je uzorak šina-šina izdržao frekvenciju od 5200000 ciklusa, nakon čega se pojavila prslina u zavarenom spoju ali manja od 3 mm.

#### **4. ZAKLJUČCI**

Zavarivanje MAG-IBE postupkom je mnogo zahtevnije nego što je zavarivanje samozaštitnom žicom, zbog toga što je mnogo manji unos toplote MAG postupkom, te je mogućnost pojave nalepa na bokovima mnogo izvesnija.

Takođe produktivnost MAG postupkom je značajno manja nego zavarivanje SS-FCAW postupkom. Pored toga niža je temperatura predgrevanja, a nije potrebno dogrevanje zavarenog uzorka.

Tvrdoća u ZUT-u daleko je manja kod MAG-IBE postupka ( $210 \div 225$  HV) u odnosu na SS-FCAW postupak ( $311 \div 370$  HV). Međutim, penetracija zavara u bokove spoja daleko je veća kod SS-FCAW postupka zavarivanja, što se vidi ako pogledamo unos toplote koji kod MAG-IBE iznosi od  $1,22 \div 1,39$  KJ/mm, dok kod SS-FCAW iznosi  $1,83 \div 2,09$  KJ/mm.

Iz svega napred navedenog sledi zaključak da je zavarivanje SS-FCAW postupkom daleko pouzdanije i produktivnije i da ne zahteva veliku preciznost u radu i striktno poštovanje parametara zavarivanja.

Kod MAG-IBE postupka, trebalo bi proveriti zavarivanje sa žicom prečnika  $\varnothing 1,6$  mm, kako bi se dobio veći unos toplote, a samim tim i bolja penetracija zavara u zidove spoja.

#### **LITERATURA**

- [1] Atlas of Fatigue Curves ASM International Materials Park, Ohio 44073-0002.
- [2] Kralj S, Dunđer M, Ispitivanje sklonosti zavarenih spojeva čelika 25 CrMo4 i Ck45 prema nastajanju hladnih pukotina, Zavarivanje (0044-1902) 43 (2000) 1/2, 5-16 43.
- [3] Kou S, Welding Metallurgy Handbook, 2nd ed. New York, USA, John Wiley and Sons, 2002.





Društvo za  
Zavarivanje  
Crne Gore

1. Konferencija sa međunarodnim učešćem

## „TEHNOLOGIJE SPAJANJA MATERIJALA“

14 - 16. maj 2026. godine, Bečići, Crna Gora



MAŠINSKI  
FAKULTET  
PODGORICA

**Josip Pavić<sup>1</sup>, Dejan Marić<sup>2,\*</sup>, Ivan Samardžić<sup>2</sup>, Tomislav Šolić<sup>2</sup>,  
Marko Dunder<sup>2</sup>, Josip Mijić<sup>2</sup>**

### **KOMPENZATORI ZA TLAČNU PRIMJENU - PROJEKTIRANJE I PRIMJENA**

**Rezime:** U radu je opisano iskustvo Đuro Đaković Kompenzatori d.o.o. pri projektiranju i primjeni pojedinih tipova metalnih kompenzatora. Opisani su najutjecajnije parametri pri projektiranju: tlak, temperatura, medij, sistem cjevovoda i pomaci koji će djelovati na metalne kompenzatore, kao i odabrani primjeri primjene.

**Ključne riječi:** metalni kompenzatori, parametri projektiranja, primjena

### **METAL BELLOWS EXPANSION JOINTS FOR PRESSURE APPLICATIONS – DESIGN AND APPLICATION**

**Abstract:** The paper describes the experience of Đuro Đaković Kompenzatori d.o.o. in designing and applying certain types of metal bellows expansion joints. The most influential design parameters are described: pressure, temperature, medium, pipeline system and displacements that affect metal bellows expansion joints, as well as selected application examples.

**Keywords:** metal bellows expansion joints, design parameters, application

#### **1. UVOD**

Kompenzacija izduženja cijevi izloženih pomicanju uslijed djelovanja temperature, tlaka i vanjskih izvora dugo je godina bila rješavana na razne načine. Najefikasniji način je bio upotrijebiti svojstva prirodne fleksibilnosti cijevnog sistema iskorištavajući koljena i tako oblikovati prirodne lire. Ubrzo su ekspanziona lire postale skupe u pogledu materijala i zauzimanja

<sup>1</sup> Đuro Đaković Kompenzatori d.o.o., Slavonski Brod, Republika Hrvatska

<sup>2</sup> Sveučilište u Slavonskom Brodu, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, Republika Hrvatska

\* Korespondentni autor, mail: dmaric@unisb.hr

prostora, a bile su ograničene i dopuštenim naprezanjima cijevi na savijanje. Rješenje ovog problema pronađeno je u pažljivom hladnom valjanju tankostijene cijevi u harmoniku kompenzatora (Slika 1), koji može biti stisnut ili rastegnut bez izazivanja prekomjernog naprezanja materijala ili stvaranja neprihvatljivih protu-sila koje bi djelovale na čvrste točke cjevovoda [1, 5].



Slika 1. Oblikovanje valova harmonike

## 2. KLASIFIKACIJA KOMPENZATORA

Danas su metalni kompenzatori sa jednoslojnom i/ili višeslojnom tankostijenom harmonikom univerzalno prihvaćeno rješenje kompenzacije izduženja cjevovoda.

U skladu sa HRN EN 14917, a prema vrsti pomaka koji mogu prihvatiti, kompenzatori se dijele na četiri osnovna tipa kako slijedi [2, 5]:

- a) Aksijalni
  - nespregnuti opterećeni unutarnjim tlakom
  - nespregnuti opterećeni vanjskim tlakom
  - spregnuti opterećeni unutarnjim tlakom
- b) Kutni
  - zglobni
  - kardanski
- c) Poprečni
  - dvostruki spregnuti s dva vijka
  - dvostruki spregnuti s dvije poluge
  - dvostruki spregnuti s više vijaka
  - dvozglobni
  - dvokardanski
- d) Univerzalni

### 3. STANDARDI I PARAMETRI PROJEKTIRANJA KOMPENZATORA

Đuro Đaković Kompensatori d.o.o., harmonike i kompenzatore, projektira, proizvodi i ispituje u skladu sa slijedećim standardima [1, 4]:

- EJMA Expansion Joint Manufacturers Association
- HRN EN 14917 Metalni kompenzatori za tlačnu primjenu
- AD2000-Merkblatt
- ASME B31.1 Power Piping
- ASME B31.3 Process Piping

Kompenzatori su sastavni dijelovi posuda pod tlakom i cjevovoda, te je njihova primjena direktno vezana uz PED 2014/68/EU (*Pressure Equipment Directive*) uz specifičnosti vezane za kompenzatore. Prema PED-u, oprema pod tlakom razvrstava se prema kategorijama sukladno rastućoj razini opasnosti. Kategorije ovise o PS (najveći dopušteni tlak), V (volume posude) ili DN (promjer cjevovoda), mjesto ugradnje (posuda ili cjevovod) i vrsti fluida (skupine 1 i 2).

Na projektiranje i odabir kompenzatora utječu slijedeći parametri:

- tlak - radni, projektni i ispitni,
- temperatura - radna, projektna (minimalna/maksimalna),
- medij koji teče kroz cijev,
- sistem cjevovoda,
- pomaci koji će djelovati na kompenzator.

#### 3.1. Tlak

Važno je znati radni, projektni i ispitni tlak kojem će kompenzator biti izložen.

Sila tlaka  $F_p$  je aksijalna sila koja nastaje kao posljedica unutrašnjeg tlaka koji nastoji kompenzator razvući u cijev (Slika 2). Ova sila izračunava se prema slijedećoj jednadžbi [2,5]:

$$F_p = p \cdot A \quad (1)$$

$$A = D_m^2 \cdot \pi / 4 \quad (2)$$

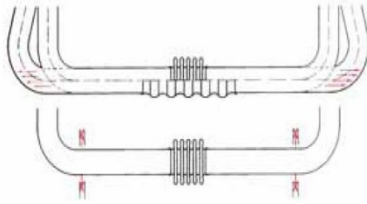
gdje su:

$F_p$  - sila tlaka (N)

$p$  - unutrašnji tlak (N/mm<sup>2</sup>)

$A$  - efektivna površina kompenzatora (mm<sup>2</sup>)

$D_m$  - srednji promjer harmonike (mm).



Slika 2. Djelovanje sile tlaka  $F_p$  na kompenzator

### 3.2. Temperatura

Temperaturna dilatacija trase cjevovoda (produljenje ili skraćenje) cjevovoda zavisi od promjene temperature, vrste materijala cjevovoda i dužini trase cjevovoda. O ovom parametru općenito ovisi pomak cjevovoda. Izračunava se prema slijedećoj jednadžbi [2, 5]:

$$\Delta l_T = \alpha \cdot \Delta T \cdot l \quad (3)$$

gdje su:

$\Delta l_T$  - ukupna dilatacija trase (mm)

$\alpha$  - koeficijent toplinskog rastezanja ( $\text{mm}/\text{m}^\circ\text{C} \times 10^{-3}$ )

$\Delta T$  - raspon između maksimalne i minimalne temperature ( $^\circ\text{C}$ )

$l$  - duljina trase (m)

### 3.3. Medij

Medij kojem je izložen kompenzator kao i njegova agresivnost, tj. okoliš u kojem je kompenzator ugrađen direktno utječu na izbor materijala iz kojeg će isti biti izrađen. Standardni kompenzatori uglavnom se izrađuju iz austenitnog nehrđajućeg čelika 18/8 i nikl legura (Inconel, Incoloy) [3, 5].

Nekoliko primjera medija kod kojih je bolje koristiti legure nikla:

- para uz prisustvo klorida, pregrijana para u kojoj su uvjeti lužnati,
- sirova nafta ili morska voda koja mirno stoji u valovima kompenzatora,
- sirova nafta uz povećanu koncentraciju sumpora.

### 3.4. Sistem cjevovoda

Razmještaj cjevovoda i položaj glavnih uređaja uglavnom je već određen. Potrebno je podijeliti trasu cjevovoda u sekcije i odrediti položaj kompenzatora, položaj čvrstih točaka i vodilica, a zatim definirati izduženje raznih dijelova cjevovoda [2, 5].

Trasu cjevovoda neophodno je podijeliti u sekcije u slijedećim slučajevima:

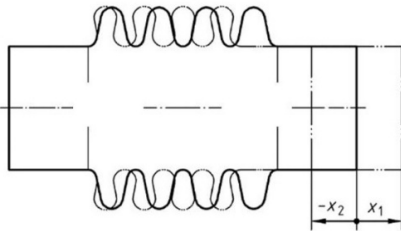
- kada cjevovod ima mnogo koljena, a pomaci se javljaju u više od dvije ravnine,
- ako je pomak jedne ravne sekcije velik,
- kada je potrebno postaviti čvrsti oslonac na točno određenom mjestu.

### 3.5. Pomak

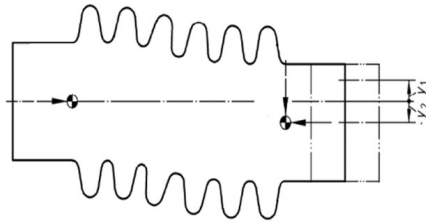
Rezultanta sila koja opterećuju oslonac u cijevnom sistemu dobija se kao suma:

- Sile tlaka  $F_p$  (sile unutrašnjeg tlaka),
- Sile kompenzatora  $F_k$  (sila opružnog djelovanja kompenzatora),
- Sile trenja  $F_t$  (sila trenja cijevi koje se pomiče kroz vodilice),
- Centrifugalna sila  $F_c$  (sila koju uzrokuje tok medija na osloncima postavljenim na cijevnim koljenima),
- Vanjske sile (izvijanje i uvijanje palube broda, moment sile kod visokonadzemnih cjevovoda...)

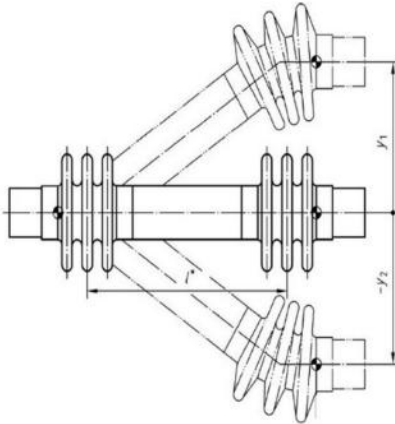
Kompenzator mijenja svoj oblik u skladu sa silama koje djeluju na njega. Pomak kompenzatora izražava se kvantitativno kao aksijalni, kutni i poprečni (Slika 3 - 6) [2, 5].



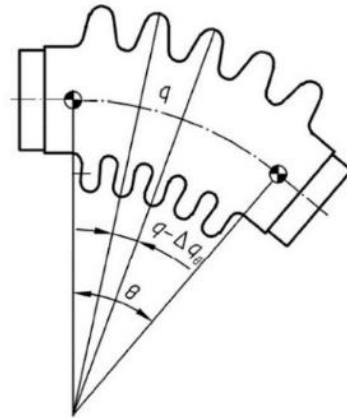
Slika 3. Harmonika izložena aksijalnom pomaku  $x$



Slika 4. Harmonika izložena poprečnom pomaku  $y$



Slika 5. Poprečni pomak  $y/s$  dvije harmonike i srednjom cijevi

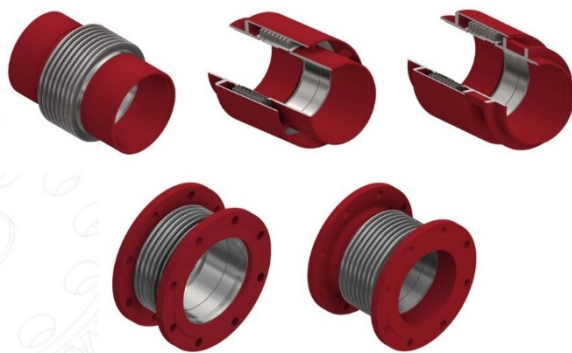


Slika 6. Harmonika izložena kutnom pomaku  $\theta$

## 4. PRIMJERI PRIMJENE METALNIH KOMPENZATORA

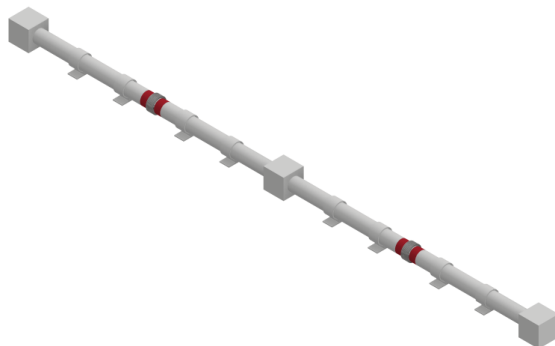
### 4.1. Aksijalni kompenzator (AR)

Aksijalni kompenzatori, prikazani na Slici 7, namijenjeni su za prihvat pomaka (skupljanje i/ili istezanje) duž uzdužne ose kompenzatora. U određenim uvjetima, uz prilagodbu konstrukcije, ovim kompenzatorima se mogu kompenzirati i manje vrijednosti popriječenih i kutnih pomaka. Isporučuju se s prirubnicama ili s cijevnim nastavcima, ili u kombinaciji to dvoje. Aksijalni kompenzatori mogu u svojoj konstrukciji imati razne dodatne elemente, kao što su unutrašnji usmjerivački rukavci, vanjska zaštita, interne vodilice, protu-torzijski sistem itd. Česta primjena ovakvih aksijalnih kompenzatora sa dodatnim elementima je u toplifikacijskim magistralnim cjevovodima [2].



Slika 7. Aksijalni kompenzator (AR)

Aksijalni kompenzator je tlačno nespretnut te obavezno u cjevovodu mora biti pozicioniran između dvije čvrste točke s propisanim vođenjem cjevovoda kako je prikazano na Slici 8.

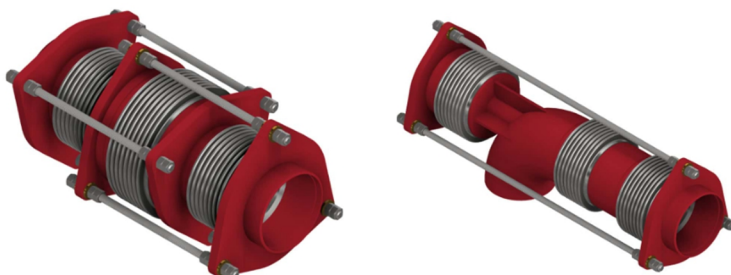


Slika 8. Aksijalni kompenzatori (AR) ugrađeni u sredini linijske sekcije

## 4.2. Kompenzator s izjednačenim tlakom (PB)

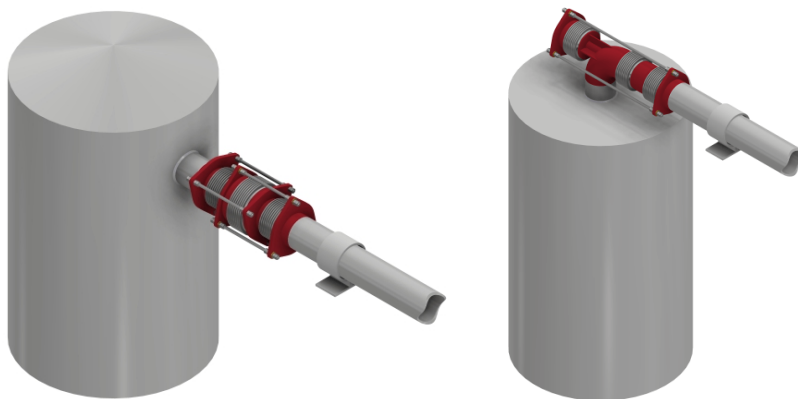
Specijalna konstrukcija ovog kompenzatora omogućava po potrebi kompenzaciju svih pomaka (poprečnih, kutnih i aksijalnih). Ovo je jedini kompenzator spregnutog tipa (spregnuta sila od unutrašnjeg tlaka) koji je u mogućnosti kompenzirati aksijalne pomake [2].

Ovisno o konfiguraciji cjevovoda gdje se ugrađuju, kompenzatori s izjednačenim tlakom mogu se podijeliti u dvije osnovne grupe, na linijski tip (IN-LINE) i na tip s koljenom (Slika 9).



Slika 9. Kompenzator s izjednačenim tlakom (PB)

Primjenjuju se najčešće u sistemima gdje je postavljanje čvrstih točaka teško ili nikako izvedivo. Postavljaju se uz opremu koja ne dozvoljava prevelika opterećenja na sebi kao što su turbine, pumpe, kompresori, ventili i slično (Slika 10).



Slika 10. Kompenzator s izjednačenim tlakom (PB) linijske izvedbe i izvedbe s koljenom ugrađen uz armature ograničenih mogućnosti prihvata reakcijskih sila

## 5. ZAKLJUČAK

Kompenzatori su danas sastavni dio cjevovoda i posuda pod tlakom. Kompenzatori se najviše primjenjuju u gradskim i centralnim grijanjima,

kemijskim i petrokemijskim postrojenjima, brodogradnji, klimatizacijskim i ventilacijskim sustavima, ispušnim sustavima raznih motora i agregata, elektranama, izmjenjivačima topline i cementarama.

## **FINANCIRANJE**

Ovaj rad financiralo je Sveučilište u Slavenskom Brodu u sklopu institucionalnog istraživačkog projekta Pobljšanje kvalitete proizvodnih procesa korištenjem modernih tehnoloških rješenja, financiranog sredstvima Europske unije – NextGenerationEU. Izneseni stavovi i mišljenja samo su autorova i ne odražavaju nužno službena stajališta Europske unije ili Europske komisije. Ni Europska unija ni Europska komisija ne mogu se smatrati odgovornima za njih.

## **LITERATURA**

- [1] Josip Majić, Josip Pavić, Dejan Marić, Ivan Samardžić, Tehnološki postupak izrade kompenzatora u zavarenoj izvedbi, 7<sup>th</sup> Međunarodno znanstveno-stručno savjetovanje SBZ 2013, Slavenski Brod, Hrvatska, 23-25.10.2013.
- [2] Josip Pavić, Radojka Marković, Ivan Samardžić, Dejan Marić, Kompenzatori za tlačnu primjenu - Klasifikacija, 9<sup>th</sup> Međunarodno znanstveno-stručno savjetovanje SBZ 2017, Slavenski Brod, Hrvatska, 25-27.10.2017.
- [3] Josip Pavić, Ivan Samardžić, Dejan Marić, Šolić Tomislav, Marko Dunder, Kompenzatori za tlačnu primjenu - Materijali, 10<sup>th</sup> Međunarodno znanstveno-stručno savjetovanje SBZ 2019, Slavenski Brod, Hrvatska, 16-18.10.2019.
- [4] Josip Pavić, Ivan Samardžić, Dejan Marić, Marko Horvat, Jadranka Eržišnik, Kompenzatori za tlačnu primjenu – Primjena tehnologije zavarivanja, 11<sup>th</sup> Međunarodno znanstveno-stručno savjetovanje SBZ 2021, Slavenski Brod, Hrvatska, 03-05.11.2021.
- [5] Katalog, Kompenzatori, Đuro Đaković Kompenzatori d.o.o.



Društvo za  
Zavarivanje  
Crne Gore

1. Konferencija sa međunarodnim učešćem

## „TEHNOLOGIJE SPAJANJA MATERIJALA“

14 - 16. maj 2026. godine, Bečići, Crna Gora



**Marko Maričić<sup>1,\*</sup>, Ivan Stojčić<sup>1</sup>, Marija Vukšić Popović<sup>2</sup>,  
Stefan Dikić<sup>3</sup>, Milorad Kočić<sup>4</sup>**

### **KLASE IZVOĐENJA PREMA EN 1090-2 I NJIHOVA PRIMENA U PROJEKTOVANJU PREMA EN 1993 (EVROKOD 3)**

**Rezime:** Zahtevi izrade čeličnih konstrukcija, koji obuhvataju proizvodnja, kontrolu i inspekciju, definisani su kroz klase izvođenja (EXC), propisane standardom EN 1090-2. Na ovaj način uspostavlja se harmonizovani okvir za kvalitet i bezbednost u evropskoj građevinskoj industriji. U ovom radu razmatraju se definicija, kriterijumi za određivanje i praktična primena klasa izvođenja u kontekstu zahteva za projektovanje propisanih standardima iz serije EN 1993 (Evrokod 3). Poseban akcenat stavljen je na međusobnu povezanost projektnih pretpostavki i zahteva za izradu, pri čemu se ukazuje na značaj usklađivanja proizvodnih postupaka, kontrole kvaliteta i inspekcije sa nivoom pouzdanosti predviđenim u fazi strukturnog projektovanja. Na taj način se naglašava uloga klasa izvođenja u obezbeđivanju tehničke usaglašenosti i dugoročne pouzdanosti čeličnih konstrukcija.

**Ključne riječi:** zavarivanje, bezbednost, čelična konstrukcija, klase izvođenja

### **EXECUTION CLASSES ACCORDING TO EN 1090-2 AND THEIR APPLICATION IN DESIGN AS PER EN 1993 (EUROCODE 3)**

**Abstract:** The requirements for the execution of steel structures, including fabrication, inspection, and quality control, are defined through Execution Classes (EXC) specified in EN 1090-2. In this way, a harmonized framework for

<sup>1</sup> TMS CEE d.o.o., Beograd, Republika Srbija

<sup>2</sup> Akademija tehničko-umetničkih strukovnih studija Beograd, Odsek Visoka železnička škola, Beograd, Republika Srbija

<sup>3</sup> Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, Republika Srbija

<sup>4</sup> SIGMA LAB DOO, Smederevska Palanka, Republika Srbija

\* Korespondentni autor, mail: marko.maricic@tms.rs

*ensuring quality and safety within the European construction industry is established. This paper addresses the definition, criteria for determination, and practical application of execution classes in relation to the design requirements prescribed by the EN 1993 series (Eurocode 3). Particular emphasis is placed on the interrelation between design assumptions and execution requirements, highlighting the importance of aligning fabrication procedures, quality control, and inspection with the level of structural reliability assumed at the design stage. Consequently, the role of execution classes in ensuring technical compliance and the long-term reliability of steel structures is emphasized.*

**Keywords:** welding, safety, steel construction, execution classes

## 1. UVOD

Evropski standard EN 1090-2 [1], definiše osnovne zahteve za izradu, zavarivanje i montažu čeličnih konstrukcija. Ključni element ovog standarda je koncept klase izvođenja (EXC), koji određuje odgovarajući nivo kontrole, nadzora i inspekcije tokom procesa proizvodnje i montaže. Serija EN 1993 (Evrokod 3) pruža pravila projektovanja za čelične konstrukcije. Zajedno obezbeđuju doslednu vezu između pretpostavki projektovanja i performansi izvođenja, čime se održava integritet i bezbednost konstrukcije.

## 2. KONCEPT KLASSE IZVOĐENJA EXC

Klase izvođenja (Execution Classes - EXC) kategorišu čelične konstrukcije u četiri nivoa, od EXC1 do EXC4 (Tabela 1), u zavisnosti od posledica otkaza integriteta konstrukcije, strukturne složenosti i uslova rada. Što je viša klasa izvođenja, to su strožiji zahtevi za kvalitet i inspekciju. Ove klase osiguravaju da nivo izrade odgovara pouzdanosti koja se očekuje.

Tabela 1. Klase izvođenja EXC

Klasa izvođenja	Opis	Najčešća primena	Nivo kvaliteta
EXC1	Jednostavne konstrukcije sa minimalnim rizikom od otkaza	Poljoprivredne zgrade, skladišta	Osnovni
EXC2	Standardne konstrukcije sa srednjim rizikom od otkaza	Industrijske hale, poslovne zgrade	Srednji
EXC3	Strukture sa značajnim uticajem na bezbednost ili zamor	Mostovi, kranovi, tornjevi, javna infrastruktura	Visoki
EXC4	Strukture sa ekstremnim posledicama kvara	Energetska postrojenja, ofšor platforme, stadioni	Veoma visoki

### 3. ODREĐIVANJE KLASJE IZVOĐENJA

Određivanje odgovarajuće klase izvođenja (EXC) jedan je od najvažnijih koraka u osiguravanju da kvalitet izrade i nivo inspekcije čelične konstrukcije odgovaraju njenoj projektnoj nameri i bezbednosnim zahtevima. EN 1090-2 [1] pruža strukturirani pristup za klasifikaciju svake konstrukcije ili komponente u jednu od četiri klase izvođenja (EXC1–EXC4). Ova klasifikacija se zasniva na tri glavna parametra: klasi posledica (CC), kategoriji upotrebe (SC) i kategoriji proizvodnje (PC).

#### 3.1. Klasa posledica (CC)

Klasa posledica odražava potencijalne posledice otkaza konstrukcije u smislu rizika po ljudske živote, životnu sredinu i ekonomske gubitke, a koja je definisana prema standardu EN 1990 [4] i pruža osnovu za diferencijaciju pouzdanosti u projektovanju (Tabela 2). Klase posledica direktno utiču na pouzdanosti projektovanja, pa konstrukcije sa CC3 klasifikacijom zahtevaju veću pouzdanost i strožiji nadzor kvaliteta tokom projektovanja i izrade.

Tabela 2. Klase posledica CC

Klase posledica	Opis	Primer
CC1	Niske posledice otkaza	Poljoprivredne ili skladišne zgrade, mala skloništa
CC2	Srednje posledice otkaza	Poslovne zgrade, stambene zgrade, industrijske hale
CC3	Visoke posledice otkaza	Zgrade za javne skupove, tržni centri, mostovi, veliki stadioni

#### 3.2. Kategorija upotrebe (SC)

Kategorija upotrebe ukazuje na težinu uslova opterećenja, posebno onih koji se odnose na zamor i dinamičke efekte. Ona razlikuje konstrukcije koje su uglavnom izložene statičkim opterećenjima od onih koje su izložene cikličnim ili dinamičkim naprežanjima (Tabela 3). Kategorija usluge je ključni faktor u određivanju obima nerazarajućih ispitivanja (NDT), nivoa kvaliteta zavarivanja i režima inspekcije. Na primer, zavareni spojevi u SC2 moraju da ispunjavaju strože zahteve za žilavost i otpornost na zamor, što često zahteva kvalitet zavara klase B prema EN ISO 5817 [7].

Tabela 3. Kategorije upotrebe SC

Kategorije upotrebe	Opis	Primer
SC1	Strukture prvenstveno opterećene statički ili kvazistatički	Zgrade, rezervoari za skladištenje, platforme
SC2	Strukture izložene značajnom zamoru ili dinamičkom opterećenju	Mostovi, kranovi, tornjevi, oprema za dizanje

### 3.3. Kategorija proizvodnje (PC)

Kategorija proizvodnje odražava složenost procesa izrade, vrstu spojeva i potrebu za preciznim tolerancijama ili posebnim tehnikama zavarivanja (Tabela 4). Strukture koje spadaju u PC2 obično zahtevaju poboljšane sisteme upravljanja kvalitetom (EN ISO 3834-2 ili -3 [5]), kvalifikovane koordinate zavarivanja (EN ISO 14731 [6]) i dokumentovanu sledljivost svih ugrađenih materijala i aktivnosti tokom izrade.

Tabela 4. Kategorije proizvodnje PC

Kategorije proizvodnje	Opis	Primer
PC1	Jednostavna izrada, ograničeno zavarivanje, konvencionalne tolerancije	Vijčane konstrukcije, jednostavni sklopovi
PC2	Složena izrada koja uključuje višestruke zavare, kritične spojeve ili napredne procese	Zavarene kutijaste grede, mostovske ploče, kranske grede

### 3.4. Klase izvođenja (EXC)

U skladu sa prethodnim, navedeni standardi kombinuju ova tri parametra CC, SC i PC, i u skladu sa njima bira se klasa izvođenja. Princip je jednostavan: kao posledica povećanja zahteva za uslugom ili složenosti izrade, povećava se i klasa izvođenja (Tabela 5). Proces određivanja klase izvođenja integriše koncept pouzdanosti projektovanja iz standarda EN 1990 [4], pravila strukturnog ponašanja iz standarda EN 1993 [2-3] i okvir upravljanja kvalitetom iz standarda EN 1090-2 [1]. Ova veza osigurava da se svaka čelična konstrukcija, od jednostavnih poljoprivrednih šupa do složenih mostova ili elektrana, izvodi na odgovarajućem nivou preciznosti, kontrole i bezbednosti koji zahteva njena projektna funkcija.

Tabela 5. Klase izvođenja EXC

Klasa posledica		CC1		CC2		CC3	
Kategorija upotrebe		SC1	SC2	SC1	SC2	SC1	SC2
Kategorija proizvodnje	PC1	EXC1	EXC2	EXC2	EXC3	EXC3 *	EXC3 *
	PC2	EXC2	EXC2	EXC2	EXC3	EXC3 *	EXC4
* Može se povećati na Klasu izvođenja EXC4 ukoliko su opasnosti od otkaza i ljudskih života veoma izraženi i ukoliko Nacionalni propisi to zahtevaju							

## 4. KORELACIJA IZMEĐU EN 1090-2 I EN 1993 (EVROKOD 3)

Harmonizovani evropski sistem projektovanja konstrukcija zahteva konzistentnost između pretpostavki projektovanja u standardu EN 1993 [2-3] i odredbi o izvršenju u standardu EN 1090-2 [1]. Dok se standard EN 1993 [2-3] fokusira na ono što je potrebno za postizanje bezbednosti i upotrebljivosti (namera projektovanja), standard EN 1090-2 [1] definiše kako se ove namere

projektovanja realizuju kroz pravilnu izradu, zavarivanje i kontrolu kvaliteta. Unakrsna referenca ključnih klauzula u oba standarda osigurava da je kontrola izvođenja usklađena sa očekivanjima projektovanja (Tabela 6).

Tabela 6. Korelacija između EN 1090-2 i EN 1993 (Evrokod 3)

Tehnički aspekt	Relevantne odredbe EN 1090-2	Odgovarajuće odredbe EN 1993 (Eurokod 3)	Objašnjenje i inženjerski značaj
Izbor materijala i žilavost	Tačka 5 (Materijali), 5.2–5.3	EN 1993-1-10 (Izbor čelika s obzirom na žilavost)	EN 1090-2 zahteva da podrazredi čelika i atesti materijala odgovaraju projektnim zahtevima za žilavost, čime se obezbeđuje sprečavanje krtog loma u skladu sa EN 1993-1-10.
Koordinacija zavarivanja i kvalifikacija osoblja	Tačka 7.4, EN ISO 14731, EN ISO 9606	EN 1993-1-8 & 2.3.1, EN 1993-1-9 & 3	EN 1993 podrazumeva da su zavareni spojevi izvedeni od strane kompetentnog osoblja; EN 1090-2 to obezbeđuje kroz zahteve za kvalifikaciju i koordinaciju zavarivanja.
Kvalifikacija postupka zavarivanja (WPQR)	Tačka 7.5, EN ISO 15614	EN 1993-1-8 & 4, & 6	Proračunska nosivost zavarenih spojeva prema EN 1993-1-8 zasniva se na postupcima zavarivanja koji su dokazani ispitivanjem prema EN ISO 15614.
Izvođačke klase (EXC 1–EXC 4)	Aneks B	EN 1990 Aneks B (Klase posledica) + pretpostavke pouzdanosti EN 1993	Određivanje izvođačke klase obezbeđuje da nivo kontrole u izradi odgovara nivou pouzdanosti koji se pretpostavlja u proračunu.
Nivoi kvaliteta zavarenih spojeva	Tačka 7.6, EN ISO 5817	EN 1993-1-9, Tabela 2 (Kategorije zamora)	Zamorne krive u EN 1993-1-9 zasnovane su na definisanim nivoima kvaliteta zavara (najčešće B, C ili D prema ISO 5817).
Predmontaža i tolerancije	Tačka 11 (Tolerancije)	EN 1993-1-1 & 7.5; EN 1993-1-8 & 3.6	Geometrijske tolerancije prema EN 1090-2 obezbeđuju da globalne i lokalne imperfekcije ostanu u granicama koje su korišćene u proračunu stabilnosti.
Inspekcija i ispitivanje	Tačka 12 (Inspekcija, ispitivanje, dokumentacija)	EN 1993-1-1 & 10; EN 1993-1-9 & 7	Obim i učestalost ispitivanja bez razaranja (NDT) usklađeni su sa nivoom pouzdanosti koji se pretpostavlja u proračunu.
Priprema površine i zaštita od korozije	Tačka 10 (Površinska zaštita)	EN 1993-1-4; EN 1993-1-9 & 2.3	Sistem zaštite od korozije mora biti usklađen sa projektovanim vekom trajanja konstrukcije prema EN 1993 i EN 1990.

Zatezanje vijaka i trenjne površine	Tačka 8 (Vijčani spojevi), Aneksi G (Faktori klizanja)	EN 1993-1-8 & 3.9, & 3.10	Prednaprezanje vijaka i otpornost na klizanje moraju zadovoljiti proračunsku nosivost spojeva kategorije B i C.
Izvođačka dokumentacija	Tačka 4.2 (Specifikacija izvođenja)	EN 1993-1-1 & 10.1 (Deklarisanje projektnih pretpostavki)	Specifikacija izvođenja obezbeđuje jasnu vezu između projektnih zahteva i njihove realizacije u proizvodnji.
Detalji relevantni za zamor	Tačka 7.6.2 (Oblik zavora, prelazi)	EN 1993-1-9 & 6 (Kategorije detalja)	Zahtevi za oblikovanje zavora direktno utiču na zamornu klasu ( $\Delta\sigma C$ ) koja se koristi u proračunu.
Toplotna obrada posle zavarivanja (PWHT)	Tačka 7.8	EN 1993-1-8 & 6.6	Kod elemenata sa velikim naponskim stanjem ili većim debljinama, EN 1090-2 zahteva PWHT u skladu sa projektnim pretpostavkama o zaostalim naponima.
Hladno oblikovanje i ispravljanje	Tačka 9 (Oblikovanje, ispravljanje)	EN 1993-1-3 & 5; EN 1993-1-5 & 6	Postupci oblikovanja ne smeju degradirati mehanička svojstva materijala.
Izvođenje u posebnim uslovima	Aneksi C i D	EN 1998-1; EN 1993-1-9; EN 1993-1-10	Povećani zahtevi kontrole prema EN 1090-2 odgovaraju povećanim faktorima pouzdanosti u proračunu.

## 5. ZAKLJUČAK

Integracija EN 1993 i EN 1090-2 obezbeđuje zatvorenu petlju između projektovanja i izvođenja: projektanti definišu zahteve pouzdanosti, proizvođači ih realizuju kroz kontrolisane procese, a revizori potvrđuju usaglašenost putem specifikacije izvođenja i FPC sistema. EN 1090-2 predstavlja operativno proširenje Evrokoda 3, omogućavajući da se projektovani nivo bezbednosti zaista postigne u praksi. Klase izvođenja (EXC1–EXC4) povezuju nivo rizika sa zahtevima kvaliteta i kontrole, pri čemu više klase podrazumevaju strožije zahteve za zavarivanje, ispitivanje, dokumentaciju i sledljivost. Pravilan izbor klase izvođenja u ranoj fazi projektovanja ključan je za balans između bezbednosti i ekonomičnosti. Efikasna primena zahteva koordinaciju svih učesnika: projektanti moraju jasno definisati EXC i uskladiti projektne pretpostavke sa mogućnostima izrade, proizvođači obezbediti doslednu primenu kroz FPC, a revizori potvrditi usklađenost između projektovanja i izvođenja. Harmonizacija EN 1993 i EN 1090-2 čini osnovu evropskog sistema kvaliteta čeličnih konstrukcija, obezbeđujući pouzdanost, trajnost i regulatornu usklađenost kroz jasno definisane i kontrolisane procese.

## **LITERATURA**

- [1] EN 1090-2:2018 – Execution of steel structures and aluminium structures – Part 2: Technical requirements for steel structures.
- [2] EN 1993-1-1:2020 – Eurocode 3: Design of steel structures – General rules and rules for buildings.
- [3] EN 1993-2:2010 – Eurocode 3: Design of steel structures – Bridges.
- [4] EN 1990:2020 – Basis of structural design.
- [5] EN ISO 3834 – Quality requirements for fusion welding of metallic materials.
- [6] EN ISO 14731:2019 – Welding coordination – Tasks and responsibilities.
- [7] EN ISO 5817:2023 – Welding - Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded) - Quality levels for imperfections.





Društvo za  
Zavarivanje  
Crne Gore

1. Konferencija sa međunarodnim učešćem

## „TEHNOLOGIJE SPAJANJA MATERIJALA“

14 - 16. maj 2026. godine, Bečići, Crna Gora



MAŠINSKI  
FAKULTET  
PODGORICA

Muhidin Kozica<sup>1,\*</sup>

### WELD ME - PROGRAM ZA PROCJENU ZAVARLJIVOSTI I TERMIČKIH USLOVA ZAVARIVANJA ČELIKA

**Rezime:** Hladne i tople pukotine i povećana tvrdoća u zoni uticaja toplote (ZUT) predstavljaju kritične probleme pri zavarivanju čelika, uzrokovane zavarljivošću materijala, sadržajem vodonika i termičkim ciklusom zavarivanja.

U ovom radu dat je prikaz i mogućnost softverskog alata Weld Me, namijenjenog analizi i procjeni zavarljivosti čelika prema EN 1011-2. Softver ima implementirane proračune ugljeničnih ekvivalenta (CE, CET, Pcm, CE(WES), CEN), Graville dijagram, indikatore osjetljivosti na tople pukotine HCS, UCS, proračun temperatura transformacija, proračun temperature predgrijavanja, vrijeme hlađenja  $t_{8/5}$ , procjenu tvrdoće u ZUT-u kao i Schaeffler-ov i WRC-1992 dijagram za analizu mikrostrukture metala zavara. Program povezuje preporuke standarda i empirijskih izraza iz naučne literature (ugljenični ekvivalenti, Yurioka model, Schaeffler i WRC-1992 dijagrami) sa industrijskom praksom, smanjujući na taj način subjektivnost pri izradi postupaka zavarivanja i povećavajući pouzdanost zavarenih spojeva.

**Ključne riječi:** zavarljivost, temperatura predgrijavanja, vrijeme hlađenja  $t_{8/5}$ , zona uticaja toplote, program za zavarivanje

### WELD ME - SOFTWARE FOR ASSESSING THE WELDABILITY AND THERMAL CONDITIONS OF STEEL WELDING

**Abstract:** Cold and hot cracks and increased hardness in the heat-affected zone (HAZ) represent critical problems in steel welding, caused by the weldability of the material, hydrogen content and the thermal cycle of welding. This paper presents an overview and the capabilities of the software tool Weld Me, intended for the analysis and assessment of steel weldability

<sup>1</sup> DENIKOO d.o.o., Podgorica, Crna Gora

*according to EN 1011-2. The software has implemented calculations of carbon equivalents (CE, CET, Pcm, CE(WES), CEN), the Graville diagram, hot cracking susceptibility indicators HCS and UCS, calculation of transformation temperatures, calculation of preheat temperature, cooling time  $t_{8/5}$ , estimation of hardness in the HAZ, as well as the Schaeffler and WRC-1992 diagrams for the analysis of weld metal microstructure.*

*The program links the recommendations of standards and empirical expressions from the scientific literature (carbon equivalents, the Yurioka model, the Schaeffler and WRC-1992 diagrams) with industrial practice, thereby reducing subjectivity in the development of welding procedures and increasing the reliability of welded joints.*

**Keywords:** weldability, preheat temperature, cooling time  $t_{8/5}$ , heat-affected zone, welding software

## 1. UVOD

Weld Me je softver, razvijen u programskom jeziku Python, koji implementira niz analitičkih metoda kao što su: proračun ugljeničnih ekvivalenata, proračun indikatora osjetljivosti na tople pukotine, temperature transformacija, temperaturu predgrijavanja prema EN 1011-2, analitičke modele za vrijeme hlađenja  $t_{8/5}$ , procjenu tvrdoće u ZUT-u i konstitucijske dijagrame za metal zavora. Cilj razvoja ovog programa je pojednostavljenje standardizovanih postupaka u jedinstven proračunski pristup koji eliminiše potrebu za ručnim očitavanjem nomograma i konstitucijskih dijagrama (Schaeffler, Graville, WRC-1992) i pojednostavljuje proces izrade tehnologije zavarivanja a uz to i omogućava ponovljive rezultate sa višestrukim scenarijima.

## 2. TEORIJSKA OSNOVA

Zavarljivost čelika određuje se preko ugljeničnih ekvivalenata, koji sadržaj različitih legirajućih elemenata prevodi u ekvivalentni sadržaj ugljenika. Dominantan uticaj na kaljivost zone uticaja toplote (ZUT) ima ugljenik (C). Ostali legirajući elementi kao što su mangan (Mn), silicijum (Si), hrom (Cr), molibden (Mo), vanadijum (V), nikl (Ni), bakar (Cu) i niobijum (Nb), doprinose otvrdnjavanju u različitoj mjeri, što se izražava odgovarajućim težinskim koeficijentima u formulama ugljeničnog ekvivalenta. Veća vrijednost ugljeničnog ekvivalenta znači veću sklonost ka stvaranju tvrde martenzitne strukture u ZUT-u tokom hlađenja, čime raste rizik od hladnih pukotina indukovanih vodonikom. Tokom više od osam decenija razvijene su brojne formule za ugljenični ekvivalent, od koncepta koji su Dearden i O'Neill uveli 1940. godine (kasnije standardizovan kao CE(IIW) od strane IIW-a 1967.), preko CET, Pcm i CE(WES), do savremene Yuriokine CEN formule iz 1987. godine koja premošćuje razlike između prethodnih pristupa. Sve ove formule služe kao osnovni indikator za potrebu

predgrijavanja, izbor dodatnog materijala i kontrolu unosa toplote pri zavarivanju.

### **CE (IIW) ili CEV**

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cr + Mo + V)}{5} + \frac{(Ni + Cu)}{15} \quad (1)$$

Formula (1) je definisana od strane Međunarodnog instituta za zavarivanje. Najčešće se koristi u praksi i implementirana je u raznim standardima, a koristi se kao Metod A u EN 1011-2.

Validan opseg primjene je  $CE \approx 0.30$  do  $0.70$ . Okvirno, za debljine elemenata do približno 20 mm važi:  $CE \leq 0.40$  - dobra zavarljivost bez predgrijavanja;  $0.40 \div 0.60$  - zahtijeva predgrijavanje; iznad  $0.60$  - obavezno je pojačano predgrijavanje. Validan opseg hemijskog sastava čelika je:  $C = 0,05$  do  $0,25$ ;  $Si = \max. 0,8$ ;  $Mn = \max. 1,7$ ;  $Cr = \max. 0,9$ ;  $Cu = \max. 1,0$ ;  $Ni = \max. 2,5$ ;  $Mo = \max. 0,75$ ;  $V = \max. 0,20$  [2].

### **CET**

$$CET = C + \frac{(Mn + Mo)}{10} + \frac{(Cr + Cu)}{20} + \frac{Ni}{40} \quad (2)$$

CET formula se koristi u okviru Metode B u standardu EN 1011-2. Razvijena je u istraživačkim laboratorima čeličane Thyssen Stahl AG.

Formula važi za hemijski sastav koji se kreće u sledećim granicama:  $0.05 \leq C \leq 0.32$ ;  $Si \leq 0.8$ ;  $0.5 \leq Mn \leq 1.9$ ;  $Cr \leq 1.5$ ;  $Cu \leq 0.7$ ;  $Mo \leq 0.75$ ;  $Nb \leq 0.06$ ;  $Ni \leq 2.5$ ;  $Ti \leq 0.12$ ;  $V \leq 0.18$ ;  $B \leq 0.005$  [2].

### **Pcm**

Parametar Pcm (engl. Crack Susceptibility Parameter), poznat i kao Ito-Bessyo formula, koristi se pri procjeni osjetljivosti čelika na pojavu hladnih pukotina u zoni uticaja toplote (ZUT) tokom hlađenja nakon zavarivanja. U odnosu na klasični CE(IIW), Pcm daje znatno veću težinu sadržaju ugljenika, čime bolje opisuje ponašanje modernih niskougljeničnih čelika povišene čvrstoće gdje ugljenik dominantno određuje zakaljivost ZUT-a.

$$Pcm = C + \frac{Si}{30} + \frac{(Mn + Cu + Cr)}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (3)$$

Ova formula je razvijena u Japanu, i specifično dizajnirana za niskougljenične čelike povećane čvrstoće sa sadržajem ugljenika  $C < 0,12\%$ , kao i niskougljenične čelike za cjevovode (API 5L) i čelike koji se koriste u brodogradnji.

Validan opseg hemijskog sastava je:  $C = 0.07 \div 0.22\%$ ,  $Si \leq 0.60\%$ ,  $Mn = 0.40 \div 1.40\%$ ,  $Cu \leq 0.50\%$ ,  $Ni \leq 1.20\%$ ,  $Cr \leq 1.20\%$ ,  $Mo \leq 0.70\%$ ,  $V \leq 0.12\%$ ,  $Nb \leq 0.04\%$ ,  $Ti \leq 0.05\%$  i  $B \leq 0.005\%$ .

Granice primjenjivosti Pcm parametra za procjenu zavarljivosti, koje su prikazane u Tabeli 1, često se koriste u industrijskoj praksi (AWS D1.1 Annex I) kao prvi indikator potrebe za predgrijavanjem i izborom dodatnog materijala sa niskim sadržajem vodonika.

Tabela 1. Granice primjenjivosti Pcm formule

Vrijednost Pcm	Zavarljivost
$P_{cm} \leq 0,20$	Dobra zavarljivost
$0,20 < P_{cm} \leq 0,30$	Zahtijeva se predgrijavanje i elektrode sa niskim nivoom vodonika
$P_{cm} > 0,30$	Obavezne pojačane mjere

### **CE (WES)**

Formulu (4) propisalo je Japansko društvo za zavarivanje (JWES/WES - Welding Engineering Standard). Ona uzima u obzir više legirajućih elemenata od CE(IIW), uključujući silicijum, sa različitim težinskim koeficijentima koji odražavaju mikrostrukturni odgovor poboljšanih (Q&T) čelika.

$$CE(WES) = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14} \quad (4)$$

Ovaj izraz za izračunavanje je primarno namijenjen poboljšanim (Q&T) niskolegiranim čelicima visoke čvrstoće sa zateznom čvrstoćom od 500÷1000 MPa.

### **CEN**

Parametar CEN (engl. Carbon Equivalent Number), poznat i kao Yuriokin ugljenični ekvivalent, razvijen je 1987. godine sa ciljem da premosti razlike između CE(IIW) i Pcm formula. Pokriva znatno širi raspon kvaliteta čelika, od niskougljeničnih do konvencionalnih C-Mn čelika. CEN je usvojen u američkim standardima ASTM A1005 i ASME B16.49.

$$CEN = C + A(C) \cdot \left[ \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{20} + \frac{(Cr + Mo + Nb + V)}{5} + 5B \right] \quad (5)$$

gdje je:

$$A(C) = 0,75 + 0,25 \cdot \tanh[20 \cdot (C - 0,12)] \quad (6)$$

Specifičnost ove formule je u koeficijentu  $A(C)$  tako da se za  $C < 0.08\%$   $A(C)$  približava 0.5 i CEN konvergira ka Pcm, dok za  $C > 0.18\%$   $A(C)$  teži ka 1.0 i CEN konvergira ka CE(IIW). Svaki od ovih izraza (1-5) optimizovan je za određenu grupu čelika i debljinu materijala [1, 2, 4, 9].

**Temperatura predgrijavanja** prema EN 1011-2 računa se prema dvije metode iz Aneksa C. *Metoda A* (Aneks C.2) koristi CEV ekvivalent i grafičke dijagrame, uz kombinovanu debljinu spoja kao parametar toplotnog odvoda. Namijenjena je primarno C-Mn i niskolegiranim konstrukcionim čelicima. *Metoda B* (Aneks C.3) koristi CET ekvivalent i analitičku formulu, uz debljinu lima  $d$  kao parametar. Primjenjiva je primarno za sitnozrne i niskolegirane čelike povećane čvrstoće. Obje metode kombinuju doprinose hemijskog sastava, debljine spoja, sadržaja difundovanog vodonika i unosa toplote prema sljedećem izrazu [2]:

$$T_p = 697 \cdot CET + 160 \cdot \tanh \frac{d}{35} + 62 \cdot HD^{0,35} + (53 \cdot CET - 32) \cdot Q - 328 \quad (7)$$

gdje su:  $T_p$  - temperatura predgrijavanja [°C]; CET - ugljenični ekvivalent po EN 1011-2 u [%];  $d$  - debljina lima [mm]; HD - sadržaj difuznog vodonika [ml/100g] i  $Q$  unos toplote [kJ/mm].

Granice primjenjivosti formule su: CET od 0,2–0,5 %;  $d$  od 10–90 mm; HD od 1–20 ml/100 g i  $Q$  od 0,5–4,0 kJ/mm [2].

**Vrijeme hlađenja  $t_{8/5}$**  predstavlja vrijeme tokom kojeg se metal zavara hladi sa 800°C na 500°C. To je interval u kojem se odvijaju najznačajnije fazne transformacije koji direktno utiče na mikrostrukturu i mehaničke osobine zone uticaja toplote (ZUT). Prema EN 1011-2 koriste se dva analitička modela u zavisnosti od debljine materijala. Za tanke limove primjenjuje se 2D model:

$$t_{8/5} = (4300 - 4,3 \cdot T_0) \cdot 10^5 \cdot \frac{k^2 \cdot Q^2}{d^2} \cdot \left[ \frac{1}{(500 - T_0)^2} - \frac{1}{(800 - T_0)^2} \right] \quad (8)$$

a za debele limove 3D model:

$$t_{8/5} = (6700 - 5 \cdot T_0) \cdot k \cdot Q \cdot \left[ \frac{1}{(500 - T_0)} - \frac{1}{(800 - T_0)} \right] \quad (9)$$

Izbor modela određuje se prema tzv. prelaznoj debljini ( $d_{tr}$ ). Prelazna debljina je debljina lima pri kojoj se odvođenje toplote mijenja iz dvodimenzionog u trodimenziono stanje i računa se iz unosa toplote i početne temperature:

$$d_{tr} = \sqrt{\frac{(4300 - 4,3 \cdot T_0)}{(6700 - 5 \cdot T_0)} \cdot k \cdot Q \cdot 10^5 \cdot \left( \frac{1}{(500 - T_0)} + \frac{1}{(800 - T_0)} \right)} \quad (10)$$

gdje su:  $T_0$  - početna temperatura (predgrijavanje) [ $^{\circ}\text{C}$ ];  $Q$  - unos toplote [ $\text{kJ}/\text{mm}$ ];  $d$  - debljina [ $\text{mm}$ ] i  $k$  faktor oblika zavara.

Za  $d < d_{tr}$  koristi se 2D model, a u suprotnom koristi se 3D model [2].

**Tvrdoća u zoni uticaja toplote** procjenjuje se prema Yurioka modelu, koja povezuje hemijski sastav sa brzinom hlađenja [10]. Yurioka model iz 1987 godine opisuje tvrdoću u zoni uticaja toplote (ZUT)  $S$ -krivom u zavisnosti od logaritma vremena hlađenja  $t_{8/5}$ . Tvrdoća se zatim interpolira između dvije granične vrijednosti - tvrdoće potpuno martenzitne strukture  $H_M$  (kada je  $t_{8/5}$  vrlo kratko) i tvrdoće potpuno beinitne strukture  $H_B$  (kada je  $t_{8/5}$  vrlo dugo) - pomoću arctan funkcije koja opisuje prelaz između ta dva stanja:

$$HV = \frac{H_M + H_B}{2} - \frac{H_M - H_B}{2,2} \cdot \arctan x \quad (11)$$

gdje je:

$$x = 4 \cdot \frac{\log \frac{t_{8/5}}{t_M}}{\log \frac{t_B}{t_M}} - 2 \quad (12)$$

Yurioka model je detaljno opisan u literaturi [10] i [14].

Za procjenu mikrostrukture metala zavara pri zavarivanju legiranih i različitih osnovnih i dodatnih materijala koriste se konstitucijski dijagrami.

**Schaefflerov dijagram** (1949) je grafička metoda za procjenu mikrostrukture metala zavara nerđajućih čelika na osnovu hemijskog sastava. Dijagram prikazuje regije postojanja austenitne (A), feritne (F) i martenzitne (M) faze i njihovih kombinacija (A+M, A+F, A+M+F), uz izoferitne linije za kvantitativno očitavanje udjela ferita. Položaj radne tačke određuje se preko ekvivalenta hroma i nikla:

$$Cr_{eq} = Cr + Mo + 1,5 \cdot Si + 0,5 \cdot Nb \quad (13)$$

$$Ni_{eq} = Ni + 30 \cdot C + 0,5 \cdot Mn \quad (14)$$

Radna tačka omogućava grafičku procjenu fazne strukture (austenit, ferit, martenzit i njihove kombinacije) u metalu zavara, uz očitavanje udjela ferita sa izo-feritnih linija.

**WRC-1992 dijagram** [6] koristi modifikovane ekvivalente hroma i nikla kalibrisane za tačnije predviđanje feritnog broja (FN) u metalu zavara. U odnosu na Schaeffler-ove formule uključuje i azot (N) u nikl ekvivalentu, kao i bakar (Cu) kao značajan austenitni stabilizator:

$$Cr_{eq} = Cr + Mo + 0,7 \cdot Nb \quad (15)$$

$$Ni_{eq} = Ni + 35 \cdot C + 20 \cdot N + 0,25 \cdot Cu \quad (16)$$

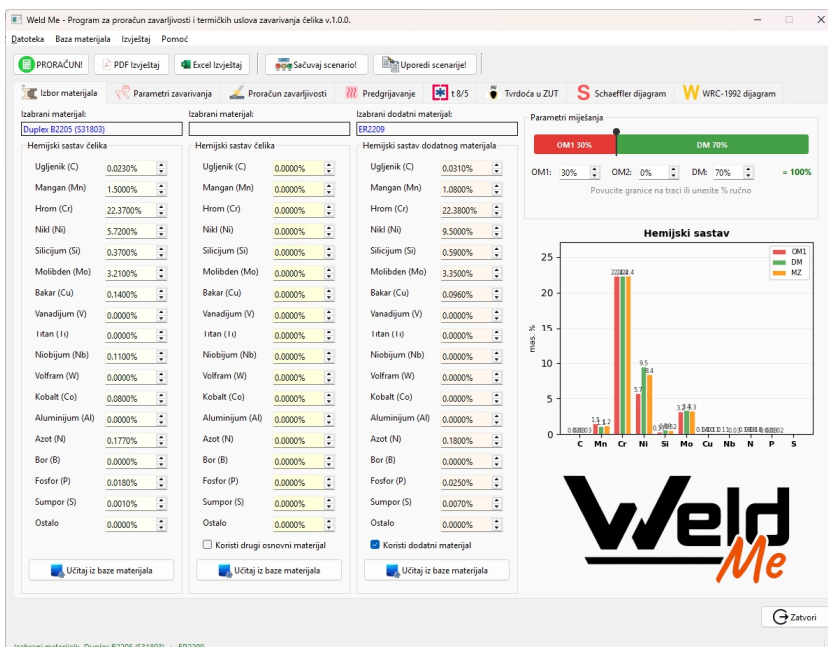
Dijagram je posebno pogodan za austenitne i duplex nerđajuće čelike jer omogućava direktno očitavanje feritnog broja (FN) u opsegu 0÷100 FN. Modovi solidifikacije (A - austenitni, AF - austenitno-feritni, FA - feritno-austenitni, F - feritni) se dodatno mogu procijeniti iz Cr\_eq/Ni\_eq omjera [3, 6, 7].

### 3. RAZVOJ SOFTVERA

#### 3.1. Arhitektura i korisnički interfejs

Softver Weld Me razvijen je u programskom jeziku Python 3.11 sa grafičkim interfejsom (GUI) dizajniranim u QtDesigneru. Arhitektura softvera je modularna. Grafički korisnički interfejs (GUI) odvaja se od proračunskog modula, što omogućava nezavisno testiranje algoritama i jednostavno proširivanje funkcionalnosti. Baza podataka materijala sadrži oko 120 čelika i dodatnih materijala, i potpuno je otvorena za korisnike a implementirana je u SQLite formatu. Ona sadrži hemijske sastave definisane standardima ali i iz atestnih listova proizvođača, čime se eliminiše potreba za ručnim unosom sastava za najčešće korišćene čelike.

Glavni prozor softvera Weld Me, koji prikazuje organizaciju korisničkog interfejsa sa karticom za izbor materijala, prikazan je na Slici 1.



Slika 1. Glavni prozor softvera Weld Me

Korisnik bira osnovni materijal iz baze podataka ili ručno unosi hemijski sastav, definiše parametre zavarivanja (napon, struja, brzina, postupak) i debljinu materijala. Softver nakon klika na dugme Proračun, automatski računa unos toplote, sve ugljenične ekvivalente, Schaeffler i WRC-1992 ekvivalente, indikatore osjetljivosti na tople pukotine, temperature transformacija, temperaturu predgrijavanja (po metodi B standarda EN 1011-2, metodi Ito-Bessyo i po Seferijanu), zatim prelaznu debljinu, vrijeme hlađenja  $t_{8/5}$  i maksimalnu tvrdoću u ZUT-u prema Yurioka i Terasaki formuli. Za analizu metala zavara, korisnik može definisati drugi osnovni materijal i/ili dodatni materijal sa odgovarajućim udjelima miješanja.

### 3.2. Algoritam i tok proračuna

Tok proračuna organizovan kroz jasno definisane faze. Softver ima logičan redoslijed kartica (tab-ova) od izbora materijala, pa do konstitucijskih dijagrama Schaeffler i WRC-1992. Kao posebna mogućnost je predviđeno kreiranje PDF izvještaja sa tabelarnim prikazom i dijagramima, koji izuzetno može koristiti inženjerima i tehnolozima zavarivanja. Posebna pogodnost je što softver ima mogućnost da čuva unijete podatke kao sopstveni fajl.wme. Svi proračuni imaju jasno definisane granice primjene i to po hemijskom sastavu (prema standardima) i po opsegu validnosti samih izraza (prema literaturnim izvorima). Softver na neki način predstavlja mali ekspertni sistem koji na osnovu unijetih vrijednosti i granica primjenjivosti daje upozorenja i obavještava korisnika.

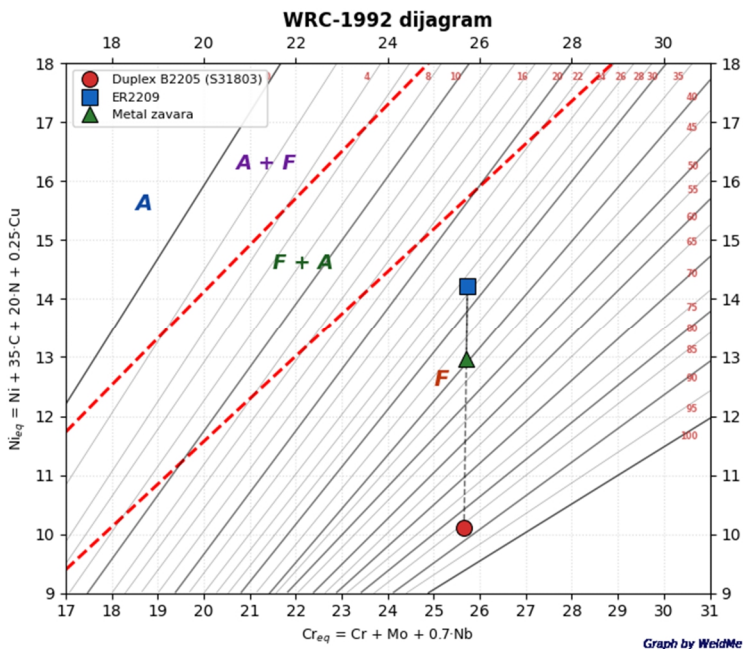
Proračun ugljeničnih ekvivalenata zasniva se na primjeni formula (1)-(5) a proračun Schaeffler i WRC-1992 ekvivalenata prema formulama (13)-(16), dok se za proračun indikatora osjetljivosti na tople pukotine koriste izrazi za HCS,  $\Delta G$ , UCS i PSR. Proračun temperatura transformacije Ac1, Ac3, Ms, Mf, Bs je dat u [11].

Proračun temperature predgrijavanja zasniva se na Metodi B iz standarda EN 1011-2 [2], kao i Ito-Bessyo metodi [13] a kao referencu koristi i stariju formulu prema Seferijanu.

Softver automatski računa prelaznu debljinu i na osnovu nje bira odgovarajući model za proračun  $t_{8/5}$ . Za debljinu manju od prelazne koristi se 2D model (tanki limovi), a za veću ili jednaku debljinu 3D model (debeli limovi). Na osnovu izračunatog  $t_{8/5}$ , softver procjenjuje maksimalnu tvrdoću u ZUT-u prema Yurioka i Terasaki formuli.

Posebno se može naglasiti mogućnost softvera za analizu zavarivanja različitih čelika. Hemijski sastav metala zavara izračunava se linearnom kombinacijom (pravilo smješe) hemijskih sastava na bazi težinskih udjela razblaženja dva osnovna materijala i jednog dodatnog, pri čemu udio razblaženja korisnik definiše interaktivno upotrebom klizača (slajdera). Iz dobijenog sastava se zatim računaju ekvivalenti hroma i nikla prema metodologijama Schaeffler-a i WRC-1992, nakon čega se određuje položaj

radne tačke na odgovarajućim dijagramima. Na osnovu položaja radne tačke softver procjenjuje mikrostrukturnu fazu i feritni broj, i računa parametar PREN kao mjeru otpornosti na tačkastu (rupičastu) koroziju. Primjer prikaza WRC-1992 dijagrama u softveru Weld Me, sa položajem radne tačke za zavarivanje duplex čelika B2205 sa dodatnim materijalom ER2209, prikazan je na Slici 2.



Slika 2. WRC-1992 dijagram u softveru Weld Me za primjer zavarivanja duplex čelika B2205 sa dodatnim materijalom ER2209

#### 4. VERIFIKACIONI PRIMJER

Verifikacija primijenjenih analitičkih modela je urađena na brojnim primjerima, a najjednostavnija je na formulama ugljeničnih, Schaeffler i WRC-1992 ekvivalentata, jer tačnost isključivo zavisi od preciznosti unešenih vrijednosti legirajućih elemenata.

Primjer: Određivanje temperature predgrijavanja, vremena hlađenja  $t_{8/5}$  i tvrdoće u ZUT [13]. Hemijski sastav čelika P 460 NL1 [13], prikazan je u Tabeli 2.

Tabela 2. Hemijski sastav materijala, čelik P 460 NL1

Element	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Ni
%	0,153	0,380	1,40	0,015	0,0021	0,031	0,037	0,630
Element	Mo	Cu	V	Nb	Ti	B	N	-
%	0,004	0,061	0,099	0,038	0,004	0,0003	0,0052	

### Parametri zavarivanja

Postupak - MIG; Struja - 130A; Napon - 16 V; Brzina zavarivanja - 1,33 mm/s; efikasnost ( $\eta$ ) - 0,68; debljina lima - 14 mm; zaštitni gas - argon + 5,9% CO<sub>2</sub> + 1,1% O<sub>2</sub>; sadržaj difundovanog vodonika - 5 ml/100 gr MZ.

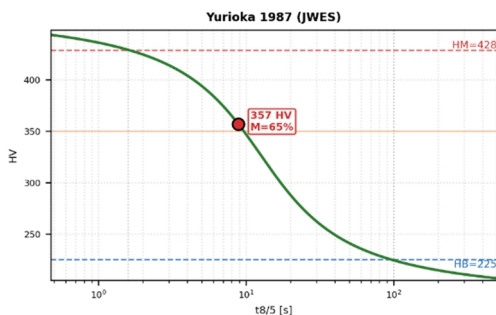
Parametar CET je izračunat na osnovu jednačine (2) i iznosi 0,314 i u softveru i u referentnom radu. Parametar Pcm je izračunat prema formuli (3) i u softveru iznosi 0,263 dok je u referentnom radu 0,261.

U svim slučajevima unos toplote je  $Q = 1,251$  kJ/mm. Izabran je geometrijski faktor  $k = 0,90$ . S obzirom da je debljina lima  $d = 14$  mm, manja od izračunate prelazne debljine  $d_{tr} = 15,8$  mm, prema EN 1011-2 se koristi 2D model i jednačina (8). U Tabeli 3 dat je uporedni prikaz vrijednosti temperature predgrijavanja  $T_p$  i vremena hlađenja  $t_{8/5}$  izračunatih u softveru Weld Me i u referentnom radu [13], za tri različita pristupa: Ito-Bessyo metoda za slabo i jače ukrućen spoj i metoda B prema EN 1011-2. Na Slici 3 prikazan je dio grafičkog interfejsa softvera sa rezultatom proračuna tvrdoće u ZUT-u prema Yurioka modelu, dok je na Slici 4 prikazan Schaeffler dijagram za par materijala P 460 NL1 (osnovni materijal) i VAC 65 (dodatni materijal).

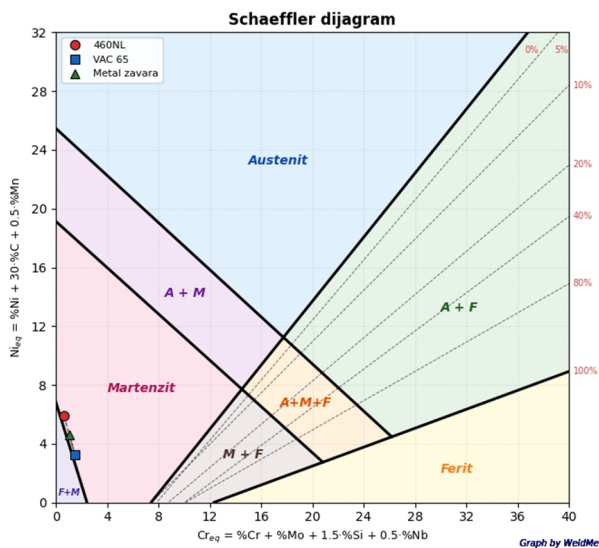
Tabela 3. Uporedni prikaz proračuna temperatura predgrijavanja  $T_p$  i vremena hlađenja  $t_{8/5}$

Postupak	Literatura [13]		Weld Me	
	$T_p$ [°C]	$t_{8/5}$ [s]	$T_p$ [°C]	$t_{8/5}$ [s]
$T_p$ prema Ito-Bessyo (slabo ukrućen spoj)	137	14,2	140	14,404
$T_p$ prema Ito-Bessyo (jače ukrućen spoj)	161	16,2	164	16,496
$T_p$ prema EN 1011-2 (Metoda B)	36	8,7	40	8,883

Tvrdoća u ZUT-u, dobijena pomoću Weld Me softvera po Yurioka formuli [10, 14] iznosi  $HV = 356,6$ , dok izračunata vrijednost za iste parametre, prema literaturnom izvoru [14] iznosi  $HV-5 = 360,4$  što je relativno odstupanje od 1,05%.



Slika 3. – Dio grafičkog interfejsa sa prikazom izračunate HV i dijagrama prema Yurioka metodi



Slika 4. – Schaeffler dijagram za P 460 NL1 + VAC 65

## 5. ZAKLJUČAK

Weld Me je koristan softverski alat u kojem su implementirani analitički modeli za procjenu zavarljivosti čelika, sa odgovarajućim grafičkim prikazima. U ovom radu je dat jedan numerički primjer za čelik P 460 NL1 na osnovu čega se može zaključiti da su odstupanja od referentnih izvora izuzetno mala.

Primjena softvera donosi prednost u pogledu isključivanja subjektivnog pristupa pri tumačenju dijagrama, zatim, daje mogućnost automatskog izbora 2D/3D modela za  $t_8/5$ , kao i mogućnost poređenja više scenarija zavarivanja. Značajna prednost je mogućnost proračuna hemijskog sastava metala zavara koji u kombinaciji sa Schaeffler-ovim i WRC-1992 dijagramom omogućava inženjeru i tehnologu da prije samog zavarivanja procijeni rizik vezan za mikrostrukturu zavarenog spoja.

Granice primjene softvera određene su važećim rasponom implementiranih formula. Program je pouzdan za nelegirane, niskolegirane i visokočvrste konstrukcione čelike (ISO/TR 15608 grupe 1–3), dok za nerđajuće, CrMo/CrMoV i druge specijalne čelike određene rezultate softver eksplicitno označava upozorenjem (vizuelnim indikatorom u korisničkom interfejsu) kao neprimjenjive. Verifikacija je izvršena sa određenim brojem referentnih primjera, dok će opširnija verifikacija sa eksperimentalnim radovima biti predmet daljeg istraživanja i testiranja.

Buduće verzije softvera mogu uključiti integraciju sa CCT dijagramima, proširenu bazu dodatnih materijala, automatske preporuke za izbor dodatnog materijala i eventualno jednostavniju verziju softvera za web i mobilne uređaje.

## LITERATURA

- [1] MEST EN 1011-1:2010 - Zavarivanje - Preporuke za zavarivanje metalnih materijala - Dio 1: Opšte uputstvo za elektrolučno zavarivanje.
- [2] MEST EN 1011-2:2010, Zavarivanje - Preporuke za zavarivanje metalnih materijala - Dio 2: Elektrolučno zavarivanje feritnih čelika.
- [3] MEST EN 1011-3:2020, Zavarivanje - Preporuke za zavarivanje metalnih materijala - Dio 3: Elektrolučno zavarivanje nerđajućih čelika.
- [4] ISO 15608:2025, Welding — Grouping system for metallic materials.
- [5] Prokić Cvetković, R., Popović, O., Metalurgija zavarivanja, Beograd, 2019.
- [6] Kotecki, D.J., Siewert, T.A., "WRC-1992 Constitution Diagram for Stainless Steel Weld Metals", *Welding Journal*, Vol. 71, No. 5, 1992.
- [7] Lippold, J.C., Kotecki, D.J., *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels*, Wiley-Interscience, 2005.
- [8] Yurioka, N., Kasuya, T., "A Chart Method for Determination of Preheat Temperature", *IIW Doc. IX-2074-04*, 2004.
- [9] Stout, R.D., Doty, W.D., *Weldability of Steels*, Welding Research Council, New York, 4th edition, 1978.
- [10] Yurioka, N., "Prediction of HAZ Hardness of Transformable Steels", *Metal Construction*, Vol. 19, No. 4, 1987, pp. 217–223.
- [11] K. W. Andrews, "Empirical Formulae for the Calculation of Some Transformation Temperatures," *JISI*, July 1965, pp. 721-727.
- [12] Lukas Quackatz, Elin Marianne Westin, Axel Griesche, Arne Kromm, Thomas Kannengiesser, Kai Treutler, Volker Wesling, Sten Wessman "Assessing ferrite content in duplex stainless weld metal: WRC '92 predictions vs. practical measurements", *Welding in the World* (2025), 69:31–45.
- [13] Radomir Jovičić, Radica Prokić Cvetković, Olivera Popović, Nenad Milošević, "Metode za izračunavanje temperatura predgrevanja pri zavarivanju čelika povišene i visoke čvrstoće", *Zavarivanje i zavarene konstrukcije*, 61(3), 115-119., Zbornik radova sa savetovanja "ZAVARIVANJE 2016".
- [14] [https://www-it.jwes.or.jp/weld\\_simulator/en/](https://www-it.jwes.or.jp/weld_simulator/en/) Pristupljeno: april 2026



Društvo za  
Zavarivanje  
Crne Gore

1. Konferencija sa međunarodnim učešćem

## „TEHNOLOGIJE SPAJANJA MATERIJALA“

14 - 16. maj 2026. godine, Bečići, Crna Gora



MAŠINSKI  
FAKULTET  
PODGORICA

Miro Uran<sup>1,\*</sup>, Vital Uran<sup>1</sup>, Miloš Jovanović<sup>1</sup>

### SAVREMENI PRISTUPI U OBUCI KOORDINATORA I INSPEKTORA ZA METALNE KONSTRUKCIJE U SKLADU SA ZAHTEVIMA EU CPR

**Rezime:** U radu je predstavljen model uvođenja hibridnog (mešanog) načina edukacije za koordinatore i inspektore metalnih konstrukcija (prema EN 1090), prilagođen novim zahtevima EU Uredbe o građevinskim proizvodima (CPR) 2026–2029, s fokusom na održivosti, digitalizaciji i CE označavanju, kao i novostima u regulativi koje će biti implementirane tokom nekoliko narednih godina. Tematika je usmerena ka simultanom učenju inspektora i rukovodilaca odgovornih za izradu metalnih konstrukcija.

Model obuke se sastoji od:

- Online modula: Teorijski deo preko LMS (Moodle) i Zoom predavanja na daljinu, praktičnih predavanja i učenja na daljinu. Pokriva sve potrebne teme iz teorijskog dela CPR, EN 1090-2 (izvođenje), EN ISO 3834 (zavarivanje) i EN ISO 9712 (IBR),
- Praktičnog dela: Terenska ili video obuka za ispitivanje zavara (VT/PT/UT), antikorozijsku zaštitu (EN ISO 12944 C1–C5), dimenzionu kontrolu (EN ISO 11048), vijčane veze (EN 1993-1-8) itd.
- On-line ispita: Nadzirani pismeni ispiti na računarima za teorijska znanja, te Zoom usmeni ispiti na daljinu.

Program je moderan, parcijalizovan na male zatvorene jedinice s ciljem testiranja novih EU pravila za mikro kredite i mikro kurseve, koji se mogu na kraju spojiti u jednu veću celinu. Program je povezan i sa IIW/ERF specijalizacijom u delu koji se odnosi na tehnologiju zavarivanja, što može skratiti ukupno trajanje specijalizacije. Razvoj i implementaciju ovakvog načina obuke odgovornog osoblja podržavaju RR projekti EU.

**Ključne reči:** EN 1090, CPR, zavarivanje, edukacija

<sup>1</sup> Institut za varilstvo d.o.o., Ljubljana, Republika Slovenija

\* Korespondentni autor, mail: miro.uran@i-var.si

# MODERN APPROACHES TO TRAINING COORDINATORS AND INSPECTORS FOR METAL STRUCTURES IN ACCORDANCE WITH EU CPR REQUIREMENTS

**Abstract:** *The paper presents a model for introducing a hybrid (blended) training approach for coordinators and inspectors of metal structures (according to EN 1090), adapted to the new requirements of the EU Construction Products Regulation (CPR) 2026–2029. It focuses on sustainability, digitalization, and CE marking, as well as upcoming regulatory updates to be implemented over the next few years. The topic targets the simultaneous training of inspectors and managers responsible for manufacturing metal structures. The training model consists of:*

- *Online modules: Theoretical content delivered via LMS (Moodle) and Zoom lectures, including remote practical sessions and distance learning. It covers all required topics from the theoretical parts of CPR, EN 1090-2 (execution), EN ISO 3834 (welding), and EN ISO 9712 (NDT).*
- *Practical component: Field or video-based training for weld inspection (VT/PT/UT), corrosion protection (EN ISO 12944 C1–C5), dimensional control (EN ISO 11048), bolted connections (EN 1993-1-8), etc.*
- *Online exams: Supervised written computer-based tests for theoretical knowledge, along with Zoom oral exams.*

*The program is modern and modularized into small, self-contained units to test new EU rules for micro-credentials and micro-courses, which can later be combined into a larger whole. It is also linked to IIW/EWF specialization in welding technology sections, potentially shortening the overall specialization duration. The development and implementation of this training approach for responsible personnel are supported by EU Recovery and Resilience (RR) projects.*

**Keywords:** EN 1090, CPR, welding, education

## 1. UVOD

Evropska unija je 2011. godine usvojila Uredbu (EU) br. 305/2011 o građevinskim proizvodima (CPR), koja je stupila na snagu 10. jula 2013. godine i zamijenila stariju Direktivu 89/106/EEC. Ova uredba propisuje usklađena pravila za stavljanje građevinskih proizvoda na tržište unutar EU, s fokusom na sigurnosti i kvalitetu.

Standard EN 1090-1, koji reguliše izradu čeličnih i aluminijumskih konstrukcija, usvojen je kao usklađeni standard u okviru CPR-a, a njegova upotreba postala je obavezna 1. jula 2014. godine. To je omogućilo proizvođačima da svoje proizvode označe CE oznakom, što osigurava usklađenost sa tehničkim zahtevima za konstrukcije. Ovi propisi sa

kontinuiranim ažuriranjima danas predstavljaju osnovu za certifikaciju u Sloveniji. Godine 2024. objavljena je nova Uredba o građevinskim proizvodima (CPR) EU 2024/3110, koja je zamenila prethodnu Uredbu (EU) br. 305/2011 o građevinskim proizvodima (CPR), kojom su utvrđena usklađena pravila za stavljanje građevinskih proizvoda na tržište u EU.

Nova uredba uvodi strože zahteve za održivost, cirkularnu ekonomiju, digitalizaciju i sigurnost građevinskih proizvoda, uključujući promovisanje recikliranja materijala i bolju procenu uticaja na životnu sredinu. Stupila je na snagu 7. januara 2025. godine, a ključne odredbe postepeno su se počele koristiti od 8. januara 2026. Implementacija će trajati više godina, što će proizvođačima građevinskih proizvoda omogućiti lakše prilagođavanje na novosti [1].

Prema važećim standardima, potrebno je obezbediti odgovarajuće kvalifikovane vođe projekata, vođe kvaliteta i inspektore za sva područja obuhvaćena standardom EN 1090. Ta područja su: implementacija i pregled projektovanja, pregled i nadzor proizvodnje, zavarivanje, NDT kontrola, vijčano spajanje, montaža, zaštita od korozije, dimenziona kontrola i drugo. U Evropi je obuka i certifikacija celokupnog zavarivačkog osoblja definisana smernicama IIW (Međunarodni institut za zavarivanje), a NDT osoblje se obučava i certifikuje prema važećim EN ISO standardima. Za osoblje koje izvodi i nadzire izvođenje zaštite od korozije, postoji system obuke FROSIO, koji je previše zahtevan za većinu kompanija, a drugih odgovarajućih oblika obuka osoblja za ovo područje za sada nemamo.

Institut za zavarivanje iz Ljubljane je trenutno kao partner uključen u četiri EU razvojna projekta u ovoj oblasti. Institut je uvođenjem novih metoda kombinovanog učenja od 2015. godine postao jedan od pionira učenja na daljinu za sve nivoe zavarivačkog osoblja. Po broju stanovnika Slovenija je dugi niz godina najuspešnija zemlja na svetu u obrazovanju međunarodnih inženjera zavarivanja (IWE). Uvođenjem savremenih metoda učenja je taj broj IWE kandidata višestruko veći.

U ovom radu je opisan razvoj savremenih obrazovnih sistema, koji je prilagođen potrebama CPR direktive, zatim novi principi učenja na radnom mestu, učenje na daljinu i kombinovano učenje, kao i primeri dobre prakse u novim evropskim principima mikrokurseva i mikro dokaza [2].

## **2. RAZVOJ**

### **2.1. Prva faza**

Na Institutu za varilstvo smo u prvom koraku razvili sistem za certificiranje kompanija putem imenovanog tela EU. Dobili smo odobrenje od Slovenačke akreditacije (SA) i notifikaciju od Evropske komisije kao imenovano telo pod rednim brojem NB- 2042. Tokom prvih pet godina certificiranja proizvodnje u više od 500 kompanija, stekli smo široku bazu znanja o potrebama

kompanija. Nakon prgleda i analize tih potreba pripremili smo odgovarajuće nastavne planove i programe za obuku odgovornog osoblja za potrebe standarda EN 1090. U okviru **BET** projekta pripremili smo sistem rada, sistem za učenje na daljinu preko platforme Moodle, kao i materijale i praktične vežbe, te na kraju organizovali pilotni kurs, koji je 80% izveden na daljinu, 10% kroz predavanja i 10% kroz praktično vođeni rad. Kao ključni deo projekta je bila obuka osoblja, koju smo izvršili u obliku kombinovanog kursa za vođe osiguranja kvaliteta u kompanijama i inspektore za EN 1090. Teorijsko znanje je osnova za praktične zadatke koji su bili izvedeni kao planirana konfrontacija inspektora s odgovornim osobama u kompaniji. Paralelno s ovim razvojnim trendovima, uspostavljena je interaktivna online učionica "all-in-one" za kurs Međunarodnog inženjera zavarivanja (IWE). Većina programa se održava na daljinu putem predavanja uživo (Zoom), uz dodatak praktične obuke u Sloveniji. Istovremeno je postepeno uveden i sisteme za izvođenje ispita na daljinu. Zbog svoje visoke fleksibilnosti, takav pristup omogućava polaznicima da usklade obrazovanje sa poslovnim obavezama, što se ogleda u izrazito međunarodnoj strukturi kandidata (EU, Balkan, Bliski istok, Indija itd). Dodatna prednost je činjenica da je osoblje sa Institutu za varilstvo angažovano na auditima za sisteme mešovitog učenja (BL) na IIW specijalizacijama. To nam omogućava da aktivno pratimo i implementiramo primere dobre prakse na nivou cele Evrope [1, 3].

## 2.2. Druga faza

Implementirali smo i testirali sistem pismene i usmene provere znanja na daljinu. Sistem je testiran, optimizovan nekoliko puta i konačno prihvaćen u smeernicama IIW i EWF za sve ispite. Naravno, sistem je potrebno neprekidno kontrolisati i ažurirati. Poslednji izazov je kako kandidatima tokom ispita na daljinu onemogućiti upotrebu nedozvoljenih sredstava (pre svega veštačke inteligencije), bez velikih ulaganja u kontrolisana ispitna okruženja ili obiman trodimenzionalni video nadzor.

## 2.3. Treća faza

EU projekat **FiVE** ima za cilj oblikovanje održivog i korisnog okvira za implementaciju kratkih kurseva (mikro kurseva), koji će omogućiti dobijanje međunarodno važećeg formalnog digitalnog zapisa (dokumenta, potvrde) o stečenim kvalifikacijama putem tzv. mikro-potvrda (*eng. micro-credentials*). To predstavlja jedan od ključnih razvojnih zadataka Evropske komisije u obrazovanju odraslih.

Sklop od nekoliko tako povezanih mikro kurseva dovest će do sticanja određene kvalifikacije ili diplome, kojom će zaposleni na brz i efikasan način pokriti specifične praznine u kompetencijama koj su potrebne kompanijama, a klasičnim obrazovanjem takva znanja nije moguće steći. Najnovije politike u oblasti obrazovanja i obuke vode do fleksibilne

mogućnosti prilagođavanja sadržaja učenja stvarnim potrebama, potrage za specifičnim znanjem u usko specijalizovanim oblastima i harmonizaciju ishoda učenja, koji bi potom bili priznati i prihvaćeni u EU i šire [2].

Razvoj opisanog modela obuke u projektu **FiVE** odvija se na dva potpuno različita područja, ali oba područja zahtevaju vrlo fokusirano znanje. Ova dva područja su obuka osoblja za rad na farmama ribe i obuka inspektora za EN 1090, gde će stečena stručnost omogućiti obavljanje zadataka vezanih za nadzor proizvodnje ili dokumentacije čeličnih konstrukcija koje spadaju pod Uredbu o građevinskim proizvodima. Očekuje se da će Evropska komisija iz projekta steći dobre prakse koje bi pomogle u definisanju konačnih zajedničkih smernica.

Proces smo optimizovali kroz **IQMET** projekat, koji je nastavio razvoj inovativnih metoda za obuku zavarivačkog osoblja korištenjem obogaćene stvarnosti (AR) i virtualne stvarnosti (VR). Nakon uspešne početne faze u kojoj su razvijeni prvi simulatori i osnovni moduli za učenje, u protekloj godini izvedeno je nekoliko pilot aktivnosti u saradnji s obrazovnim organizacijama i industrijskim partnerima. Na osnovu tih iskustava, osmišljen je inovativni kurikulum s didaktičkim materijalima kao podrška nastavnicima i instruktorima u integraciji digitalnih tehnologija u obrazovanju.

Važan korak napred je i priprema studija praktičnih primera zasnovanih na analizama stvarnih nesreća i uspešnih implementacija projekata zavarivanja. Ovi slučajevi pružaju dublje razumevanje tehničkih i organizacijskih aspekata zavarivanja, kako za zavarivače, tako i za inspektore zavarivanja. U budućnosti, projekat će se fokusirati na smanjenje uticaja na okolinu (ozelenjavanje) zavarivanja, što uključuje razumevanje uticaja tehničkih odluka, parametara procesa i korištenih materijala na održivost okoline.

Celokupan proces se trenutno optimizuje kroz projekat **HighFive**, koji ima za cilj objedinjavanje znanja i iskustva trenera, instruktora i stručnjaka iz reprezentativnih javnih organizacija i kompanija koje primenjuju Uredbu o građevinskim proizvodima (CPR) kako bi se uspostavio optimalan obrazovni sistem i podržala politika zasnovana na dobroj praksi širom Evrope. Ove mreže organizacija će se fokusirati na razvoj ekosistema znanja, koji će kontinuirano unapređivati znanja, veštine i kompetencije vezane za kontrolu kvalitete (QC) i inspekciju CPR proizvoda.

Kao odgovor na rastuću popularnost digitalnog učenja, posebno nakon pandemije, projekat se fokusira na razvoj, testiranje i izvajanje eksperimentalne digitalne obuke za nastavnike/predavače i učenike na nivou Evropskog kvalifikacijskog okvira (EQF) 3–6 [3, 4].

### **3. REZULTATI I DISKUSIJA**

Navedeni EU projekti su usmereni u razvoj inovativnih nastavnih planova i programa, smernica za podučavanje i resurse za e-učenje kako bi se promovisala zelena tranzicija i održivost u industriji CPR-a. Ovo će imati primetne dugoročne uticaje na kvalitet i sigurnost novih, inovativnih proizvoda i struktura za proizvodnju CPR-a, a istovremeno će smanjiti troškove kontrole kvalitete i inspeksijskog nadzora.

Javno-privatna partnerstva će biti uspostavljena za razvoj programa obuke na radnom mestu, za standardizaciju i zagovaranje novog usklađenog evropskog ekosistema učenja odraslih za CPR korištenjem jedinica za kompetencija (CU) i razmenu znanja i veština između pedagoga, stručnjaka iz industrije i kreatora politika. Fokus će biti na uključivanju industrije i uvođenju novih proizvoda i tehnologija kontrole kvaliteta koji će značajno uštedeti troškove proizvodnje.

### **4. ZAKLJUČCI**

Standardizovane metode za proveru kvaliteta i dostupnosti obrazovanja će biti razvijene, testirane i implementirane za celu EU. Pored stečenog potrebnog znanja i optimizovanog kombinovanog obrazovanja, korisnici će takođe imati koristi od usklađenih mikro-potvrda koje će biti važeće u celoj EU.

### **ZAHVALNICA**

Sva četiri projekta finansirana su iz Erasmus+ programa Evropske unije. Evropska komisija ne sofinansira izradu ove publikacije niti sofinansira njen sadržaj, koji odražava isključivo stavove autora, te se Komisija ne može smatrati odgovornom za bilo kakvu upotrebu koja se može izvesti iz nje.

### **LITERATURA**

- [1] D2.2 EN1090 Inspector Course Guideline, September 2025.
- [2] The Five project website: <https://www.stimuli2.no/project/five>, september 2025.
- [3] D3.2 Baseline guideline containing the user requirement specification for micro courses applying CUs leading to MCs, and MQs that are recognized by industry and VET providers, September 2025.
- [4] Innovative Scalable High-Impact Excellence Learning that Engage, Explore, Explain, Elaborate and Evaluate Optimized Adult Education, Project proposal, EU Grants: Application form (ERASMUS BB and LS Type II): V2.0 -01.06.2022.



Društvo za  
Zavarivanje  
Crne Gore

1. Konferencija sa međunarodnim učešćem

## „TEHNOLOGIJE SPAJANJA MATERIJALA“

14 - 16. maj 2026. godine, Bečići, Crna Gora



**Zoran Nikolić<sup>1\*</sup>**

### **EFIKASNOST PRIMENE ULTRAZVUČNE TEHNIKE (TFM) ZA ISPITIVANJE ZAVARENIH SPOJEVA**

**Rezime:** Sa ubrzanim napretkom industrije zavarivanja javila se i potreba za razvijanjem novih tehnika zapreminskog ispitivanja koje mogu da prate tu granu industrije i na taj način doprinesu tržištu u smislu rokova i zahtevanih kvaliteta. Ultrazvučna metoda je zasigurno jedna od najzastupljenijih i najpouzdanijih, međutim konvencionalna impuls-eho tehnika, kao takva nije mogla da isprati tempo kojim je napredovala industrija zavarivanja. Razvojem računarske elektronike, informatike i softverskog inženjeringa stvorili su se uslovi da neke od poznatih svetskih kompanija koje se bave proizvodnjom ultrazvučne opreme i softvera za njih, osmisle nove tehnike ultrazvučne metode i na taj način omoguće da NDT ispitivanje ne zaostaje za procesom zavarivanja. Zahvaljujući tome ultrazvučna metoda i dalje ostaje u samom vrhu kao najzastupljenija i najpouzdanija za ispitivanje bez razaranja zavarenih spojeva. Jedna od tih tehnika jeste Full Matrix Capture/Total Focusing Method (FMC/TFM), kod nas poznatija kao tehnika potpunog fokusiranja. Tehnika TFM je relativno nova i njena intenzivnija primena u industriji kreće sa početkom ovog veka. Najpre u ekonomski i industrijski najrazvijenijim zemljama Evrope i sveta a od skoro i u našoj zemlji, odnosno u našoj kompaniji. Naime, od pre nekoliko godina je u našoj fabrici otpočelo ispitivanje zavarenih spojeva ovom tehnikom. Nabavljeni su uređaji i oprema, obučeni ispitivači, usvojene procedure i nabavljeni relevantni standardi koji propisuju pravila i daju smernice za primenu ove tehnike ispitivanja. Nakon toga je TFM tehnika implementirana u proces ispitivanja zavarenih spojeva. U ovom radu, zasnovanom na iskustvima iz industrijske prakse, biće opisane prednosti primene ultrazvučne tehnike TFM i njena efikasnost u ispitivanju bez razaranja zavarenih spojeva i dostizanju zahtevanog kvaliteta u našoj fabrici.

**Ključne reči:** Full Matrix Capture/Total Focusing Method, zavareni spojevi, ispitivanje bez razaranja, ultrazvučna metoda, tehnika ispitivanja

<sup>1</sup> Siemens Mobility, Kragujevac, Republika Srbija

\* Korespondentni autor, mail: zoran.nikolic@siemens.com

## EFFICIENCY OF APPLYING ULTRASONIC TECHNIQUE (TFM) FOR TESTING WELDED JOINTS

**Abstract:** *With the accelerated progress of the welding industry came the need to develop new volumetric testing techniques that can follow this branch of the industry and thus contribute to the market in terms of deadlines and required qualities. The ultrasonic method is certainly one of the most widespread and reliable, however, the conventional pulse-echo technique, as such, could not keep up with the pace at which the welding industry was advancing. With the development of computer electronics, informatics and software engineering, the conditions have been created for some of the world's well-known companies that manufacture ultrasonic equipment and software for them to come up with new techniques of the ultrasonic method and thus enable NDT testing to not lag behind the welding process. Thanks to this, the ultrasonic method still remains at the very top as the most common and reliable method for non-destructive testing of welded joints. One of those techniques is the Full Matrix Capture/Total Focusing Method (FMC/TFM), better known here as the total focusing technique. The TFM technique is relatively new and its intensive application in the industry started at the beginning of this century. First, in the most economically and industrially developed countries in Europe and the world, and from now on in our country, that is, in our company. Namely, since a few years ago, testing of welded joints using this technique began in our factory. Devices and equipment have been acquired, examiners have been trained, procedures have been adopted and relevant standards have been acquired that prescribe rules and provide guidelines for the application of this testing technique. After that, the TFM technique was implemented in the process of testing welded joints. In this paper, based on experiences from industrial practice, the advantages of applying the ultrasonic TFM technique and its effectiveness in non-destructive testing of welded joints and reaching the required quality in our factory will be described.*

**Keywords:** Full Matrix Capture/Total Focusing Method, welded joints, non-destructive testing, ultrasonic method, testing technique

### 1. UVOD

Izrađujući komponente za šinska vozila za globalno poznatog kupca mi smo u fabrici bili prinuđeni da pratimo i najsavremenije tokove u smislu ispitivanja zavarenih spojeva na tim komponentama. U početku proizvodnje smo zavarene spojeve ispitivali zapreminski ultrazvučnom tehnikom Puls Echo - PE [1]. Kada nije bilo mogućnosti da se pojedini spojevi iz raznoraznih razloga ispituju ultrazvukom, tehnikom PE, mi smo angažovali eksternu laboratoriju koja nam je uslužno ispivala te spojeve metodom RT.

Sa povećanjem obima proizvodnje i proširivanjem proizvodnih kapaciteta ispostavilo se da ova tehnika ne može da prati u kontinuitetu tempo koji je proizvodnja postavila pred kontrolu kvaliteta i da zadovolji zahtevani kvalitet a ne ugrozi rokove. Angažovanje eksterne laboratorije je moglo biti samo nedovoljna pomoć. Tržište na koje su plasirani naši proizvodi insistiralo je na dva ključna zahteva: kvalitet proizvoda i rok isporuke.

To je bio jasan signal da moramo krenuti u osvajanje novih tehnika zapreminskog ispitivanja.

Postoje zavareni spojevi koji su veoma nezgodno pozicionirani na sklopovima. Ponekad sama geometrija spoja, osnovnog materijala, ograničenje u smislu brušenja lica šava na nivo osnovnog materijala i sl. ne dozvoljavaju primenu TFM tehnike. Takve situacije nisu česte, ali kada se one ipak dese tada moramo da pribegnemo ispitivanju tehnikom Puls Echo ili radiografiji.

Počelo je intenzivno traganje za savremenim metodama i tehnikama ultrazvučnog ispitivanja. Sa kolegama iz fabrike u Nemačkoj smo počeli saradnju koja je bila zasnovana na njihovom iskustvu u ispitivanju ultrazvukom zavarenih spojeva, tehnikom Full Matrix Capture/Total Focusing Method (FMC/TFM) [2]. Oni su još ranije počeli da primenjuju ovu tehniku u pogonima svoje fabrike i imali su određenih iskustava.

Tehnika TFM se pokazala kao vrlo efikasna, pouzdana i relativno brza u primeni u odnosu na Puls Echo, klasični Phased array i neke druge tehnike ultrazvučnog ispitivanja zavarenih spojeva.

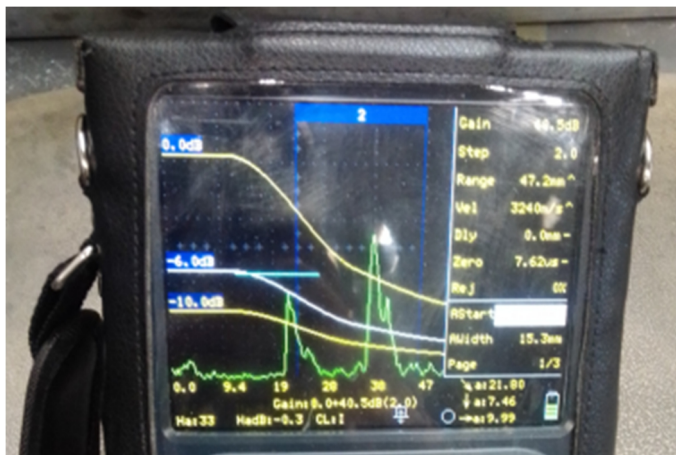
Nakon pribavljanja opreme za TFM, ISO standarda [3] i razmene iskustava sa kolegama u Nemačkoj, mi smo počeli tu tehniku da primenjujemo u našoj fabrici gde je i danas najzastupljenija u NDT ispitivanju zavarenih spojeva. Efikasnost primene TFM-a mnogo puta je dokazana i potvrđena u odnosu na druge tehnike ultrazvučnog ispitivanja i zapreminske metode NDT.

## **2. EFIKASNOST PRIMENE**

Kada neki zavareni spoj ispitujemo ultrazvučnom tehnikom Puls echo, bez sumnje možemo dobiti pouzdane rezultate, međutim takav proces je dosta spor za današnju industriju bez obzira i na neke njegove prednosti u odnosu na druge tehnike. Relativno sporo vođenje sonde, proces podešavanja i kalibracije uređaja i opreme, tumačenje i analiza ehoa od referentnih reflektora i dr. traže dosta potrošenog vremena što direktno utiče na tok proizvodnog procesa i njegovo usporavanje. Pored toga, za tumačenje i analizu rezultata ispitivanja ovom tehnikom potrebno je i značajno operativno iskustvo ispitivača.

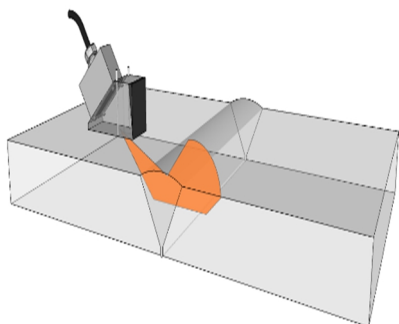
Na Slici 1 možemo videti izgled ekrana ultrazvučnog defektoskopa i na njemu prikazane ehoe od reflektora koji su detektovani primenom Puls echo tehnike. Kako bi operater doneo ispravnu odluku o kvalitetu ispitanog spoja on treba da poznaje do detalja principe ultrazvučne metode, određene

fizičke zakone, standard [4] i da jasno razume pojavu ehoa na ekranu uređaja.

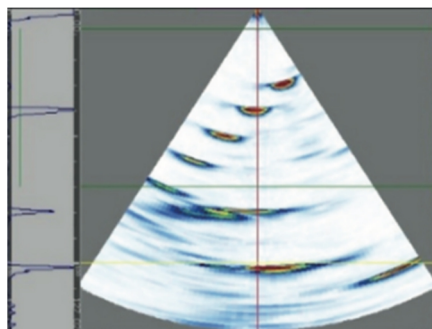


Slika 1. Prikaz ehoa od reflektora primenom Puls eho tehnike

Prvi pokušaj da ubrzamo ispitivanje ultrazvukom i da dobijemo efikasne i pouzdane rezultate doveo nas je do klasične Phased Array tehnike. Tu je proces ispitivanja donekle bio ubrzan, međutim imali smo problema sa pozicioniranjem i vođenjem ispitnih sonda paralelno osi šava zbog geometrije osnovnog materijala, različitih kaskada u neposrednoj blizini šava i samim tim sa nedovoljnom pokrivenošću zapremine metala šava i zone uticaja toplote. Od kupca smo dobijali primedbe u smislu nedovoljne pokrivenosti metala šava i zone osnovnog materijala oko metala šava što je posebno važna činjenica kada se u obzir uzme da su ispitivanja sprovedena na komponentama od legura aluminijuma [5]. Na Slici 2 može se videti ilustracija prostiranja snopa ultrazvučnih talasa, a na Slici 3 prikaz snopa talasa i detektovanih reflektora na uređaju pri primeni UT/PA tehnike.

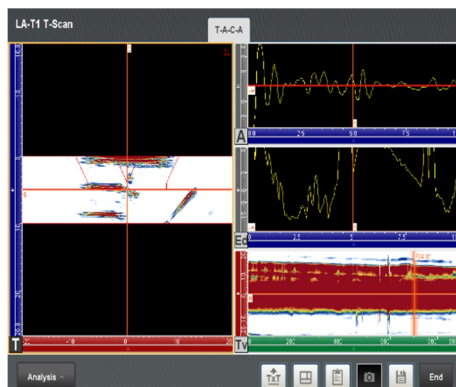


Slika 2. Ilustracija snopa UT talasa

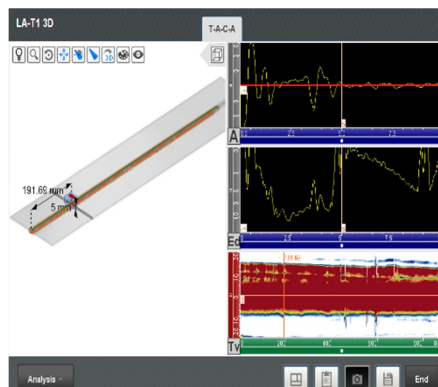


Slika 3. Prikaz na ekranu uređaja

Sledeći korak bio je uvođenje FMC/TFM tehnike za ispitivanje na insistiranje naših kupaca. Ovom tehnikom smo dobili neuporedivo brže, lakše i preciznije skeniranje zavarenih spojeva. Dobili smo slike na ekranu uređaja visoke rezolucije sa detaljnim prikazom defekata. Kako smo mogli analizirati snimke i u 3D modu, sumnje u pouzdanost rezultata ispitivanja nije bilo. Na slikama 4 i 5 prikazan je izgled reflektora na ekranu primenom TFM tehnike.



Slika 4. Prikaz T- Scan



Slika 5. Prikaz 3D mod

Pouzdana smo mogli da detektujemo mikro nesavršenosti u metalu šava i da ih okarakterišemo, utvrdimo njihovu orijentaciju i na taj način svedemo na minimum rizik od mogućih lažnih reflektora. Značajno smo smanjili operativno vreme potrebno za testiranje u odnosu na prethodno pomenute tehnike. Mogućnošću konstruisanja zone od interesa (ROI) eliminisali smo problem pozicioniranja sonde i pleksi klina za pokrivenost potrebne zapremine ispitivanja. Obučiti kolege za sam proces skeniranja bio je neuporedivo jednostavniji i brži posao u odnosu na konvencionalne tehnike. Tumačenje i analizu snimaka moguće je izvesti nevezano za vreme skeniranja budući da se oni nalaze u memoriji uređaja i može im se pristupiti u bilo kom momentu.

### 3. ZAKLJUČAK

Efikasnost TFM tehnike, u odnosu na prethodno dve pomenute u ovom radu, dokazivana je svakim novim projektom i zavarenim spojem koji smo ispitivali. Dostigli smo visoku pouzdanost u pronalaženju nesavršenosti, značajno smanjili operativno vreme ispitivanja i samim tim nismo usporavali proizvodnju, a uspehi smo da podignemo potvrdu zahtevanog kvaliteta za naše zavarene spojeve na najviši nivo.

## **LITERATURA**

- [1] EN ISO 16810:2012 – Non-destructive testing – Ultrasonic testing – General principles, CEN, European Committee for Standardization, Brussels.
- [2] ISO 23865:2021 – Non-destructive testing – Ultrasonic testing – General use of full matrix capture / total focusing technique (FMC / TFM) and related technologies, ISO, iiw, Vernier, Geneva, Switzerland.
- [3] ISO 23864:2021 – Non-destructive testing of welds – Ultrasonic testing – Use of automated total focusing technique (TFM) and related technologies, ISO, iiw, Vernier, Geneva, Switzerland.
- [4] ISO 17640:2018 - Non-destructive testing of welds – Ultrasonic testing – Technique, testing levels, and assessment, ISO, Vernier, Geneva, Switzerland.
- [5] Prokić Cvetković, R., Popović, O., Metalurgija zavarivanja, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2019.



**Srdan Bulatović<sup>1,\*</sup>, Zorica Kovačević<sup>1</sup>, Vujadin Aleksić<sup>1</sup>**

## **MIKROSTRUKTURE PERLITNE ŠINE SUČEONO ZAVARENE VARNIČENJEM**

**Rezime:** U ovom radu su predstavljeni rezultati mikrostrukturne analize zavarenog spoja železničke šine od čelika klase R260. Železničke šine su zavarene tehnikom elektrootpornog zavarivanja varničenjem. Zavarivanje varničenjem (FBW) je dvostepena tehnika elektrootpornog zavarivanja kojom se metalni delovi spajaju propuštanjem visoke električne struje kroz njih radi stvaranja lokalizovane toplote, nakon čega sledi brzo kovanje pod visokim pritiskom i brzo hlađenje. Visoke temperature i velike brzine zagrevanja i hlađenja tokom termičkog ciklusa zavarivanja značajno utiču na fazni sastav, veličinu zrna i svojstva rezultujućeg spoja. Za mikrostrukturno ispitivanje, uzorak je isečen iz uzdužnog preseka glave šine, koji je obuhvatao središnju liniju stapanja, zonu stapanja, zonu uticaja toplote i zonu osnovnog materijala šine bez uticaja toplote. Mikrostrukturna analiza zavarenog spoja je izvršena sa ciljem provere njegove sposobnosti da obezbedi kvalitet zavarene šine u skladu sa zahtevima propisanog standarda. Ključne mikrostrukturne oblasti (od centra zavara ka spolja) su: linija stapanja (srednja linija zavara), zona uticaja toplote (HAZ) i osnovni metal. Zona uticaja toplote je veoma široka, što značajno utiče na osobine spoja, i može se podeliti na krupnozrnastu zonu, zonu mešovitog zrna i fino-zrnastu zonu. Mikrostruktura iz centralne zone stapanja sadrži krupna zrna perlita sa proeutektoidnim feritom na granicama primarnih austenitnih zrna. Udaljavanjem od središnje linije zavara prema osnovnom metalu, veličina zrna perlita se smanjuje do nivoa najfinijeg zrna u interkritičnoj zoni. Perlit u ovoj zoni je delimično sferoidizovan. Nagla promena veličine zrna mogla se jasno uočiti pri prelasku iz interkritične u subkritičnu zonu. Mikrostruktura subkritične zone je veoma slična mikrostrukтури osnovnog metala u pogledu faze i veličine zrna. Svrha ovog rada je da predstavi praktično iskustvo u primeni FBW metode i da ukaže na usklađenost karakteristika kvaliteta zavarenog šinskog spoja sa zahtevima propisanog standarda.

<sup>1</sup> Institute IMS a.d., Belgrade, Republic of Serbia

\* Corresponding author, mail: srdjan.bulatovic@institutims.rs

**Ključne reči:** mikrostruktura, zavarivanje varničenjem, perlit, ferit, cementit

## MICROSTRUCTURES OF A FLASH BUTT WELDED PEARLITIC RAIL

**Abstract:** *This paper presents the results of the microstructural analysis of a welded joint of a railway rail made of R260 grade steel. The railway rails were welded using the electric resistance welding technique. Flash Butt Welding (FBW) is a two-stage resistance welding technique that fuses metal parts by passing a high electric current through them to create localized heat, followed by rapid, high-pressure forging and rapid cooling. High temperatures and high heating and cooling rates during the welding thermal cycle significantly affect the phase composition, grain size and properties of the resulting joint. For microstructural testing, a sample was cut from a longitudinal section of the rail head, which included the fusion centerline, fusion zone, heat affected zone, and the rail base material zone without thermal impact. Microstructural analysis of the welded joint was performed with the aim of verifying its ability to ensure the quality of the welded rail in accordance with the requirements of the prescribed standard. The key microstructural areas (from the center of the weld outwards) are: the fusion line (center line of the weld), the heat affected zone (HAZ) and the base metal. The heat-affected zone is very wide, which significantly affects the joint properties, and can be divided into coarse-grained zone, mixed-grained zone and fine-grained zone. The microstructure from the central melting zone contains coarse pearlite grains with proeutectoid ferrite at the primary austenite grain boundaries. Moving away from the centerline of the weld toward the base metal, the pearlite grain size decreases to the level of the finest grains in the intercritical zone. Pearlite in this zone is partially spheroidized. A sharp change in grain size could be clearly observed when moving from the intercritical to the subcritical zone. The microstructure of the subcritical zone is very similar to the microstructure of the base metal, in terms of phase and grain size. The purpose of this paper is to present the practical experience of applying the FBW method and to indicate the conformity of the quality characteristics of rail welded joints with the requirements of the applicable standards.*

**Keywords:** microstructure, flash butt welding, pearlite, ferrite, cementite

### 1. INTRODUCTION

During the track-laying process, rail sections are joined into longer, continuous lengths, commonly reaching 200 to 500 meters or more for transport to the site [1]. The two main welding methods used to connect these rails are flash-butt welding and thermite welding. Thermite welding relies on an intense exothermic chemical reaction between iron oxide and

aluminum powder to produce molten metal, at temperatures of up to 3000°C. This molten metal acts as a filler, joining metal parts together without the need for external electricity. Flash-butt welding (FBW) in railways is a highly automated, high-strength process for joining rail ends by applying intense electric resistance heating and hydraulic pressure without filler material. It produces exceptionally durable, homogeneous, and continuous welded rails, reducing maintenance by eliminating bolted joints [2]. FBW welding has become the dominant technology for producing continuous welded rails in modern railway systems. Its rise in popularity is driven by the need for high-quality, durable tracks that can support increased axle loads and higher train speeds.

Despite the high reliability of welded rails by the FBW method, welded joints still present a discontinuity in the track structure due to variations in microstructure, mechanical properties and residual stress levels compared to the parent rail [3]. Variations in microstructure cause changes in mechanical properties, which can lead to increased sensitivity to impact loads. Consequently, these variations can play a significant role in increasing the risk of weld fracture under conditions of high cyclic loading of the axle [4].

## **2. EXPERIMENT**

### **2.1. General information**

The rail welding was carried out using a mobile butt-spark welding machine designed to join railway rails directly on-site using electric current and high intensity pressure.

The material used in this study is pearlite rail steel R260 with profile UIC 60E1. It is a high carbon manganese steel designed for heavy rail infrastructure, featuring a fine pearlite microstructure that provides high strength and excellent wear resistance. R260 rail steel contains 0.62 to 0.82% C, 0.70 to 1.20% Mn, 0.15 to 0.58 Si and max. 0.025% P/S according to the European standard EN 13674-1 [5].

The welding parameters were: pressure force 589 kN, compression length 9 mm, total welding time 129 s, and unstable phase 29 s.

### **2.2. Preparation of the test sample**

For microstructure testing, the sample was prepared in accordance with the EN 14587-2 standard [6]. The scheme for cutting sample for microscopic examination is shown in Figure 1a. From the longitudinal section of the rail head, a sample containing the fusion zone, the heat-affected zone and the base material zone of the rail was cut (Figure 1b).

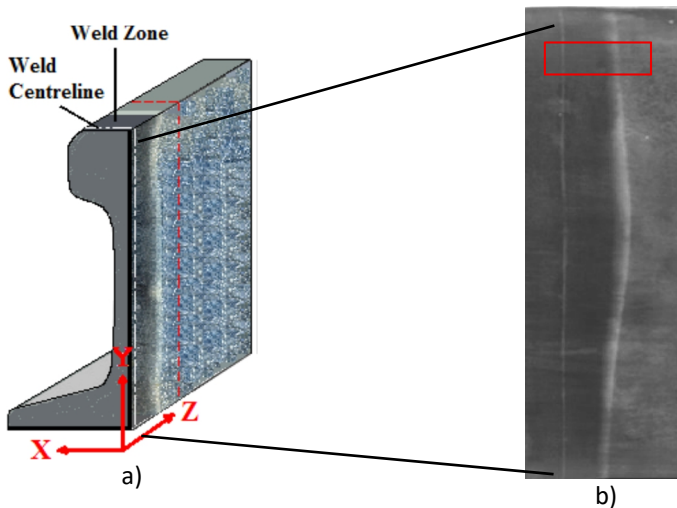


Figure 1. Longitudinal section of the rail; a) across the weld centerline; b) location of sample for microscopic examination

The sample preparation was performed without mounting, as the sample was large enough to be controlled manually.

The preparation procedure consisted of three steps that should be followed in the order detailed below:

**Grinding:** Metallographic grinding is based on the fact that abrasive particles of increasingly finer grain sizes are used to remove material from the surface until the desired result is achieved. [7].

**Polishing:** Metallographic polishing is a key step in sample preparation that ensures a faithful representation of the material microstructure without deformation, scratches and high reflections [7].

**Etching:** 3% nital was used to reveal the microstructure of the metal [7]. After etching, the prepared surface was cleaned with alcohol.

A model of a light optical microscope Carl Zeiss - Jena, Germany was used to examine the microstructure of different areas of the weld.

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

Microscopic examination of the rail butt joint included examination of a sample taken from the rail head (Figure 1b). The test zones included: the weld centerline, the fusion zone, the fine-grained zone, and the zone of the rail base material without thermal influence.

The microstructure of the rail/specimen butt joint sampled from the rail head from the centerline fusion zone consists of proeutectoid ferrite at the boundaries of primary austenite grains (Figure 2a). Proeutectoid ferrite at the primary austenite grain boundaries is considered a typical structure in FBW welds. The microstructure of the butt joint from the fusion zone consists of coarse pearlite grains (Figure 2b). The high temperatures and

rapid cooling rates in the weld interface zone lead to grain coarsening. The microstructure of the butt joint from the fine-grained heat-affected zone consists of partially spheroidized pearlite (Figure 2c). This partially spheroidized structure often correlates with a significant decrease in hardness (a "soft zone") compared to the base metal, often acting as a weak point in the weld. The microstructure of the butt joint from the base rail material zone without thermal influence is a pearlite microstructure (Figure 2d). The microstructure of the basic material of steel rail class 60E1-R260 prescribed by the standard is pearlitic and consists of lamellae of ferrite and cementite [5].

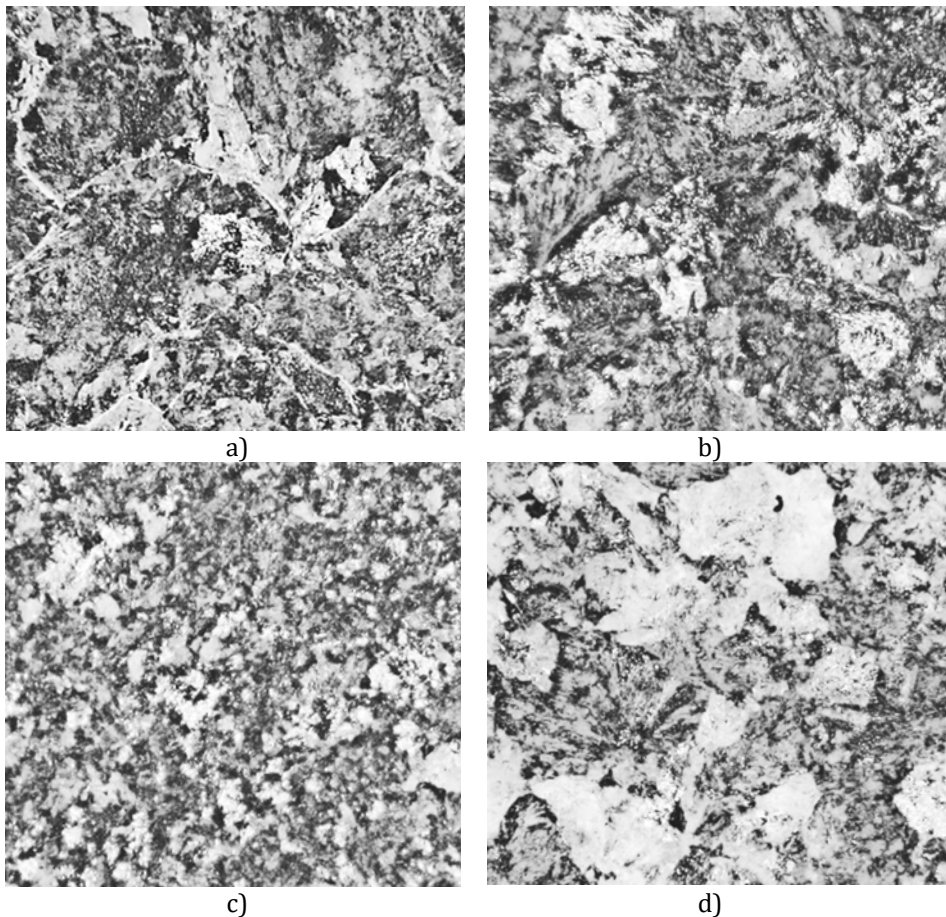


Figure 2. Microstructures of FBW rail joints. Magnification: 100x;  
a) centerline fusion zone, b) fusion zone, c) fine-grained heat-affected zone,  
d) basic material of steel rail

#### 4. CONCLUSIONS

Based on the analysis of FBW joint in pearlitic steel rail class 60E1-R260, the microstructure of the heat-affected zone is characterized by distinct regions due to the temperature gradient.

The presence of proeutectoid ferrite along the centerline of a Flash-Butt Welded rail, indicates a localized soft zone in the microstructure.

The region of partially spheroidized cementite is located somewhat further from the centerline of fusion in the subcritical or intercritical regions, where peak temperatures are lower.

#### ACKNOWLEDGMENT

This research is supported by the Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia (Contract No. 451-03-33/2026-03/200012).

#### REFERENCES

- [1] Skyttebol, A., Josefson, B. L., and Ringsberg, J. W., Fatigue crack growth in a welded rail under the influence of residual stresses, *Engineering Fracture Mechanics*, 72 (2005), 2, pp. 271–285.
- [2] Saita, K., Karimine, K., and Ueda, M., Trends in Rail Welding Technologies and Our Future Approach, NIPPON STEEL & SUMITOMO METAL, Technical Report No. 105, (2013), p. 85.
- [3] Saarna, M., and Laansoo, A., Rail and Rail Weld Testing, *Proceedings of 4th International DAAAM Conference on Industrial Engineering*, Tallinn, April 2004, pp. 217-219.
- [4] Abdul Sameea Jasim Abdul Zehra Jilabi, Welding of Rail Steels, A thesis submitted to the University of Manchester for the degree of PhD in the Faculty of Engineering and Physical Sciences, 2015.
- [5] EN 13674-1:2017, Railway applications - Track - Rail - Part 1: Vignole railway rails 46 kg/m and above.
- [6] EN 14587-2:2009, Railway applications - Track - Flash butt welding of rails - Part 2: New R220, R260, R260Mn and R350HT grade rails by mobile welding machines at sites other than a fixed plant.
- [7] Hermann, S., Metallographie. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, (1962), pp. 3–19.



Društvo za  
Zavarivanje  
Crne Gore

1. Konferencija sa međunarodnim učešćem

## „TEHNOLOGIJE SPAJANJA MATERIJALA“

14 - 16. maj 2026. godine, Bečići, Crna Gora



**Martin Petreski<sup>1,\*</sup>, Dobro Runchev<sup>1</sup>, Gligorche Vrtanoski<sup>1</sup>,  
Aleksandra Krstevska<sup>1</sup>**

### **UTICAJ SINHRONIZACIJE GMAW I LBW PROCESA NA KVALITET ZAVARA I MEHANIČKE KARAKTERISTIKE KONSTRUKCIONOG ČELIKA**

**Rezime:** *Kombinacija dva ili više procesa zavarivanja unutar istog zavarivačkog kupatila nudi značajne prednosti u odnosu na ograničenja pojedinačnih procesa. Ovaj rad predstavlja eksperimentalno istraživanje hibridnog laserskog zavarivanja (HLAW) postignutog sinhronizacijom elektrolučnog zavarivanja topljivom elektrodom u zaštitnom gasu (GMAW) i zavarivanja laserskim snopom (LBW), sa ciljem procjene njihovih pozitivnih efekata na karakteristike šava. Eksperimenti su izvedeni na konstrukcionom čeliku S355J2+N debljine 12 mm u konfiguraciji sučeonog spoja bez zazora. Parametri procesa održavani su konstantnim za pojedinačne GMAW i LBW procese, kao i za HLAW proces: snaga laserskog snopa 8 kW, brzina zavarivanja 1,5 m/min, struja zavarivanja 316 A i napon luka 33,1 V. Kvalitet šava i njegove mehaničke karakteristike utvrđeni su ispitivanjima bez razaranja, zateznim ispitivanjem i mjerenjem tvrdoće. Eksperimentalni rezultati pokazuju da primijenjeni parametri zavarivanja omogućavaju dublju penetraciju HLAW procesom u poređenju sa konvencionalnim GMAW procesom. Sinergijska interakcija između električnog luka i laserskog snopa poboljšava energetska efikasnost i smanjuje stroge zahteve za pripremu ivica, što rezultira manjim ukupnim unosom toplote, poboljšanom zateznom čvrstoćom i manjom tvrdoćom za najmanje 50 HV, posebno u zoni delovanja lasera. Ovi nalazi demonstriraju potencijal HLAW procesa kao efikasnog i pouzdanog procesa zavarivanja za industrijske primene visoke produktivnosti.*

**Ključne riječi:** hibridno zavarivanje, parametri zavarivanja, zatezna čvrstoća, tvrdoća, dubina penetracije

<sup>1</sup> „Ss. Cyril and Methodius“ University of Skopje, Faculty of Mechanical Engineering, Skopje, Republic of North Macedonia

\* Corresponding author, martin.petreski@mf.edu.mk

# EFFECT OF SYNCHRONIZING GMAW AND LBW PROCESSES ON WELD QUALITY AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF STRUCTURAL STEEL

**Abstract:** *The combination of two or more welding processes within the same welding pool offers significant advantages over the limitations of individual processes. This paper presents an experimental investigation of Hybrid Laser Arc Welding (HLAW) achieved by synchronization Gas Metal Arc Welding (GMAW) and Laser Beam Welding (LBW), with the aim of evaluating their positive effects on the weld characteristics. The experiments were performed on 12 mm thick S355J2+N structural steel in a zero-gap butt joint configuration. The process parameters were kept constant for the individual GMAW and LBW processes, as well as for the HLAW process: laser beam power 8 kW, welding speed 1,5 m/min, welding current 316 A and arc voltage 33,1 V. The quality of the weld and its mechanical characteristics were determined by non-destructive testing, tensile testing and hardness measurements. The experimental results show that the applied welding parameters enable deeper penetration by HLAW process compared to conventional GMAW process. The synergistic interaction between the electric arc and laser beam improves energy efficiency and reduces stringent edge preparation requirements, resulting in lower overall heat input, improved tensile strength and a hardness reduction of at least 50 HV, particularly in the laser zone. These findings demonstrate the potential of the HLAW process as an efficient and reliable welding process for high-productivity industrial applications.*

**Keywords:** hybrid welding, welding parameters, tensile strength, hardness, penetration depth

## 1. INTRODUCTION

In recent years, traditional manufacturing processes have gradually failed to meet the needs of the manufacturing industry due to the rapid development of the economy. Global trends in manufacturing of welded components are characterized by a growing demand for reduced welding operation costs and welding cycle times on the one hand and consistent or even improved, quality and mechanical integrity of welded components on the other [1]. In this context, welding processes are in urgent need of innovation and improvement, and welding-related industries must keep pace with international advanced standards [2]. One such advancement is automated Hybrid Laser Arc Welding (HLAW), which integrates the benefits of Laser Beam Welding (LBW) and Gas Metal Arc Welding (GMAW), offering a highly efficient alternative to conventional welding processes [3].

The HLAW has gained significant attention in various industrial applications due to its ability to leverage the synergistic benefits of both processes,

including high welding speed, low residual stresses, minimal distortion, deep penetration, and the ability to control the chemical composition of the weld seam [4].

Despite its numerous advantages, the process has certain limitations, such as high equipment costs and the need to precisely control multiple welding parameters to prevent defects and avoid solidification cracking, particularly when welding thick-section steel [3]. Moreover, the efficiency of HLAW depends not only on the proper selection and synchronization of welding parameters, but also on the method of edge preparation.

Therefore, the aim of this study is to investigate the effect of synchronizing GMAW and LBW processes on weld seam quality and its mechanical characteristics by welding the 12 mm thick structural steel in a zero-gap butt joint configuration. Several single-pass welds were performed using constant welding parameters for the individual GMAW and LBW processes, as well as for the HLAW process.

## 2. MATERIALS AND METHODS

For the welding experiments of the present stud, S355J2 structural steel with thickness of 12 mm where employed. The pieces were cut to dimensions 150 x 400 mm before welding preparation. The welds were performed in an I-joint configuration with zero-gap. The welding wire used for HLAW was a solid wire G3Ni1 according to EN ISO 14341-A: G 42 3 M21 3Si1 with a diameter of 1.2 mm. As a shielding gas is used a mixture of argon with 18% CO<sub>2</sub> - CORGON 18 according to EN ISO14175: M21 ArC 18 with a flow rate of 25 l min<sup>-1</sup>. The base material has a carbon equivalent value of max. 0.39 ( $CE_{Iw}$  for low alloy steels,  $CE_{IIW} = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Cu + Ni)/15$ ).

For edge preparation two different industrial methods are used: milling and plasma cutting. The average measured profile of the edges for milling and plasma cutting are following: roughness of profile 1.84/3.64 μm (Ra), height of profile 4.66/12.14 μm (Rp) with waviness included, and mean peak to valley height of primary profile 8.68/ 20.67 μm (Rz). The plasma cutting edges are characterized with higher roughness with visible striations, that lead to no zero-gap between the pieces, at the bottom it is nearly 0 mm and opens slightly towards the top.

A high – power fiber laser IPG YLR-20000 of IPG was used in the experiments with the following parameters: an optical fiber with a 200 μm, beam parameter product of 11 mm×mrad, and 1070-nm wavelength. A laser processing head, BIMO HP, with a focal length of 350 mm providing a spot focus diameter (df) of 0.56 mm was used. A welding machine, Qineo Pulse 600 of Cloos, with a maximum current of 600 A was applied as a power source for the arc. GMAW was performed with direct current of positive polarity (DC+).

The laser optics and GMAW torch were mounted on the robot arm, where the laser beam longitudinal inclination angle was  $0^\circ$  from normal towards the welding surface reflections, while the GMAW torch was tilted  $65^\circ$  to the welding surface, and the position of the robot remains unchanged during all welding process. All the experiments were carried out with an arc leading orientation with the distance of 3 mm between the two heat sources. The focal position of the laser beam was -3 mm relative to the workpiece surface. The wire stick-out was set to 15 mm. The HLAW process configuration is shown in Figure 1.

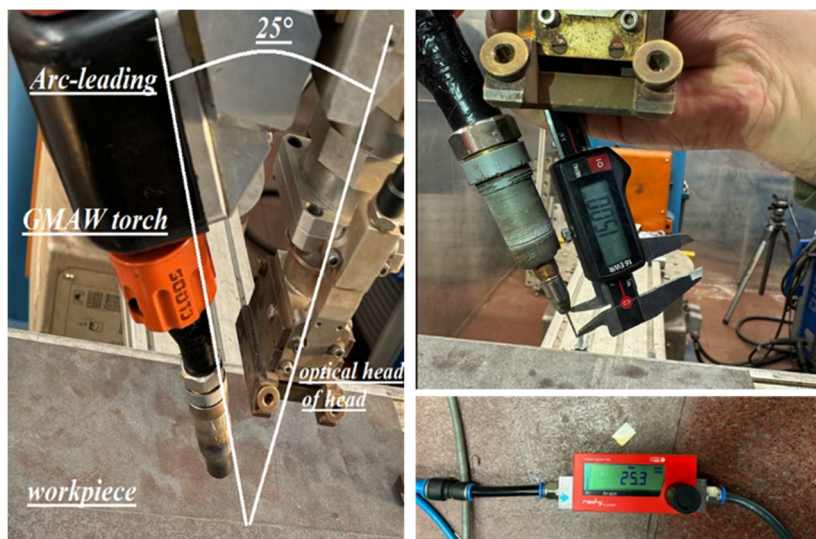


Figure 1. HLAW system; a) experimental setup; b) stick-out; c) gas flow rate

The experiment was conducted to analyze the effect of synchronizing the GMAW and LBW processes on weld quality and to achieve welds free of imperfections, meeting the requirements of the EN ISO 12932 standard while maximizing productivity. The welding parameters are given in Table 1. After the welding, a visual inspection is performed to detect surface defects, such as overlap, undercutting, surface craters, humping and misalignment.

Table 1. Single-pass welding process parameters

Weld no.	Methods of edge preparation	Gap (mm)	Laser power (kW)	Arc mode	Arc current (A)	Arc voltage (V)	Wire feed (m/min)	Wedling speed (m/min)	Focal position (mm)	Gas low rate (l/min)	Wire stickout (mm)	Arc - laser distance (mm)
1	Milling	0	10	Pulse	325	34	10	1.4	0	25	15	5
2	Milling	0	10	Pulse	389	38.2	14	1.8	-3*	25	15	3
3	Milling	0	10	Pulse	355	36.7	12	1.8	-3*	25	15	3
4	Milling	0	11.5	Pulse	359	36.8	12	1.8	-3*	25	15	3
5	Plasma cut	0	10	Pulse	355	36.8	12	1.8	-3*	25	15	3
6	Milling	0	8	/	/	/	/	1.5	-3*	25	/	/
7	Milling	0	8	Pulse	371	37.3	13	1.5	-3*	25	15	3
8	Milling	0	/	Pulse	378	37.6	13	1.5	/	25	15	/

For the macrostructure analysis of the welds, test specimens of appropriate length were extracted from the middle of the welded plates, polished using standard metallographic procedures, and subsequently etched with a 2% Nital solution before being examined under a stereo microscope.

All welds were subjected to mechanical testing – tensile and hardness testing. Cross-weld tensile test was performed based on EN ISO 4136 using the standard dimension and geometry of the tensile test specimen.

Vickers hardness test (HV10) was performed in accordance with two standards, ISO 9015-1 and ISO 22826, the first one was applied in the upper zone, the arc-laser zone, and the second one in the laser zone. The measurements were performed in three rows of material thickness: one below the weld face and one from the root side at depth of <2mm, and one in the middle of material thickness [5].

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

The visual inspection found that two of five hybrid welds can not meet the lowest requirements according to EN 12932. The macrographs of the weld shown in Figure 2, represent that the main imperfection of milling sidewalls is root humping which is not acceptable.

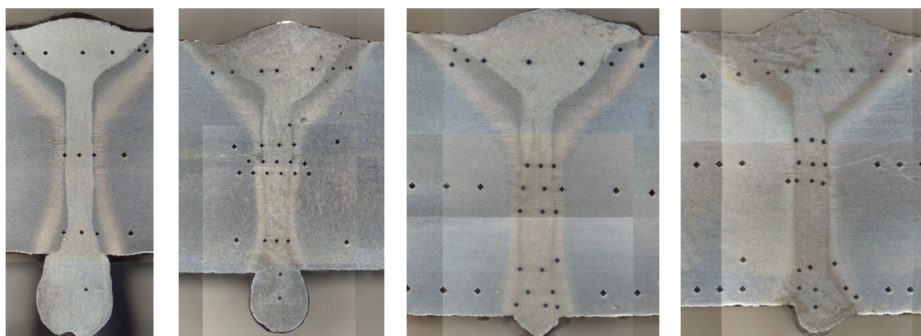


Figure 2. HLAW weld of 12 mm thick plates; a) no.1, b) no.3, c) no.4, d) no.5

It is evident that arc affects the melt flow by increasing the mass momentum towards the root which is corralled with the amount of molten metal in the weld pool. To suppress humping on pieces with milled edges, the welding speed and laser power were increased. On the other hand, the weld with plasma cutting edges is humping free for the same welding parameters. According to Bunaziv et al. [6] a slight air gap in the I-joint preparation can be beneficial to prevent humping by reducing the pressure at the bottom of the keyhole. Therefore, using the same HLAW process parameters, zero-gap plasma-cut edges performed better because they can reduce the keyhole pressure due to the natural gaps formed by the peaks and valleys of the surface roughness. The striations of the plasma-cut can increase the laser absorption and, at the same time, improve the flow of molten filler material

flow further inside the joint. However, an air gap larger than 1 mm can lead to melt humping, as the surface tension is insufficient to prevent molten metal dropout [7, 8]. Furthermore, welding with an air gap introduces additional complexity and reduces reliability due to difficulties in maintaining a consistent gap during production.

The visual inspection of welds produced by the individual LBW and GMAW processes, compared with HLAW using the same welding parameters, shows a positive improvement in weld bead geometry, heat-affected zone, and especially in weld penetration, Figure 3. Deeper penetration in HLAW is achieved due to the synergistic interaction between the laser and arc. The arc preheats the material and enhances laser energy absorption, stabilizes the laser-induced keyhole, and constricts and intensifies the arc through metal vapor interaction. It also improves molten pool dynamics, resulting in more efficient heat utilization and consequently greater weld penetration [9]. According to Ruifeng [1], the melting energy in hybrid laser-arc welding HLAW is higher because the arc preheats the workpiece before laser irradiation, forming a shallow molten layer that reduces reflectivity and improves laser energy absorption.

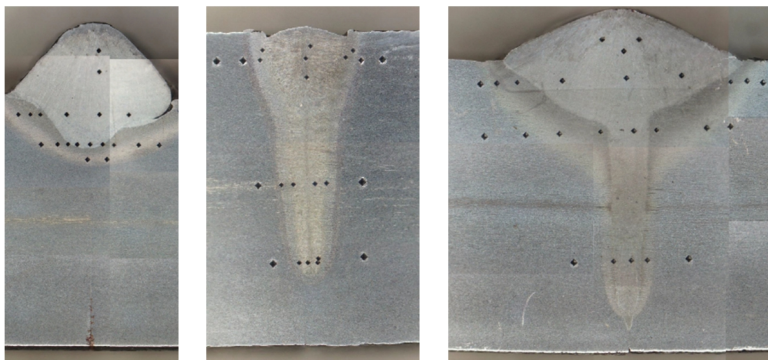


Figure 3. Weld cross-section; a) GMAW, b) LBW, c) HLAW

In terms of tensile strength, all weld pieces showed satisfactory results, even those with root hump that are not acceptable from a visual point of view. All standard tensile test specimens exceeded the strength of the base material, reaching at least 385MPa yield strength and 560MPa ultimate tensile strength, resulting in BM failure. Welds with insufficient penetration, resulting from lower welding parameters, tend to fracture within the weld zone. Figure 4 presents the tensile strength curve for weld no. 7 calculated based on the weld area, showing a yield strength of 650 MPa, an ultimate tensile strength of 739 MPa and a total elongation of 5.81%.

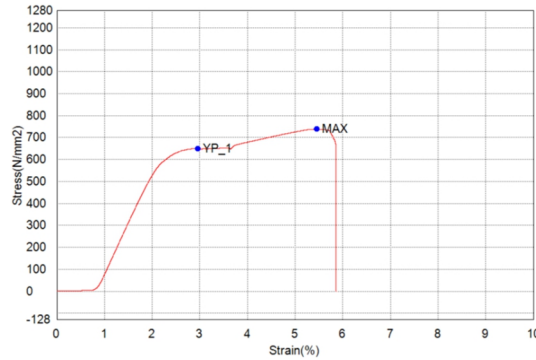


Figure 4. Tensile strength of hybrid weld no. 7

The Vickers hardness HV10 distribution across the cross-section of welds no. 6, 7 and 8 are presented in Figure 5.

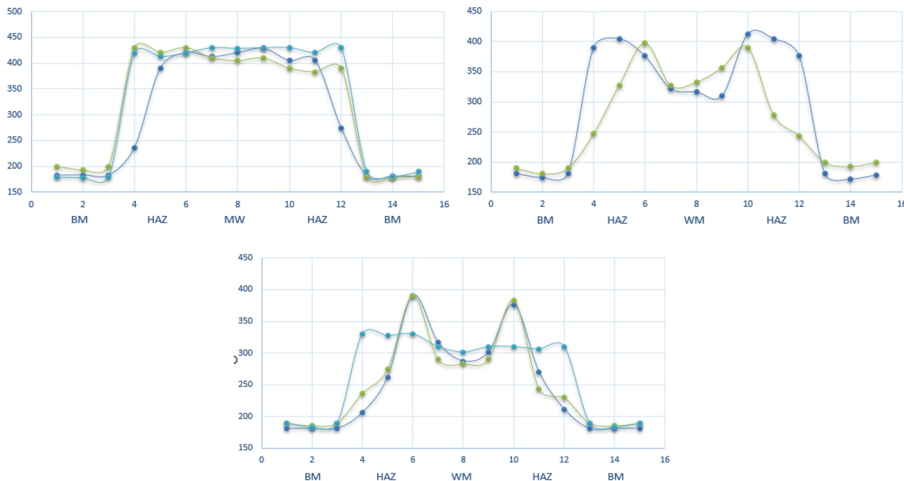


Figure 5. Results of Vickers hardness HV10; a) LBW, b) GMAW, c) HLAW

It can be observed that the hardness profiles of HLAW and GMAW welds exhibit a similar M-shaped distribution, with the highest hardness located in the HAZ due to the coarse-grained microstructure and higher cooling rate. The hardness of the weld metal is slightly lower, primarily due to the use of filler material and the larger molten pool. In contrast, LBW produces a relatively uniform hardness distribution throughout both the weld metal and the HAZ.

A comparison of the average hardness values indicates that the WM and HAZ in HLAW exhibit hardness values of approximately 300 HV and 380 HV, respectively, whereas LBW shows higher hardness values of around 430 HV. The differences of approximately 130 HV in the weld metal and 50 HV in the HAZ can be attributed to the higher energy input per unit length. According

to Kawahito et al. [10] hardness values exceeding 400 HV are typical for laser welding of thick steel at welding speeds above 1.00 m/min. According to ISO 15614-1, the maximum allowed hardness level is 350HV. However, HLAW is not covered by this standard. The formation of brittle areas in HLAW which can result in hardness values exceeding 300 HV may be mitigated by reducing the cooling rate or by selecting an appropriate filler material [11].

#### **4. CONCLUSION**

In this study, the effects of synchronizing GMAW and LBW processes on weld quality and mechanical characteristics of structural steel were examined. The most important conclusions drawn from the present experimental results are as follows:

1. The combination of the individual GMAW and LBW processes in HLAW process has proven to be reliable and efficient technology for single-pass welding of the 12 mm thick structural steel in a zero-gap butt joint configuration.
2. Humping in welds with milled edges can be suppressed by increasing the welding speed and laser power, or by improving melt flow dynamics and reducing keyhole pressure through the introduction of a slight air gap.
3. Larger air gaps >1 mm should be avoided due to melt instability and metal dropout, which reduce process reliability because of the difficulty in maintaining a consistent gap during production.
4. HLAW welds are characterized by satisfactory tensile strength, exceeding that of the base material when root hump imperfections are present.
5. The hardness values of HLAW welds are directly correlated with the energy input per unit length and can be improved by controlling the cooling rate.

#### **REFERENCES**

- [1] Ruifeng, L., Taotao, L.: *Advanced Welding Methods and Equipment*, Springer Singapore, 2024.
- [2] Pan, Q., Mizutani, M., Kawahito, Y., Katayama, S.: Effect of shielding gas on laser-MAG arc hybrid welding results of thick high-tensile-strength steel plates. *Weld World* 6, (2020), pp.653–664.
- [3] Petreski, M., Runchev, D., and Vrtanoski, G.: Hybrid laser arc welding – State of the art in technology. *Welding and welded structures*, 66(3), (2021), pp 115-124.
- [4] Gook S., Biegler, M., Gumenyuk, A., and Rethmeier M.: Integration of hybrid Laser-Arc and narrow gap submerged arc welding for cost-effective joining of 80 mm thick S355ML steel plates, *Optics and Laser Technology* 197, (2026), 114796.

- [5] Petreski, M., Krstevska, A., Bogatinoski Z.: Mechanical testing od HLAW welded joints in accordance with European standards – Theoretical approach. *Mechanical Engineering –Scientific Journal*, 40 (1), (2023), p.5-13
- [6] Bunaziv, I., Dørum, C., Nielsen, S.E., Suikkanen, P., Ren, X., Nyhus, B., Eriksson, M., and Akselsen, O.M.: Laser-arc hybrid welding of 12-and 15-mm thick structural steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107, (2020), pp. 2649-2669.
- [7] Farrokhi, F., and Kristiansen, M.: A practical approach for increasing penetration in hybrid laser-arc welding of steel. *Physics Procedia* 83, (2016), pp. 576-586.
- [8] Petreski, M., Runchev, D., Vrtanoski, G., Krstevska, A: Influence of edge surface quality on hybrid laser arc welding of structural steel S355J2, IIW 2024 International Conference on Welding and Joining, Rhodos, Greece, 2024.
- [9] Üstündağ Ö., Gook S., Gumenyuk A., and Rethmeier M.: Hybrid laser arc welding of thick high-strength pipeline steels of grade X120 with adapted heat input. *Journal Material Process Technology*, 275 (2020), 116358.
- [10] Kawahito, Y., Wang, H.Z., Katayama, S. et al, Ultra high power 100kW fiber laser welding of steel, *Opt. Lett*, 43(19), (2018), pp.4667-4670.
- [11] Wallerstein, D., Vaamonde, E., Prada, A., Torres, E.A., Urtiga Filho, S.L., and Santos, T.F.A: Influence of welding gases and filler metals on hybrid laser - GMAW and Laser-FCAW welds. *Mechanical Engineering Science*, (2020), pp.3-14.





Avda Mehedovića 130, Podgorica  
office@monteput.me  
www.monteput.me



Društvo sa ograničenom odgovornošću „Monteput“ Podgorica je osnovano Odlukom Vlade Crne Gore 8. decembra 2005. godine. „Monteput“ d.o.o. je osnovan u svojstvu poslovnog nasljednika Direkcije za izgradnju autoputeva Crne Gore, koja je prestala sa radom 31.12.2005. godine, shodno Zakonu o putevima Službeni list broj 42/04.

Monteput, kao privredno društvo, na osnovu odluke Vlade, zaduženo je za upravljanje autoputevima, brzim saobraćajnicama, dijelovima državnog puta, putnim građevinskim objektima i pratećim sadržajima. Monteput je obavezan da priprema srednjoročne i godišnje programe izgradnje, rekonstrukcije, održavanja i zaštite javnih puteva, autoputeva, brzih saobraćajnica, kao i dijelova državnog puta i putnih građevinskih objekata. Od otvaranja tunela Sozina – Društvo upravlja i održava tunel i prilazne saobraćajnice. To se odnosi na građevinsko, elektro, IT i mašinsko održavanje, kao i na upravljanje i nadzor saobraćaja.

Monteputu je povjerena i naplata putarine. Društvo upravlja sistemom naplate, te kontinuirano razvija i unapređuje sistem. Uz saglasnost, i u ime Vlade, može da daje u zakup putno zemljište.

Kompanija se bavi stručnim građevinskim i projektantskim nadzorom, izradom projektne dokumentacije, kao i pripremom tenderske dokumentacije. Pored toga, djelatnost Društva podrazumijeva i druge zadatke kao što su tehnička priprema, inženjering, konsalting i menadžment. Kao javno preduzeće, Monteput d.o.o. obavlja i druge poslove koje mu povjeri Vlada, a koji su povezani sa razvojem i izgradnjom autoputeva i putnih objekata u Crnoj Gori.



**RUDNIK UGLJA**  
— P L J E V L J A —

Velimir Jakić br 6., Pljevlja  
office@rupv.me  
www.rupv.me



**RUDNIK UGLJA PLJEVLJA NIJE SAMO KLJUČNI FAKTOR ENERGETSKE  
STABILNOSTI CRNE GORE, VEĆ ENERGIJA KOJA POKREĆE ZAJEDNICU I  
OBLIKUJE RAZVOJ CRNE GORE**

Osnovan 1952. godine kao malo preduzeće sa 37 zaposlenih i skromnom proizvodnjom, Rudnik uglja Pljevlja danas predstavlja ličnu kartu industrijskog razvoja sjevera Crne Gore i jedan od najznačajnijih stubova rudarsko-energetskog sektora Balkana i Evrope. Već u periodu 1954–1964. izvršena je modernizacija i izgrađena separacija u Potrljici, čime su postavljeni temelji za dalji rast. Rudnik je kroz vrijeme prilagođavao svoje poslovanje ekonomskim i zakonskim promjenama, a od 1999. posluje kao akcionarsko društvo. Ključni iskorak ostvaren je 2018. godine ulaskom Elektroprivrede Crne Gore u većinsku vlasničku strukturu, čime je dodatno ojačana stabilnost i saradnja sa TE „Pljevlja“. Zajedno sa TE „Pljevlja“, Rudnik obezbjeđuje više od 40% električne energije u državi, čineći okosnicu nacionalnog elektroenergetskog sistema. Kontinuitet proizvodnje zasniva se na snažnoj mašinskoj infrastrukturi i kontinuiranoj modernizaciji opreme te digitalizaciji i stalnom unapređenju tehničkih procesa, uz kontinuiranu obuku kadra i primjenu visokih industrijskih standarda. Korišćenjem visokokapacitetnih rudarskih mašina obezbjeđuje se stabilan i pouzdan proizvodni proces koji odgovara najvišim industrijskim standardima. U skladu sa evropskim energetske politikama, Rudnik realizuje Plan pravedne tranzicije kroz poslovnu transformaciju – prvi takve vrste u Crnoj Gori. Cilj je unapređenje efikasnosti i održivosti poslovanja, uz korišćenje potencijala kompanije i lokalne zajednice, te stvaranje stabilne i razvojno orijentisane budućnosti. Danas, Rudnik uglja Pljevlja nije samo industrijski subjekt, već simbol stabilnosti i odgovornosti. Kroz ulaganja u bezbjednost, ekologiju i društveno odgovorno poslovanje, ostaje pouzdan oslonac razvoja regiona i važan faktor ukupnog napretka Crne Gore.



# HIPERION

D.O.O.

## VAŠ POUZDAN PARTNER U INDUSTRIJI, ZAVARIVANJU I IZRADI METALNIH KONSTRUKCIJA

Kvalitet. Sigurnost. Dugotrajnost.  
Nudimo sveobuhvatna rješenja u zavarivanju,  
proizvodnji i industrijskom održavanju,  
prateći najviše standarde savremene industrije.



### INŽENJERING

- Razvoj tehnologija zavarivanja i izrada procedura (WPS)
- Tehnička dokumentacija, nadzor i vođenje zavarivačkih i montažnih radova



### REPARACIONO ZAVARIVANJE

- Sanacija i popravka zavarenih spojeva i oštećenih dijelova komponenti industrijske opreme
- Popravka opreme izložene habanju, abraziji i koroziji



### ODRŽAVANJE

- Preventivno i korektivno održavanje industrijske opreme
- Dijagnostika stanja i brze intervencije
- Povećanje pouzdanosti i raspoloživosti sistema



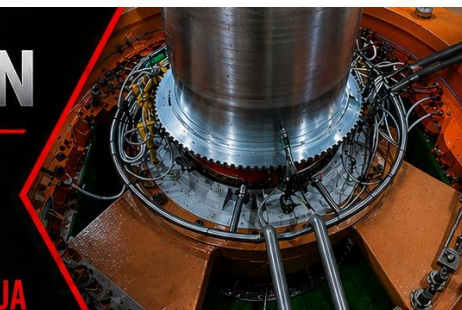
### MONTAŽA

- Montaža opreme za hidro i termoelektrane
- Montaža čeličnih konstrukcija, hala, dizalica i transportne opreme



### PROIZVODNJA / IZRADA

- Izrada hidromehaničke opreme, čeličnih i aluminijumskih konstrukcija, rezervoara, razmjenjivača toplote, cjevovoda i industrijskih sistema.
- Mašinska obrada i izrada po zahtjevu projekta



VUKA KARADŽIĆA BB  
NIKŠIĆ



+382 67 000 677  
+382 68 575 549



hiperion@hiperion.me



VAŠ PARTNER ZA DUGOROČNA I POUZDANA INDUSTRIJSKA RJEŠENJA

# JUŽNI PROLAZ

- \* oprema za zavarivanje i automatizaciju zavarivanja
- \* odsisni filtracija u metalnoj industriji
- \* ključne savijačice limova, cijevi i profila
- \* induktivno i elektrootporno predgrijavanje i odžarivanje
- \* strojevi i oprema za obradu limova i cijevi

Južni Prolaz d.o.o.  
Majstorska 3  
10000 Zagreb  
Tel: 01/2456-180  
juzniprolaz@juzniprolaz.hr



## Zavarivanje

Miller Electric aparati i oprema za ručno i automatizirano zavarivanje: REL, TIG AC/DC, TIG DC, EPP, agregati za zavarivanje...



## Rezanje limova i cijevi

Vrhunska oprema i CNC rezačice za automatizirano rezanje metalnih pločevina i cijevi, za laku, srednju i tešku metalnu industriju



## Automatizacija

Red-D-Arc najam sustava za automatizaciju zavarivanja sa kompletnom podrškom, servisima i edukacijom zavarivača



## Odsisni sustavi

Nederman sustavi za odsis dima i prašine kod zavarivanja, rezanja, brušenja. Cjelovita rješenja odsisa i filtracije za sve tipove proizvodnih pogona.



## Dodatni materijali

ELGA – kompletna ponuda dodatnih materijala za zavarivanje, rješenja za sve postupke zavarivanja, specijalne zahtjeve i visoku produktivnost



## Instalacija, obuka, servis

Vlastiti tim ovlaštenih i educiranih servisera i zavarivača za instalaciju opreme, obuku zavarivača i operatera te servisne intervencije

# RADUN CRAFT



ROBOTSKO  
ZAVARIVANJE



LASERSKO  
ZAVARIVANJE



LASERSKO  
REZANJE



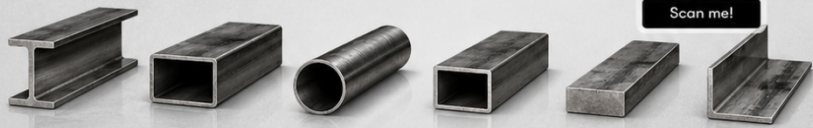
ČELIČNE  
KONSTRUKCIJE



ČELIČNI  
PROFILI



Scan me!



**MESSER**   
Gases for Life



Bezbednost na prvom mestu.  
U korak sa tehnološkim razvojem.  
U službi Vašeg industrijskog napretka.

 **SHIMADZU**  
Excellence in Science



**1917**  
Start of Materials Testing and Inspection

**1921**  
Ono rotary bending fatigue testing machine

**1936**  
1-t creep testing machine

**1959**  
AUTOGRAPH IS precision universal testing machine

**1983**  
AG-A series AUTOGRAPH

**1983**  
AG-A series AUTOGRAPH

**1996**  
MMT microservo

**1997**  
EZ Test compact table-top tester

**2007**  
AG-X series AUTOGRAPH

**2013**  
HMV-G micro Vickers hardness tester

**2015**  
Hyper-Vision HPV-X2 high-speed camera

**2016**  
NJ-SERVO series electric motor-driven actuator


**2016**  
USF-2000A with Mean Stress loading device (AG-X5kN)

**2022**  
MIV-X Optical Flaw Detector

**2023**  
AGX-V2 Series Autograph

**100 YEARS OF EXPERIENCE**  
Materials Testing & Inspection  
SHIMADZU CORPORATION

Shimadzu d.o.o. Beograd  
Milutina Milankovića 27 - 11 070 Novi Beograd - Srbija  
T: + 381 11 711 54 46, + 381 11 711 54 49  
shimadzu@shimadzu.rs  
www.shimadzu.rs

Learn more! 



**TÜVNORD**

Passion for  
Safety

## TÜV NORD GROUP

*Expertise for your Success*

- Vlastite i akreditacije matične kuće - Notified Body (NB 2464 i NB 0045)
- Ovlašteno inspeksijsko tijelo za periodičke preglede i ispitivanja opreme pod tlakom
- Certifikacija osoblja
- Ispitivanje operatera, zavarivača i kontrolnog osoblja
- Certifikacija sustava i tehnologija
- Stabilna i pokretna tlačna oprema, AD 2000 HPO, PED 2014/68/EU, ISO 3834, EN 1090, EN 15085, EN 12952, EN 13445, EN 13480
- Energetsko certificiranje u zgradarstvu
- Certifikacija proizvoda
- Ispitivanje i podešavanje ventila sigurnosti

**TÜV NORD Adriatic d.o.o.**, Bani 110, 10010 Zagreb, T +385 1 3668 307, M [tuv-croatia@tuv-nord.com](mailto:tuv-croatia@tuv-nord.com), W [tuvnord-adriatic.com](http://tuvnord-adriatic.com)  
■ Austria ■ Belgium ■ Brazil ■ China ■ Croatia ■ Denmark ■ France ■ Finland ■ Germany ■ Italy ■ India ■ Indonesia ■ Korea ■ Latvia ■ Mexico  
■ Netherlands ■ Norway ■ Pakistan ■ Philippines ■ Romania ■ Spain ■ Switzerland ■ Taiwan ■ Turkey ■ Thailand ■ UK ■ USA ■ Vietnam

TÜV®

**TÜVNORDGROUP**

Adresa:  
Kranjčevićeva 30  
10000 Zagreb  
Hrvatska



INDUSTRIJSKA  
DEFEKOSKOPIJA

Kontakt:  
+385 99 6123 470  
idef@idef.hr  
www.idef.hr



## PROGRAM ZASTUPANJA

### VIZUALNA METODA (VT)

- videoskopi, mjerni instrumenti

### PENETRANJSKA METODA (PT)

- penetranti, razvijajući, čistači

### MAGNETSKA METODA (MT)

- oprema i potrošni materijal

### ULTRAZVUČNA METODA (UT)

- UT uređaji, sonde, etaloni

### RADIOGRAFSKA METODA (RT)

- konvencionalna i digitalna radiografija

### MJERENJE TVRDOĆE

- prijenosni i stacionarni uređaji

### METALOGRAFIJA

- priprema uzoraka

### VRTLOŽNE STRUJE

- eddy current uređaji i sonde

## VAŠ PARTNER ZA KVALITETU

**IDEF d.o.o. za industrijsku defektoskopiju** je tvrtka sa sjedištem u Zagrebu koja se bavi zastupanjem, uvozom, izvozom i veleprodajom opreme, pribora i potrošnog materijala za ispitivanje materijala bez razaranja (NDT). Pokrivamo područja ispitivanja iz industrijske defektoskopije, metrologije i metalografije.

Kontinuirano i uspješno poslujemo od kolovoza 1992. godine.

U direktnom smo poslovnom odnosu s vodećim svjetskim proizvođačima sofisticirane opreme za koju nudimo i usluge servisa s ovlaštenjem, tako da osiguravamo tehničku i komercijalnu podršku na najvišoj razini.

Naši su principi:

- Baker Hughes - Waygate Technologies
  - AGFA
  - KRAUTKRAMER
  - SEIFERT
  - HOCKING
- TAYLOR HOBSON
- TIEDE
- MAGNAFLUX
- RTE
- LABINO
- ELMED
- PHYNIX

**SOLUTIONS FOR INDUSTRY**

**Non-Destructive Testing**



Visual Testing



Penetrant Testing  
Magnetic Particle Testing



Ultrasound Testing I  
Eddy Current Testing



Radiography Testing

**Laboratory equipment**



Material Testing



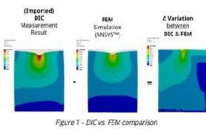
Hardness Testing



Metallography



Elemental Analysis



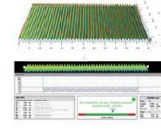
Digital Image Correlation



Microscopes



SEM (EDS + EBSD)



Metrology

**Preventive Maintenance**



Residual Stress | Heat Treatment verification



Ultrasonic Devices for Preventive Maintenance (*Leak detection, Tightness Testing, Bearing Monitoring and lubrication, Steam trap and Valve Inspection, detection of Partial Discharges*)



**AKREDITOVANO  
KONTROLNO TIJELO**  
Tip "A" i "C"

**TERMOTEHNIKA  
TERMOENERGETIKA  
PROCESNA TEHNIKA**

**ISO / IEC 17020**  
**Certified Inspection Body**

**KTS d.o.o. Nikšić**  
**AKREDITOVANO KONTROLNO TIJELO**  
adresa: Gudeljska II, 81 400 Nikšić  
tel/fax: +382 40 253 401, +382 40 253 416  
e-mail: [office@kts.co.me](mailto:office@kts.co.me)  
[www.kts.co.me](http://www.kts.co.me)



**Tip A:**

- Kontrolisanje stabilnih posuda pod pritiskom
- Kontrolisanje pokretnih zatvorenih sudova, ventila sigurnosti
- Kontrolisanje debljine metalnih materijala
- Kontrolisanje gorioničkih instalacija
- Kontrolisanje autocisterni (klase 2 i nisu klase 2)
- Kontrolisanje hidrantskih mreža za gašenje požara

**Tip C:**

- Kontrolisanje postrojenja i instalacija za tečni naftni gas
- Kontrolisanje hidroizolacije, podzemnih rezervoara i cjevovoda
- Kontrolisanje instalacija za razvod i distribuciju vode i vazduha (sistemi grijanja, hlađenja i klimatizacije)
- Kontrolisanje instalacija i uređaja za gašenje požara raspršenom vodom - sprinkler instalacija

Radovići b.b., Tivat  
invar.ivošević@t-com.me



#### Usluge:

- Ultrazvučno mjerenje debljine
- Ultrazvučna inspekcija vodonepropusnosti
- Ultrazvučno ispitivanje zavara
- Podvodno mjerenje debljine
- Podvodni pregled
- Vizuelni pregled
- Ispitivanje magnetnim česticama
- Ispitivanje penetrantima
- Ispitivanje vakumom
- Pregledi brodova



Crnogorski elektrodistributivni sistem

Ivana Milutinovića 12, Podgorica

info@cedis.me

www.cedis.me



Pouzdana energija za vaš svakodnevni život!

---

🔧 NAŠE USLUGE

- Distribucija energije
- Priključenje korisnika
- Održavanje mreže
- Brza reakcija na kvarove
- Podrška korisnicima

---

💡 ZAŠTO CEDIS?

- ✓ Stabilno napajanje
  - ✓ Stručan tim
- ✓ Savremena mreža
  - ✓ Pouzdanost
- ✓ Razvoj i inovacije

---

Energija koja pokreće Crnu Goru

ISBN 978-991-9657-0-7



9 789911 965707