



ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE

WELDING & WELDED STRUCTURES

God. 69 Vol. 69	Br. 3 No. 3	97-144 97-144	Beograd Belgrade	Srbija Serbia	2024. 2024.
--------------------	----------------	------------------	---------------------	------------------	----------------

ČASOPIS DRUŠTVA ZA UNAPREĐIVANJE
ZAVARIVANJA U SRBIJI

SERBIAN WELDING SOCIETY
QUARTERLY REVIEW

IZLAZI TROMESEČNO

IZDAVAČ / PUBLISHER

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

Adresa: 11000 Beograd, Grčića Milenka 67

Za izdavača / For Publisher

Branislav Lukić, dipl.ing, predsednik DUZS

UREDNIŠTVO / EDITORIAL

Glavni i odgovorni urednik / Editor-in-Chief

Dr Zoran Odanović, dipl.ing.

duzs011@gmail.com, odanovic@ptt.rs

Tehnički urednik / Technical Editor

Branislav Lukić, dipl.ing

Redakcijski odbor / Editorial Board

Dr Nenad Radović, dipl.ing.

Dr Radomir Jovičić, dipl.ing.

Dr Srđan Bulatović, dipl.ing.

Miloš Pavlović, dipl.ing.

UREĐIVAČKI ODBOR / PUBLISHING COUNCIL

Dr Vencislav Grabulov, dipl.ing, (predsednik)

Prof.dr Vukić Lazić, dipl.ing.

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

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

Prof. dr Dragoslav Dobraš, dipl.ing. (BiH, Republika Srpska)

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

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

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

Dr Horia Dascau, dipl.ing. (Rumunija)

REDAKCIJA I MARKETING / EDITORIAL OFFICE AND MARKETING



Vesna Jović
Grčića Milenka 67, I sprat
11000 Beograd



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



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

CIP - Каталогизација у публикацији
Народна библиотека Србије, Београд
621.791

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

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

CENE I NARUDŽBINA ZA 2024.

Cena pojedinačnog broja 825,00 dinara

Godišnja pretplata 2500,00 dinara

Tekući račun: 325-9500600002588-46

PRICE AND ORDER

Annual subscription: EUR 100

Account No. RS35325960160000041546

OTPVRS22 (VOJVOĐANSKA BANKA AD)

IBAN RS35325960160000041546

ŠTAMPA / PRINTED

“VIS STUDIO” d.o.o.

Bulevar Arsenija Čamojevića 123, Beograd

Tiraž: 400 kom.

SADRŽAJ

CONTENTS



NAUKA•ISTRAŽIVANJE•RAZVOJ

SCIENCE•RESEARCH•DEVELOPMENT

99

USPOREDBA TOPITELJA ZA ATIG ZAVARIVANJE I
NJIHOV UTICAJ NA MEHANIČKE OSOBINECOMPARISON OF ATIG WELDING POWDERS AND
THEIR INFLUENCE ON MECHANICAL PROPERTIES*Tomaž Vuherer, Darko Bajić, Mersida Manjgo, Edvard Bjelajac, Andrej Skumavc, Uroš Orožim, Gorazd Lojen*

NAUKA•ISTRAŽIVANJE•RAZVOJ

SCIENCE•RESEARCH•DEVELOPMENT

111

CJELOVITOST VIŠEDIJELNIH TOROSFERIČNIH
PODNIKA URAĐENIH POSTUPKOM INKREMENTALNE
DEFORMACIJESTRUCTURAL INTEGRITY OF MULTIPART
TORISPHERICAL CYLINDRICAL HEAD SHELLS MADE
BY THE INCREMENTAL SHEET FORMING*Zlatan Ištvančić, Mustafa Hadžalić, Raza Sunulahpašić*

PRAKSA

PRACTICE

119

BITNE VARIJABLE ZA NAVARIVANJE PREGRIJAČA
KOJI SE KORISTE U „RECOVERY“ KOTLOVIMAESSENTIAL VARIABLES FOR OVERLAY WELDING OF
SUPERHEATER USED IN RECOVERY BOILERS*Tihomir Marsenić, Marko Župan, Božo Despotović, Ivan Samardžić, Dejan Marić*

PRAKSA

PRACTICE

129

IZRADA REAKTORA ZA PROIZVODNJU HLOR-
DIOKSIDA OD DVOSLOJNIH PLOČA TITAN - ČELIKMANUFACTURE OF THE REACTOR FOR CHLORINE-
DIOXIDE PRODUCTION FROM DOUBLE-LAYER
TITANIUM-STEEL PLATES*Mića Đorđević, Dragan Đorđević, Vladimir Đorđević, Nenad Gačić*

VESTI

NEWS

128

VESTI 71. GODIŠNJA SKUPŠTINA DRUŠTVA ZA UNAPREĐIVANJE ZAVARIVANJA U SRBIJI
BEOGRAD, 26.06.2024

142

VESTI PRIKAZ KNJIGE: KAKO JE LAKO ZAVARIVATI SA ELEKTRODAMA, AUTORA SAŠE PEJKIĆA
- 78. GODIŠNJA SKUPŠTINA MIZ (IIW) I MEĐUNARODNA KONFERENCIJA O ZAVARIVANJU I
SPAJANJU

143

VESTI - FORMNEXT EXPO – SKUP POSVEĆEN ADITIVNOJ PROIZVODNJI
- AJP 2025 KONFERENCIJA O NAPREDNIM TEHNOLOGIJAMA SPAJANJA

- ICWAM 2025: 19. MEĐUNARODNA KONFERENCIJA O ZAVARIVANJU I ADITIVNOJ PROIZVODNJI

144

MARKETING



Tomaž Vuherer¹, Darko Bajić², Mersida Manjgo^{3,a}, Edvard Bjelajac⁴, Andrej Skumavc⁵, Uroš Orožim¹, Gorazd Lojen¹

USPOREDBA TOPITELJA ZA ATIG ZAVARIVANJE I NJIHOV UTICAJ NA MEHANIČKE OSOBINE

COMPARISON OF ATIG WELDING POWDERS AND THEIR INFLUENCE ON MECHANICAL PROPERTIES

Originalni naučni rad / Original scientific paper

Rad primljen / Paper received:

Novembar 2023.

Rad prihvaćen / Paper accepted:

Februar 2024.

Adresa autora / Author's address:

¹ Univerza u Mariboru, Fakulteta za strojništvo, Maribor, Slovenija

² Univerzitet Crne Gore, Mašinski Fakultet, Podgorica, Crna Gora

³ Univerzitet Džemal Bijedić, Mašinski Fakultet, Mostar, BiH

⁴ Messer Slovenija d.o.o., Ljubljana, Slovenija

⁵ SIJ Acroni d.o.o., Jesenice, Slovenija

email: ^amersida.manjgo@unmo.ba

Ključne reči: ATIG, aktivirajući topitelj, TIG zavarivanje, mehanička svojstva, zatezanje, tvrdoća, energija udara

Keywords: ATIG, activating flux, TIG welding, mechanical properties, tensile tests, hardness, absorbed energy

Rezime

Primjena konvencionalnog elektro-lučnog zavarivanja u zaštiti argona (TIG postupak zavarivanja) ima ograničene mogućnosti. Ova ograničenja se prije svega odnose na debljinu zavarivanog materijala i potrebu pripreme žljeba za njihovo zavarivanje. Prevažilaženje ovih ograničenja kod TIG zavarivanja je učinjeno primjenom aktivirajućih topitelja, pa je postupak dobio naziv ATIG (A-TIG) zavarivanje. U radu se prezentuju rezultati istraživanja primjene aktivirajućih topitelja pri zavarivanju austenitnog nerđajućeg čelika 316L debljine 6 mm. Upotrebom topitelja BC-31 i QuickTIG različite hemijske osnove, međusobno upoređujemo mehanička svojstva zavarenih spojeva, kao i sa zavarenim spojevima istog materijala dobijenog primjenom konvencionalnog TIG postupka. Rezultati pokazuju da najbolja mehanička svojstva posjeduju zavareni spojevi realizovani ATIG postupkom primjenom mješavine aktivnih topitelja BC - 31 (50%) i QuickTIG (50%) (zeleni + bijeli topitelj).

Abstract

The application of conventional electric arc welding in argon protection (TIG welding process) has limited possibilities. These limitations are primarily related to the thickness of the welded material and the need to prepare the groove for their welding. Overcoming these limitations in TIG welding was done by using activating flux, so the procedure was named ATIG (A-TIG) welding. The paper presents the results of research into the application of activating fluxes in welding austenitic stainless steel 316L with a thickness of 6 mm. By using the BC-31 and QuickTIG melters of different chemical bases, we compare the mechanical properties of the welded joints, as well as with the welded joints of the same material obtained using the conventional TIG procedure. The results show that the best mechanical properties are possessed by welded joints realized by the ATIG process using a mixture of activating fluxes BC - 31 (50%) and QuickTIG (50%) (green + white flux).

Rad je u originalnom obliku objavljen u Zborniku radova sa Međunarodnog naučnog i stručnog skupa: Zavarivanje spaja – „Zavarivanje i zavarene konstrukcije 2023“ održanog u Sarajevu, BiH, od 25. do 27. oktobra 2023. godine.



1. Uvod

Postizanje pouzdanog zavarenog spoja podrazumijeva identičnost ili minimalna razlika mehaničkih karakteristikama metala šava (MŠ) i osnovnog metala (OM). Ograničenja primjene konvencionalnog elektrolučnog TIG zavarivanja uslovlila su potrebu za poboljšanjem penetracionih svojstava električnog luka. Povećanje struje zavarivanja nije dalo dobre rezultate. Primjena aktivirajućih topitelja predstavlja modifikovati konvencionalni TIG postupak koji se u literaturi sreće pod nazivom ATIG zavarivanje. Efekti ATIG postupka zavarivanja su posledica aktivacije hemijskih i fizičkih procesa u zoni zavarivanja.

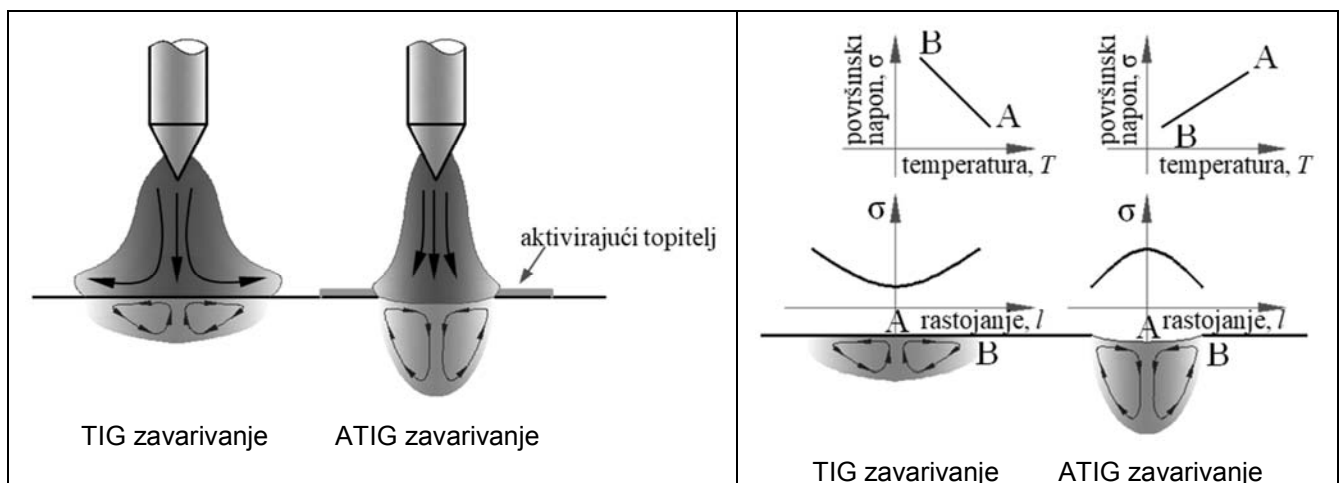
U Institutu za elektrozavarivanje E.O.Paton iz Kieva (Ukraina), 60-tih godina prošlog vijeka, kao nužna potreba pri zavarivanju visoko rafiniranih čelika, kontrolisanim unosom mikrokoličina aktivirajućih topitelja u zonu zavarivanja osvojena je nova metoda poboljšanja tehnoloških karakteristika električnog luka [1-6]. Mikro količine topitelja potpomažu razvoju hemijskih i fizičkih proces u električnom luku i rastopu, što doprinosi poboljšanju penetracione sposobnosti električnog luka [7].

Penetraciona sposobnost električnog luka se povećava kao posledica povećanja 1,5 - 2,5 puta gustine energije u aktivnoj mrlji anode bez dodatne

potrošnje inertnog zaštitnog gasa. U odnosu na konvencionalni TIG postupak, potrebna struja zavarivanja pri ATIG postupku je 30 - 40 % manja pri zavarivanju istog materijala. Usled koncentracije energije širina zone uticaja toplote (ZUT) je manja, čime se postiže efekat povećanje otpora formiranju toplih i hladnih prslina u OM i ZUT-u. Hemijski sastav MŠ u odnosu na OM ostaje skoro nepromijenjen, što doprinosi ujednačenosti ili poboljšanju mehaničkih svojstava MŠ.

Razumijevanje metalurškog aspekta i aktivacije procesa u zoni zavarivanja su od krucijalnog značaja za razumijevanje poboljšanih penetracionih svojstava električnog luka primjenom aktivirajućih topitelja. Topitelji su osmišljeni na bazi negativnih i površinski-aktivnih, lako jonizujućih elemenata. Sadrže aktivatore za obezbjeđenje potrebne povoljne geometrije šava i modifikatora za poboljšanje strukture i svojstava tečnog metala rastopa.

Mehanizam za objašnjenje uticaja aktivirajućeg topitelja na penetraciono svojstvo električnog luka i geometriju MŠ je Marangonijev efekat strujanja fluida (sl.1) u kombinaciji s Lorentz-ovim silama. Marangonijev efekat se bazira na Toplotnom Koeficijentu Površinskog Napona – TKPN rastopa.



Slika 1. Shematski prikaz Marangonijevog efekta strujanja tečnog metala u rastopu

Figure 1. Schematic representation of the Marangoni effect of the liquid metal flow in the melt

Primjenom aktivirajućeg topitelja, vrijednost TKPN je pozitivan. Temperatura perifernog dijela rastopa je i dalje niža od centralnog ($T_A > T_B$) ali je površinski napon manji ($\sigma_A > \sigma_B$) što doptinosi generisanju cenripetalnog Marangonijevog efekta u rastopu - tok rastopa se odvija od periferije ka

centru (sl.1). Geometrija zavara je povoljna, mala širina i velika penetracija [7, 8].

Osnovu hemijskog sastava aktivirajućih topitelja čine soli i oksidi metala koji determinišu njegova metalurška svojstva, a diktiran je od strane hemijskog sastava zavarivanog čelika [9, 10]. U ovom trenutku, razvijeni su topitelji za zavarivanje



visokolegiranih austenitnih čelika (Cr-Ni), feritno-beinitnih (Cr-Mo-V) čelika otpornih na puzanje i ugljeničnih konstrukcionih feritno-perlitnih čelika (do 0.25% C) za izradu cijevi visokog pritiska [9].

ATIG postupak zavarivanja omogućava da se uspješno izvede zavarivanje čelika debljine do 12 mm bez pripreme žljeba i zazora za jednostrano, a debljine do 20 mm za dvostrano zavarivanje [9]. Tehnološki ATIG postupak zavarivanja je veoma blizak plazma zavarivanju.

Istraživanja na polju primjene topitelja zavarivanje čelika različitih klasa je intenzivno [11-16].

2. Metodologija rada

2.1 Materijal

Za istraživanje je, kao OM korišćen austenitni nerđajući čelik 316L (ASTM). Debljina čelika je 6 mm. Njegov hemijski sastav je vidljiv u tabeli 1 a njegove mehaničke osobine su date u tabeli 2.

Tabela 1. Hemijski sastav nerđajućeg čelika 316L (mas %)

Table 1. Chemical composition of stainless steel 316L (mass %)

C	Si	Mn	S	P	Cr
0,028	0,336	1,396	0,001	0,033	16,580
Ni	Mo	Cu	Co	N	Fe
10,005	2,008	0,336	0,154	0,036	ostatak

Tabela 2. Mehaničke osobine nerđajućeg čelika 316L

Table 2. Mechanical properties of the stainless steel 316L

$R_{p0.2}$ [MPa]	$R_{p0.2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_5 [%]	HB
297	329	594	56	82

2.2 Zavarivanje

Za zavarivanje su pripremljeni uzorci sa I oblikom žljeba. Osnovni materijal (316L), debljine 6 mm, dužine 220 mm i širine 75 mm pripremljen je za robotsko ATIG zavarivanje. Sa donje strane izvedena je zaštita korijena zavarenog spoja korišćenjem inertnog gasa Argona. Dvije ploče osnovnog materijala postavljene su u stezaljke, a

na kraju sa obje strane su postavljeni dodatni pomoćni taloni za početak i kvalitetan završetak zavara.

Na slici 2. prikazana je priprema osnovnog materijala prije zavarivanja sa formiranjem korijena korišćenjem inertnog gasa argona sa donje strane. Za zavarivanje je korišćen Fronius AC/DC TIG izvor MagicWave 2000.



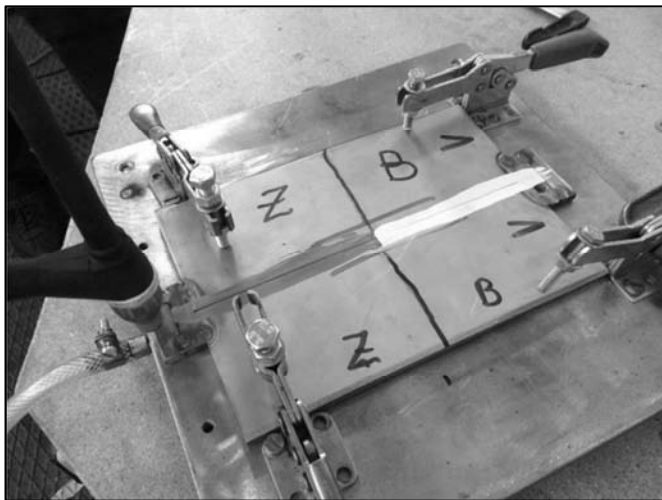
Slika 2. Priprema osnovnog materijala prije zavarivanje sa formiranjem korijena korišćenjem inertnog gasa argona sa donje strane

Figure 2. Preparation of the base material before welding, with root protection from the bottom side by using inert argon gas



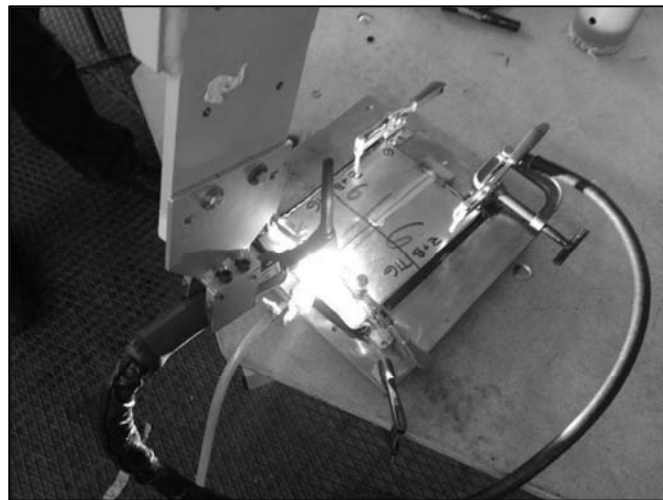
Zavarivanje je izvedeno korišćenjem robotskog ATIG postupka zavarivanja bez dodatnog materijala, pri čemu se koristio ABB robot XR ACMA 701. Prije zavarivanja na površinu sa gornje strane je nanešen aktivirajući topitelj za ATIG zavarivanje. Za analizu su korišćena dva topitelja različite hemijske osnove. Prvi topitelj je ukrajinskog proizvođača Patonovog instituta iz

Kijeva sa oznakom BC-31 koji je zelene boje. Drugi topitelj je slovenačkog proizvođača JUVAR d.o.o. sa oznakom QuickTIG koji je bijele boje. Oba topitelja su prije zavarivanja nanešena na istom pripremljenom uzorku za zavarivanje u dužini od po 110 mm, što je prikazano na slici 3. Robotsko ATIG zavarivanje prikazano je na slici 4. Zavareni spoj je formiran u jednom prolazu.



Slika 3. Priprema za zavarivanje sa nanosom aktivnih topitelja na površini – zeleni aktivni topitelj i bijeli aktivni topitelj

Figure 3. Preparation for welding with application of activating flux on the surface - green activating flux and white activating flux



Slika 4. Robotsko ATIG zavarivanje bez dodatnog materijala

Figure 4. Robotic ATIG welding without filler material

Izmjereni parametri zavarivanja prikazani su u Tabeli 3. U tabeli „Z“ označava korišćenje zelenog topitelja BC-31 i „B“ označava korišćenje bijelog topitelja QuickTIG, a „bez topitelja“ znači da je zavarivanje izvedeno konvencionalnim TIG postupkom zavarivanja.

Kod svih uzoraka, struja i brzina zavarivanja je bila ista, kao i dužina električnog luka. Napon nije podešavan na TIG uređaju Fronius MagicWave 2000, već je mjerjen tokom procesa zavarivanja.

Na prelazu iz zone jednog na zonu sa drugim topiteljem, napon za zavarivanje je doživio svoju promjenu. Dio zavarenog spoja ploče na kom se nalazio BC-31 topitelj (zeleni) napon je bio za 3,5% veći nego na dijelu spoja sa QuickTIG topiteljem (bijeli). Najmanji napon zavarivanja je izmjeren pri zavarivanju konvencionalnim TIG postupkom, bez korišćenja dodatnog materijala.

Tabela 3. Izmjereni parametri zavarivanja

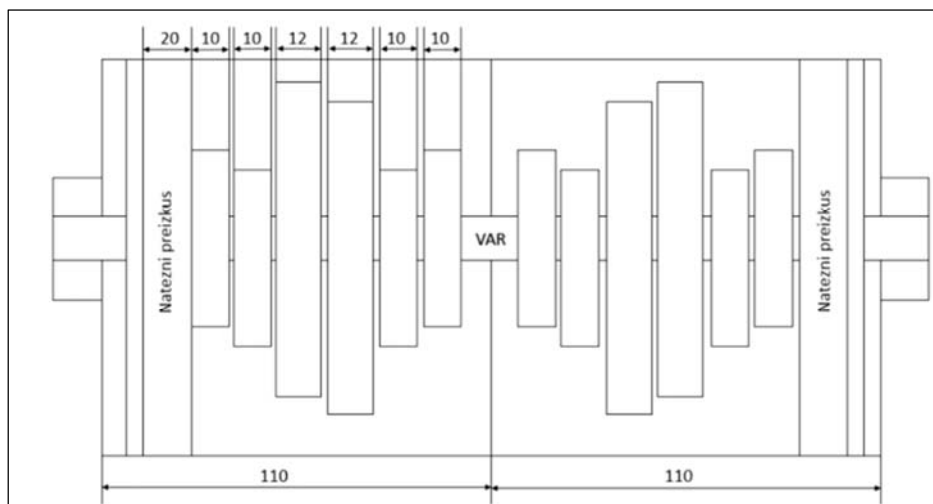
Table 3. Measured welding parameters

Aktivirajući topitelj	I [A]	U [V]	v_w [cm/min]	k [%]	Q [kJ/cm]
BC-31 (Z)	170	12,4	9,1	0,65	9,03
QuickTIG (B)	170	11,6	9,1	0,65	8,45
BC-31 +QuickTIG (Z+B)	170	10,9	9,1	0,65	7,94
TIG (bez topitelja)	170	10,4	9,1	0,65	7,57



Iz svakog zavarenog spoja uzorkovane su epruvete za ispitivanje mehaničkih svojstava zavarenih spojeva. Izrađene su epruvete za ispitivanje zatezanjem, ispitivanje na ugib,

ispitivanje na instrumentiranom Charpy klatnu, mjerenje tvrdoće i uzorci za analizu mikrostrukture. Plan sječenja uzoraka i sami uzorci su prikazani na slici 5.



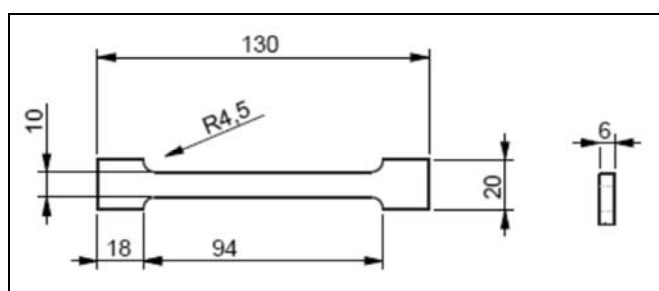
Slika 5. Plan sječenja uzoraka iz zavarenog spoja

Figure 5. Plan of cutting samples from the welded joint

Geometrija uzorka za zatezanje je prikazana na slici 6. Svi uzorci su debljine 6 mm.

Na kraju ispitivanja su pripremljeni makro-uzorci sa brušenjem na vodo brusnom papiru raznih granulacija između P100 do P1200 i poliranjem na glinici dimenzija 0,3 μm . Sledilo je nagrizanje površine sa 1 % nitalom u trajanju od 20 sekundi.

Na tim makro-uzorcima je mjerena tvrdoća po Vikesu u skladu sa standardom EN ISO 9015-1 u čeonom (tjemenom) dijelu zavarenog spoja 1 mm ispod površine. Tvrdoća je mjerena u tri zone zavarog spoja: OM, ZUT-u i MŠ.



Slika 6. Geometrija i izgled uzorka (epruvete) za ispitivanje zatezanjem

Figure 6. Geometry and appearance of the specimen (sample) for tension testing

Urađen je test udarne žilavosti na instrumentiranom Charpy klatnu AMSLER RPK 300 J u MŠ za sve ATIG zavarene spojeve. Za test su korišćeni uzorci dimenzija 6 x 10 x 55 mm sa ISO – V zarezom sa radijusom na dnu zarezu 0,25 mm.

2.3 Eksperiment i analiza rezultata

Rezultati testova na zatezanje su prikazani na slikama od 7 do 10, gdje su prikazani $\sigma - \epsilon$

dijagrami za zavarene spojeve sa upotrebom različitih aktivirajućih topitelja pri ATIG zavarivanju i konvencionalnog TIG zavarivanja.

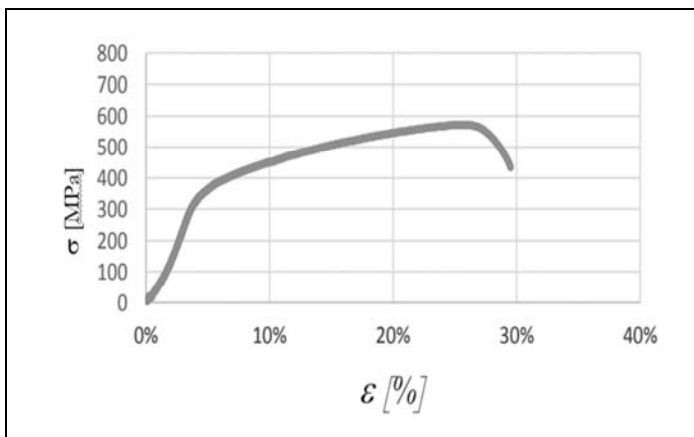
Na slici 7. su prikazani rezultati ispitivanja na zatezanje kada je korišćen aktivirajući topitelj BC-31 (zelene boje). Kod tih ispitivanih uzoraka dobijena je najveća zatezna čvrstoća od 582 MPa, najmanje izduženje MŠ od 29 % i kontrakcija 58 %.



Na slici 8. prikazani su rezultati ispitivanja na zatezanje kada je korišćen aktivirajući topitelj QuickTIG (bijele boje) gdje je zatezna čvrstoća 572 MPa. Kod ovih zavarenih spojeva, izduženje je bilo 31 %, a kontrakcija na mjestu preloma je 63 %.

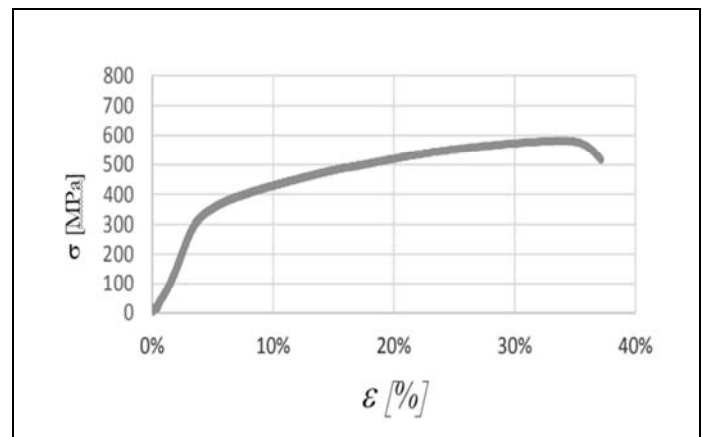
Na slici 9 prikazani su rezultati ispitivanja na zatezanja za ATIG zavareni spoj gdje je za zavarivanje upotrijebljena mješavina aktivnih topitelja BC – 31 (50%) i QuickTIG (50%) (zeleni + bijeli topitelj). Zatezna čvrstoća kod ovih uzoraka je 579 MPa, izduženje je imalo najveću vrijednost od 32 %, a kontrakcija je 61 %.

Na kraju, na slici 10 prikazan je rezultat testa na zatezanje za konvencionalni TIG spoj. Kod ovog spoja pri istim parametrima zavarivanja kao kod ATIG postupka (struja zavarivanja, brzina zavarivanja i dužina električnog luka), električni luk nije imao potrebnu penetraciju, pa nije u potpunosti provaren materijal, što je svakako uticalo na rezultate zatezanja. Zatezna čvrstoća je imala izuzetno nisku vrijednost od 199 MPa, izduženje samo 2 % i kontrakciju 20 %.



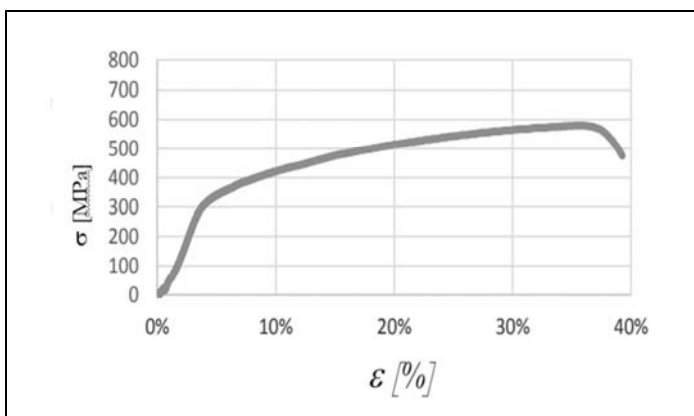
Slika 7. σ - ε dijagram za ATIG zavareni spoj izveden korišćenjem BC-31 (zeleni) topitelja

Figure 7. σ - ε diagram for an ATIG weld made using BC-31 (green) flux



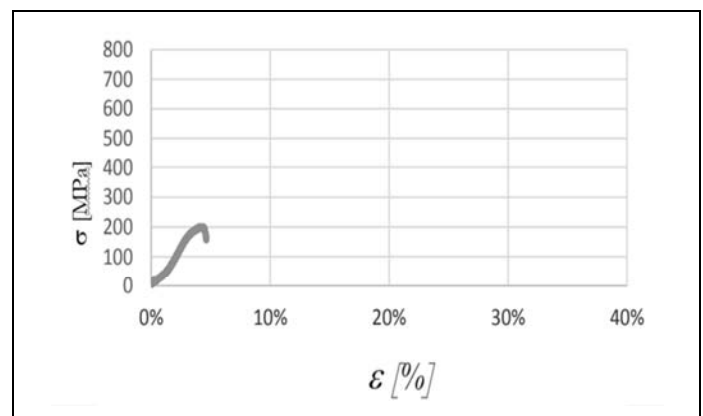
Slika 8. σ - ε dijagram za ATIG zavareni spoj izveden korišćenjem QuickTIG (bijeli) topitelja

Figure 8. σ - ε diagram for an ATIG weld made using the QuickTIG (white) flux



Slika 9. σ - ε dijagram za ATIG zavareni spoj izveden korišćenjem mješavine aktivirajućih topitelja BC-31 (50%) i QuickTIG (50%) (zeleni + bijeli)

Figure 9. σ - ε diagram for an ATIG welded joint performed using a mixture of activating fluxes BC-31 (50%) and QuickTIG (50%) (green + white)



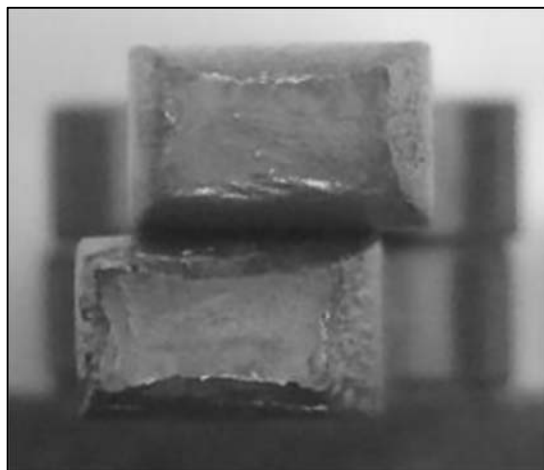
Slika 10. σ - ε dijagram za konvencionalni TIG zavareni spoj izveden bez korišćenja aktivnih topitelja

Figure 10. σ - ε diagram for a conventional TIG welded joint performed without the use of active fluxes

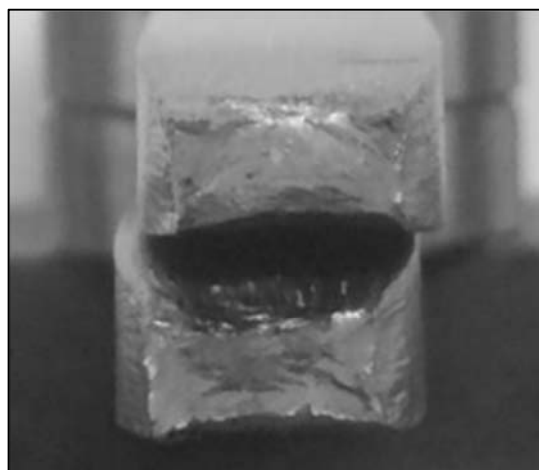


Na slici 11. prikazane su prelomne površine svih uzorka na zatezanje koje su se uvijek lomile u MŠ, gdje se jasno vidi kontrakcija na prelomnoj površini. Najmanja kontrakcija je kod konvencionalnog TIG zavarivanje gdje se jasno vidi da OM nije u

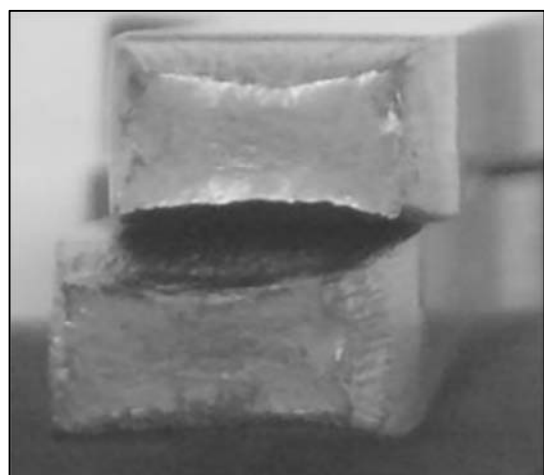
potpunosti protopljen što je pri ispitivanju zatezanjem izazvalo koncentraciju napona i uzorak se nije mogao deformisati, pa je lom uzorka nastao pri maloj deformaciji presjeka. Svi rezultati testova na zatezanje prikazani su u tabeli 4.



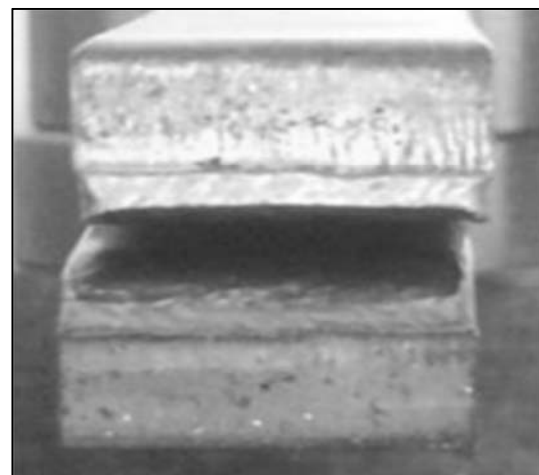
ATIG - BC-31 (zeleni topitelj)
ATIG - BC-31 (green flux)



ATIG - QuickTIG (bijeli topitelj)
ATIG - QuickTIG (white flux)



ATIG - BC-31 + QuickTIG (zeleni + bijeli topitelj)
ATIG - BC-31 + QuickTIG (green + white flux)



TIG (bez topitelja)
TIG (without flux)

Slika 11. Prelomne površine na uzorcima nakon ispitivanja zatezanjem

Figure 11. Fractured surfaces from samples after tensile testing

Tabela 4. Rezultati ispitivanja na zatezanje

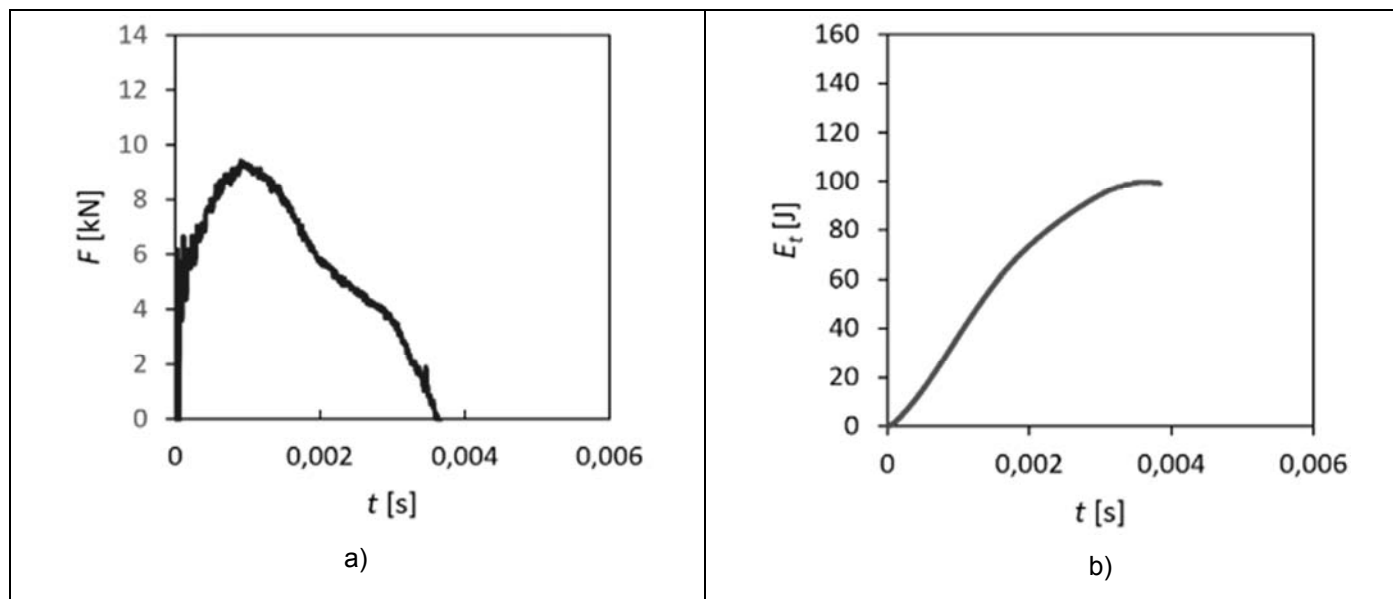
Table 4. Tensile test results

Aktivirajući topitelj	R_m [MPa]	A_5 [%]	Z [%]	Mjesto preloma
BC-31 (Z)	582	29	58	Metal šava
QuickTIG (B)	572	31	63	Metal šava
BC-31 +QuickTIG (Z+B)	579	32	61	Metal šava
TIG (bez topitelja)	199	2	20	Metal šava



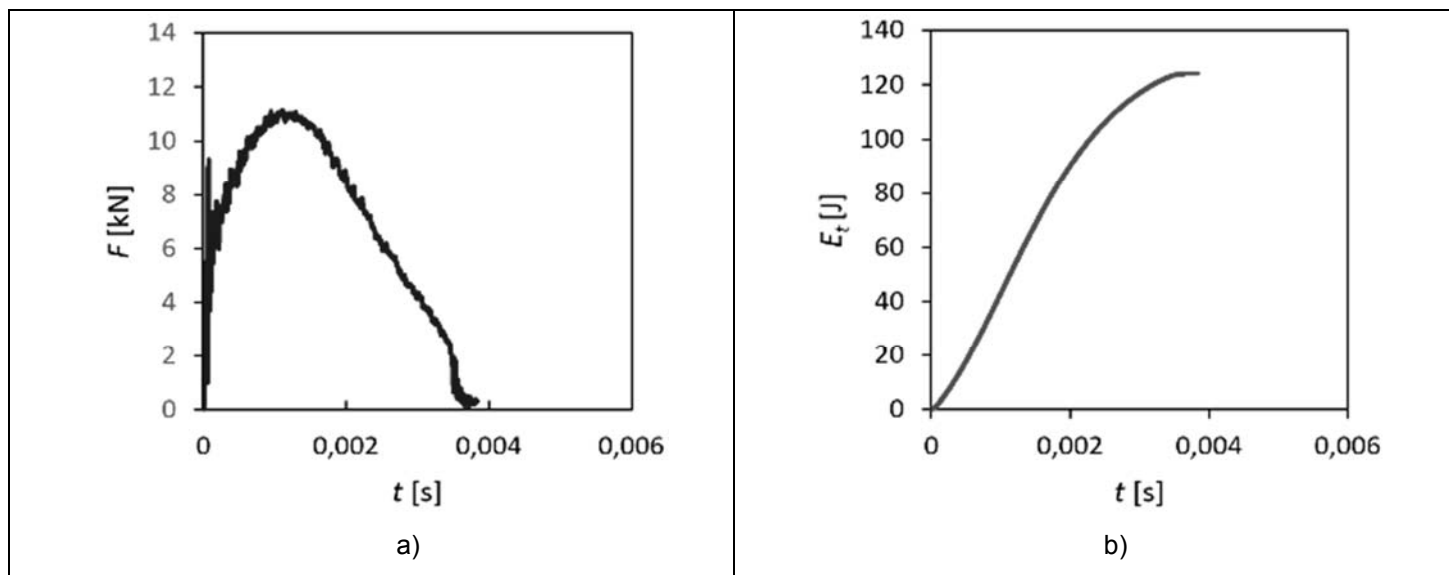
Rezultati testova na instrumentiranom Charpy šarpi prikazani su na slikama 12. do 14, gdje su

prikazani dijagrami sila – vrijeme (plava boja) i energija - vrijeme (crvena boja).



Slika 12. Rezultati instrumentiranog Charpy testa za ATIG zavareni spoj pri korišćenju aktivirajućeg topitelja BC-31 (zeleni): a) $F - t$ dijagram; b) $E - t$ dijagram

Figure 12. Instrumented Charpy test results for ATIG welded joint using BC-31 activating flux (green): a) $F - t$ diagram; b) $E - t$ diagram

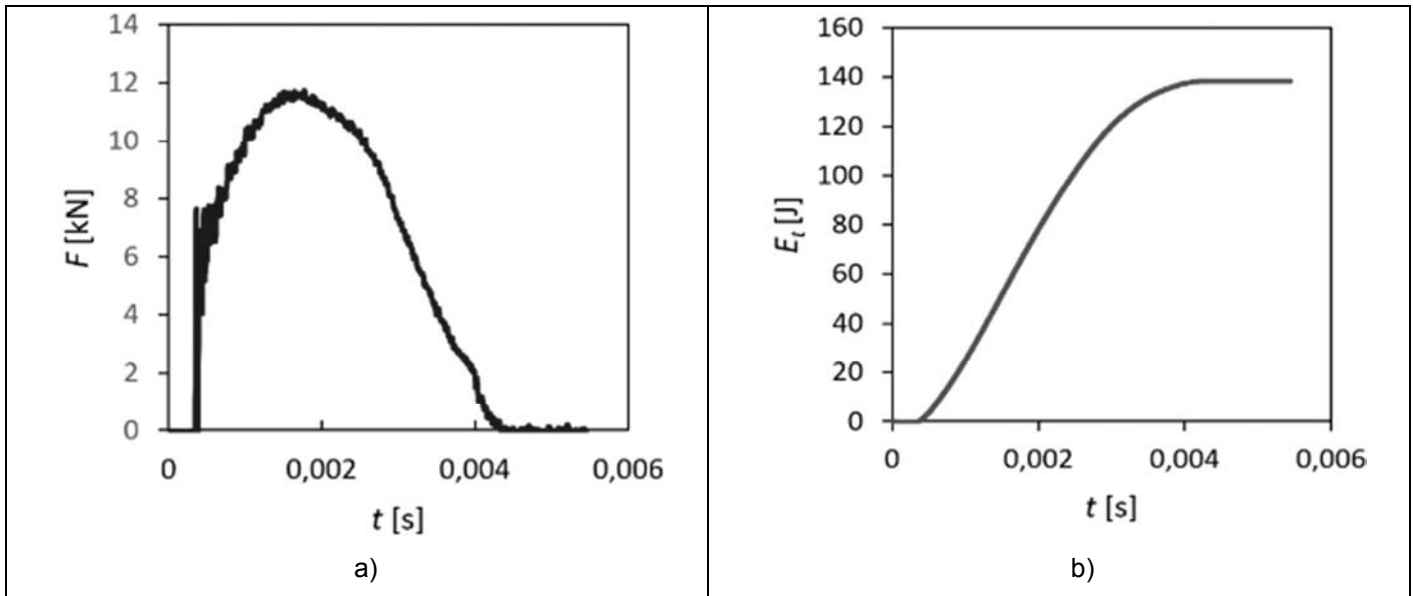


Slika 13. Rezultati instrumentiranog Charpy testa za ATIG zavareni spoj pri korišćenju aktivirajućeg topitelja QuickTIG (bijeli): a) $F - t$ dijagram; b) $E - t$ dijagram

Figure 13. Instrumented Charpy test results for an ATIG welded joint using the QuickTIG (white) activating flux: a) $F - t$ diagram; b) $E - t$ diagram

Na slici 14. prikazani su rezultati instrumentiranog šarpi testa za MŠ zavarenog spoja za ATIG zavareni spoj pri korišćenju mješavine aktivirajućih

topitelja BC – 31 i QuickTIG (zeleni + bijeli). Kod ovih uzoraka izmjerena je najviša vrijednost ukupne energije loma (E_u).

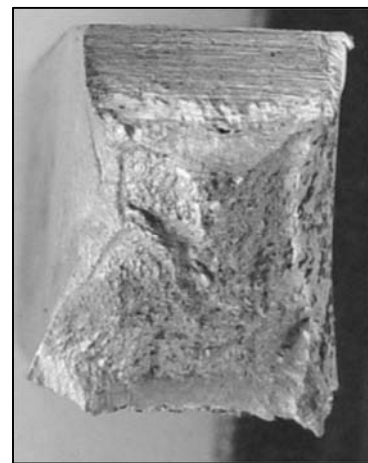


Slika 14. Rezultati instrumentiranog šarpi testa za ATIG zavareni spoj pri korišćenju mješavine aktivirajućih topitelja BC – 31 i QuickTIG (zeleni + bijeli): a) $F - t$ dijagram; b) $E - t$ dijagram

Figure 14. Results of the instrumented Sharpie test for the ATIG welded joint when using a mixture of activating fluxes BC - 31 and QuickTIG (green + white): a) $F - t$ diagram; b) $E - t$ diagram

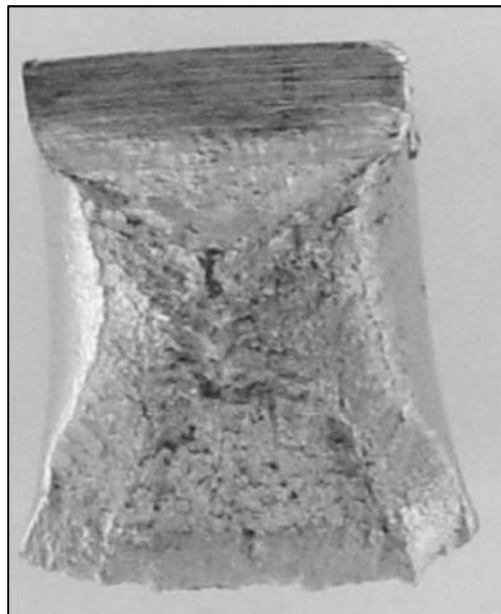
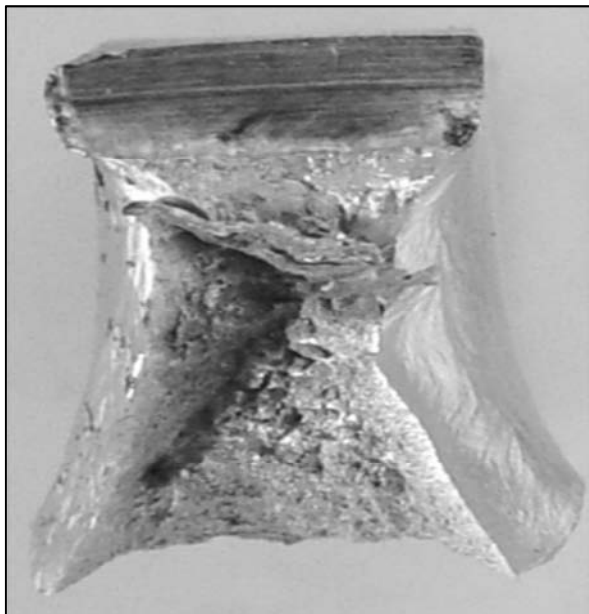
Na slici 12 prikazani su rezultati instrumentiranog šarpi testa u MŠ za ATIG zavareni spoj pri korišćenju aktivirajućeg topitelja BC – 31 (zeleni). Kod ovih uzoraka izmjerena je najmanja vrijednost ukupne energije loma (E_u). Na slici 13. prikazani su rezultati instrumentiranog šarpi testa u MŠ za ATIG zavareni spoj pri korišćenju aktivirajućeg topitelja QuickTIG (bijeli). Na slici 14. prikazani su rezultati instrumentiranog šarpi testa u MŠ za ATIG zavareni spoj pri korišćenju mješovine aktivirajućeg topitelja BC – 31 + QuickTIG (zeleni + bijeli).

Prelomne površine šarpi uzoraka su prikazane na slikama od 15. do 17. Na njima se uočava velika plastična deformacija sa velikim bočnim usnama. Najmanja plastična deformacija je vidljiva na MŠ ATIG zavarenog spoja korišćenjem BC – 31 (zeleni) aktivirajućeg topitelja, dok je najveća deformacija bila u metalu šava ATIG zavarenog spoja korišćenjem mješavine topitelja BC – 31 i QuickTIG (zeleni + bijeli).

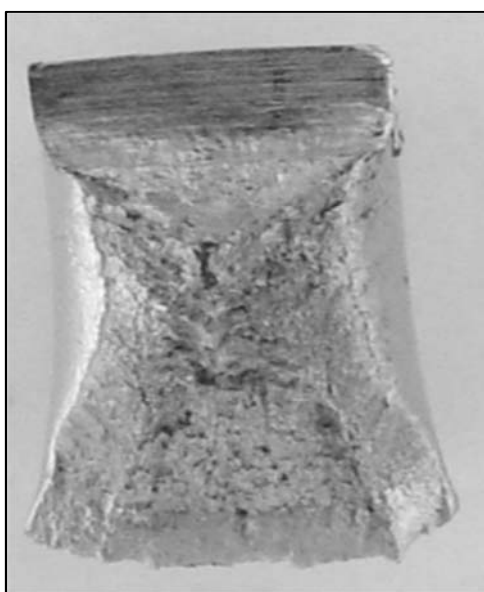


Slika 15. Prelomne površine šarpi uzorka za ATIG zavareni spoj pri korišćenju aktivirajućeg topitelja BC-31 (zeleni)

Figure 15. Fracture surfaces of a Sharpie sample for an ATIG welded joint using BC-31 activating flux (green).



Slika 16. Prelomne površine šarpi uzorka za ATIG zavareni spoj pri korišćenju aktivirajućeg topitelja QuickTIG (bijeli)
Figure 16. Fracture surfaces of a Sharpy sample for an ATIG welded joint using the QuickTIG (white) flux

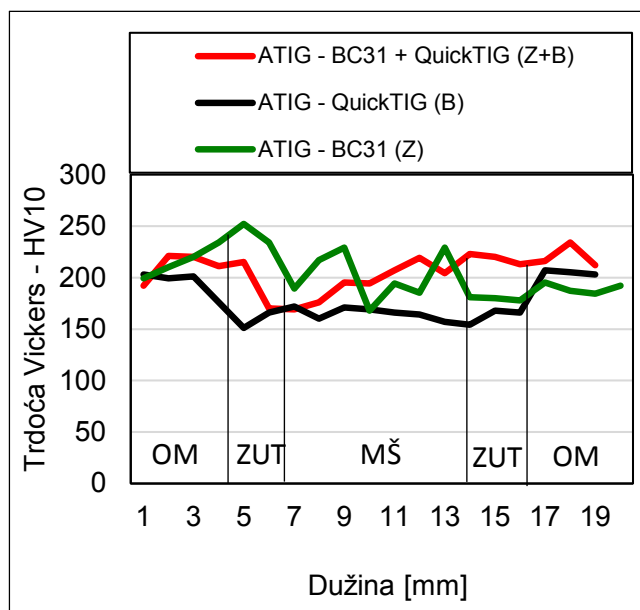


Slika 17. Prelomne površine šarpi uzorka za ATIG zavareni spoj pri korišćenju mješavine aktivirajućih topitelja BC-31 i QuickTIG (zeleni + bijeli)

Figure 17. Fracture surfaces of a Sharpy sample for an ATIG welded joint using a mixture of activating fluxes BC-31 and QuickTIG (green + white)

Na svim uzorcima zavarenim ATIG postupkom izmjerene su tvrdoće po Vickersu u osnovnom materijalu, ZUT-u i MŠ na 1 mm ispod površine lica (tjemena) šava. Rezultati mjerenja tvrdoće prikazani su na slici 18. Najmanje tvrdoće bile su

izmjerene u ATIG zavarenom spoju koji je bio zavaren korišćenjem aktivirajućeg topitelja Quick TIG (bijeli). Najveća tvrdoća je izmjerena u ZUT-u kod ATIG zavarenog spoja korišćenjem aktivirajućeg topitelja BC – 31 (zeleni).



Slika 18. Rezultati mjerenja tvrdoće po Vickersu na tri uzorka ATIG zavarenih spojeva sa korišćenjem različitih aktivirajućih topitelja

Figure 18. Vickers hardness measurement results on three samples of ATIG welded joints using different activating fluxes

Najveće tvrdoće dobijene su na ATIG zavarenom spoju koji je bio zavaren sa aktivirajućim topiteljem BC – 31 (zeleni). Najmanje

tvrdoće su na ATIG zavarenom spoju realizovanom sa Quick TIG (bijeli) aktivirajućim topiteljem.

3. Zaključci

Eksperimentalnim planom su realizovana četiri zavarena spoja. Jedan spoj konvencionalnim TIG postupkom zavarivanja, a tri primjenom ATIG postupka zavarivanja gdje su se koristio BC – 31 (zeleni) aktivirajući topitelj, QuickTIG (bijeli) aktivirajući topitelj i mješavina ova dva aktivirajuća topitelja (50% zeleni + 50% bijeli).

Rezultati testova zatezanja su pokazali najbolja svojstva kod ATIG zavarenog spoja, koji je realizovan korišćenjem mješavinom aktivirajućih topitelja BC-31 i QuickTIG (zeleni + bijeli), dok je najnepovoljniji rezultat dobijen kod uzoraka koji su realizovani konvencionalnim TIG postupkom jer električni luk nije imao punu penetraciju – neprovar.

Rezultati instrumentiranog šarpi testa su pokazali najveću energiju loma kod zavarenog spoja koji je zavaren ATIG postupkom korišćenjem mješavine aktivirajućih topitelja BC-31 i QuickTIG (zeleni + bijeli). Najmanu vrijednost energije loma kod ATIG zavarenih spojeva je imao spoj koji je zavaren korišćenjem BC – 31 (zeleni) aktivirajućeg topitelja.

3. Conclusions

Four welded joints were realized according to the experimental plan. One joint was performed by conventional TIG welding process, and three by applying ATIG welding process where BC - 31 (green) activating flux, QuickTIG (white) activating flux and a mixture of these two activating fluxes (50% green + 50% white) were used.

The results of the tensile tests showed the best properties of the ATIG welded joint, which was realized using a mixture of activating fluxes BC-31 and QuickTIG (green + white), while the most unfavorable result was obtained with the samples realized with the conventional TIG process because the electric arc did not have full penetration - lack of fusion

The results of the instrumented Sharp test showed the highest fracture energy in the welded joint that was welded by the ATIG process using a mixture of activating fluxes BC-31 and QuickTIG (green + white). The joint that was welded using BC - 31 (green) activating solvent had the lowest value of fracture energy in ATIG welded joints.



Rezultati mjerenja tvrdoće su pokazali najmanje vrednosti tvrdoće u ATIG zavarenom spoju sa QuickTIG (bijeli) aktivirajući topitel.

The hardness measurement results showed the lowest hardness values in the ATIG welded joint with QuickTIG (white) activating flux.

Literatura / References

[1] S.M. Gurevich et al. (1965), Improving the penetration of titanium alloys when they are welded by argon tungsten arc process, *Automatic Welding*, 9, 1 - 4.

[2] A.M. Makara et al. (1968), High-tensile martensitic steels welded by argon tungsten arc process using flux, *Automatic Welding*, 7, 78-79.

[3] М.М. Савицкий, Г.М. Мельничук, А.Ф. Лупан, А.М. Савицкий, О.И. Олейник, (2000), Сварка стали в инертном газе с активаторами, Международная научно-техническая конференция, октября 2000г, Тбилиси, Грузи, 126-144.

[4] М.М. Савицкий, Г.И. Лесков, (1980), Механизм влияния электроотрицательных элементов на проплавливающую способность дуги с вольфрамовым катодом, *Автоматическая сварка*, 1980, №9, 17-22.

[5] М.М. Савицкий, Б.Н. Кушниренко, О.И. Олейник, (1999), Особенности сварки сталей вольфрамовым электродом с активирующими флюсами (АТИГ-процесс), *Автоматическая сварка*, 12, 20-28.

[6] М.М. Савицкий, А.Ф. Лупан, Г.М. Мельничук, О.И. Олейник, (2000), Способы применения активаторов для сварки сталей в инертном газе, *Автоматическая сварка*, 2000, 3, 48-49.

[7] Y.L. Xu, Z.B. Dong, Y.H. Wei, C.L. Yang, (2007), Marangoni convection and weld shape variation in A-TIG welding process, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol 48, 2, 178-186.

[8] T. Kuang-Hung, H. Chih-Yu, (2011), Performance of activated TIG process in austenitic stainless steel welds, *Journal of Materials Processing Technology*, 211, 503–512.

[9] D. Bajić, (2003), Istraživanje mogućnosti zavarivanja sklopova energetske opreme korišćenjem aktivirajućeg topitelja, Doktorska disertacija, Univerzitet Crne Gore, Metalurško-tehnološki fakultet Podgorica.

[10] D. Bajić, M.M.Savitsky, Ž. Blečić, (2010), Optimizing the Welding Regime Using Activating Fluxes, Counseling with International participation "Welding 2010", Tara (Serbia)

[11] T. Vuherer, M. Pal, D. Bajić, M. Manjgo, Mirza Manjgo, I. Samardžić, Ž. Kordić, (2019), Comparison of the properties at ATIG and TIG welded joints welded on the X5CrNi18-10 stainless steel, *ENGINEERING TECHNOLOGIES IN MANUFACTURING OF WELDED CONSTRUCTIONS AND PRODUCTS*, SBW 2019, Slavonski Brod, Croatia.

[12] P. Sharma, D.K. Dwivedi, (2019), A-TIG welding of dissimilar P92 steel and 304H austenitic stainless steel: Mechanisms, microstructure and mechanical properties, *Journal of Manufacturing Processes*, Volume 44, 166-178.

[13] K.D. Ramkumar, B.M. Kumar, M.G. Krishnan, S. Dev, A.J. Bhalodi, N. Arivazhagan, S. Narayanan, (2015), Studies on the weldability, microstructure and mechanical properties of activated flux TIG weldments of Inconel 718, *Materials Science and Engineering: A*, Volume 639, 234-244.

[14] A. Kulkarni, D.K. Dwivedi, M. Vasudevan, (2019), Effect of oxide fluxes on activated TIG welding of AISI 316L austenitic stainless steel, *Materials Today: Proceedings*, Volume 18, 7, 4695-4702.



Zlatan Ištvančić¹, Mustafa Hadžalić², Raza Sunulahpašić³

CJELOVITOST VIŠEDIJELNIH TOROSFERIČNIH PODNICA URAĐENIH POSTUPKOM INKREMENTALNE DEFORMACIJE

STRUCTURAL INTEGRITY OF MULTIPART TORISPHERICAL CYLINDRICAL HEAD SHELLS MADE BY THE INCREMENTAL SHEET FORMING

Originalni naučni rad / Original scientific paper

Rad primljen / Paper received:

Novembar 2023.

Rad prihvaćen / Paper accepted:

Februar 2024.

Ključne reči: tlačna oprema, cilindrične podnice, mehanička svojstva, mehanika loma.

Rezime

U radu su prikazani rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava i procjena cjelovitosti cilindričnih podnica, koja su dobivena postupkom zavarivanja i oblikovana postupkom postupne lokalne deformacije u hladnom stanju odnosno postupkom inkrementalne deformacije - Incremental sheet forming (ISF). Cilindrične podnice tlačnih posuda izrađuju se iz jednog dijela, ali standardi dopuštaju i izradu u zavarenoj izvedbi kada su dimenzije podnica veće od standardnih dimenzija limova za izradu. Geometrijski oblik i tolerancije mjera su definirane nizom preporuka. Potrebna mehanička svojstva i kriteriji prihvatljivosti za ugradnju u tlačnu opremu su propisana PED 68/2014/EC i preporukom BAS EN 13445. Mehanička svojstva zavarenog spoja i deformiranog materijala u torosferičnoj zoni podnice, kao što su žilavost, tvrdoća i pukotinska žilavost, odnosno njihove vrijednosti su ulazni parametri za utvrđivanje cjelovitosti konstrukcije podnice. Kriterijima mehanike loma, otkrivene greške mogu se kategorizirati i ocijeniti s obzirom na prihvatljivost podnice za ugradnju u tlačnu opremu ili nastavak rada. Cilj ispitivanja je utvrđivanje uticaja vrste materijala, debljine i dijametra podnica na mehanička svojstva (R_{eH} , R_m , A_5 i K_{Ic}) i na cjelovitost cilindričnih podnica.

Adresa autora / Author's address:

¹ Metacomm, Jajce, B&H,

² Institut Kemal Kapetanović, Univerzitet u Zenici, B&H,

³ Fakultet inženjerstva i prirodnih nauka, Univerzitet u Zenici, B&H

Keywords: pressure equipment, cylindrical head shells, mechanical properties, fracture mechanics.

Abstract

The paper presents the results of testing the mechanical properties and evaluating the integrity of cylindrical head shells, which were obtained by the welding process and shaped by the cold process of gradual local deformation, i.e. the process of incremental deformation. Cylindrical head shells of pressure vessels are made from one part, but the standards also allow production in a welded version when the dimensions of the floors are larger than the standard dimensions of the sheets for production. Geometric shape and measurement tolerances are defined by a series of recommendations. The required mechanical properties and acceptance criteria for installation in pressure equipment are prescribed by PED 68/2014/EC and the BAS EN 13445 recommendation. The mechanical properties of the welded joint and the deformed material in the torospheric zone of the head shells, such as toughness, hardness and crack toughness, or their values are input parameters for determining the integrity of the floor structure. Using fracture mechanics criteria, detected faults can be categorized and evaluated with regard to the acceptability of the head shells for installation in pressure equipment or continued operation. The aim of the test is to determine the influence of the type of material, thickness and diameter of the head shells on the mechanical properties (R_{eH} , R_m , A_5 and K_{Ic}) and on the integrity of the cylindrical head shells.

Rad je u originalnom obliku objavljen u Zborniku radova sa Međunarodnog naučnog i stručnog skupa: Zavarivanje spaja – „Zavarivanje i zavarene konstrukcije 2023“ održanog u Sarajevu, BiH, od 25. do 27. oktobra 2023. godine.



1. Uvod

Posude pod pritiskom se u najvećem broju slučajeva izrađuju kao višedijelne, posebno ako se radi o spremnicima velikih dimenzija koji su namijenjeni za skladištenje tečnih i plinovitih materija. Zbog svoje veličine, takve strukture se izrađuju ukupnjavanjem parcijalnih segmentata postupkom zavarivanja [1].

Kod posuda pod pritiskom vrlo često je, kao problem, prisutna pojava grešaka u zavarenim spojevima, što predstavlja potencijalno slabo mjesto.

Postupak oblikovanja inkrementalnom deformacijom je postupak oblikovanja metala progresivnom lokalnom deformacijom - Incremental sheet forming (ISF). Kod ISF postupka alat se pomjera po konturi radnog komada, pri čemu stvara male deformacije u materijalu, čime ga postepeno oblikuju u željeni oblik. Postupak izrade danaca inkrementalnom deformacijom zajedno sa rolovanjem po obimu, s ciljem izvlačenja cilindričnog dijela danca, dodatno usložnjava stanje napona zbog prisutnog velikog lokalnog pritiska.

Analiza mehaničkih svojstva zavarenog spoja i deformiranog materijala u torosferičnoj zoni podnice, kao što su žilavost, tvrdoća i pukotinska žilavost, omogućava dobivanje podataka neophodnih za pouzdanu procjenu svojstava podnica, definisanje parametara izbora i odluka, određivanje uzroka lošeg ponašanja koje ima za cilj korekciju i unapređenje tehnologije izrade.

Provjera ponašanja ovakvih danaca prije kompletiranja same posude, odnosno prije puštanja u eksploataciju je neophodna, s jedne strane zbog velikog broja utjecajnih faktora, a s druge strane zbog visoke cijene ispitivanja same realne konstrukcije. Alternativu predstavlja ispitivanje uzoraka uzetih iz same konstrukcije prije ugradnje, odnosno simuliranje ponašanja danca u toku eksploatacije pomoću ispitivanja epruveta.

Mehanička ispitivanja prezentovana u ovom radu imaju za cilj dobijanje potpunije slike stanja materijala sfernih danca posuda pod pritiskom, izrađenih zavarivanjem iz više segmenata. Podnice su izrađene od dva različita materijala S235JR i P460NL1, u dvije debljine (6 mm i 14 mm) za određeni promjer (1500 mm).

2. Metodologija rada

Tehnologija izrade mora da bude projektovana na osnovu svih relevantnih uticaja kako bi se obezbijedilo da podnice budu bezbjedne tokom

radnog vijeka. Dozvoljena naprezanja za opremu pod pritiskom moraju biti ograničena mogućim greškama u radnim uslovima, kako bi se potpuno eliminisala neizvjesnost koja nastaje od proizvodnje, modela proračuna, stvarnih radnih uslova i karakteristika i ponašanja materijala.

Podnice za eksperimentalna istraživanja se izrađuju postupnim utiskivanjem iz polaznih priprema, tzv. rundela, dobijenih od zavarenih limova. Pri takvom postupku izrade podnica uočavaju se pritisne zone po radijusu kao posljedice tehnologije izrade kombinacijom zavarivanja i plastične deformacije. Eksperiment koji se provodi ima za cilj utvrđivanja uticaja parametra: vrsta materijala, debljina i promjer na slijedeće veličine: mehanička svojstva, R_{eH} i R_m , tvrdoću, HV, i faktora intenziteta napona, K_{IC} . Podnice izrađene za eksperimentalna istraživanja imaju veliki broj segmenata koji su radijalno zavareni. Zavareni spojevi su veće krutosti i debljine u odnosu na osnovni materijal te time sprječavaju tečenje materijala i uzrokuju pojavu valovitosti na rubovima. Inkrementalna deformacija rundele se izvodi na hidrauličnoj presi sa izmjenjivim alatom i silom pritiska. Završno oblikovanje torusa rađeno je na presi tipa P2MF 200x4 – Sertom, Milano, slika 1. [2].



Slika 1. Izrada podnica postupkom inkrementalne deformacije

Figure 1. Production of head shells by the process of incremental deformation



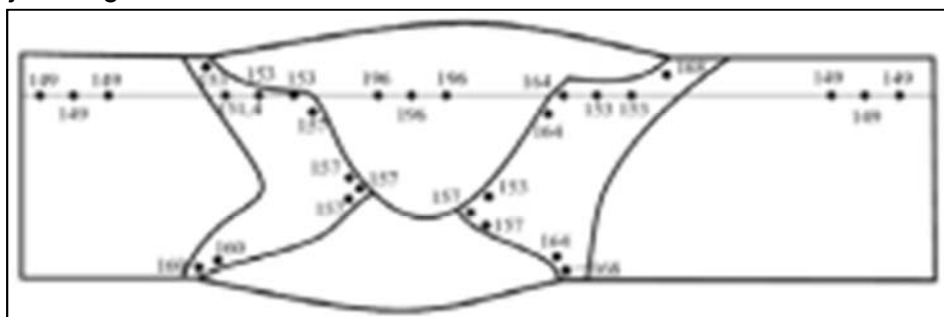
Uzorci su izvađeni iz polaznih zavarenih limova prije bilo kakve primjenjene tehnologije (serija I), zatim iz gotovih podnica izrađenih plastičnom deformacijom (serija II). Uzorci za provedena ispitivanja su standardne epruvete koje su u nekim slučajevima modifikovane (prilagođene) radi dobijanja što tačnijih rezultata. Fokus ispitivanja je zona uticaja topline kao potencijalno najkritičnije mjesto sa aspekta sigurnosti kao i mogućnosti kontrole kvaliteta.

2.1 Mjerenje tvrdoće uzoraka

Mjerenja tvrdoće na uzorcima su izvršena s ciljem utvrđivanja signifikantnih razlika i

eventualnog njihovog uticaja na ostale rezultate mehaničkih ispitivanja. Mjerenja su izvršena na uređaju za ispitivanje tvrdoće i mikrotvrdoće - ZWICK.

Provedena su ispitivanja tvrdoće po presjeku sučeono zavarenog spoja metodom ispitivanja Wickers, opterećenje je 10 kg (HV1), temperatura ispitivanja 22°C prema standardu BAS EN ISO 6507-1:2018, [3]. Ispitivanje tvrdoće je provedeno na poprečnom presjeku uzorka. Rezultati ispitivanja tvrdoće i šematski prikaz lokacije otisaka uzorka lima debljine 15 mm, izrađenog iz materijala S235JR dat je na slici 2. [2].



Slika 2. Shematski prikaz lokacije mernih mesta i tvrdoće na sučeono zavarenom spoju lima

Figure 2. Schematic representation of the location of measurement points and hardness on a butt-welded sheet metal joint

Rezultati ispitivanja svih uzoraka su prikazani u tabeli 1.

Tabela 1. Srednje vrijednosti mjerenja tvrdoće (HV) epruveta iz serije I i II za oba materijala

Table 1. Mean hardness measurement values (HV) of test samples from series I and II for both materials

Materijal		S235JR (M1)		P460NL1 (M2)		
Debljina, mm		6	15	6	15	
Promjer, mm		φ 1500				
Serija I	Oznaka	M1-1B	M1-2A	M2-1D	M2-2C	
	Tvrdoća	MZ	204,3	196	243	230
		ZUT	164,9	156,9	231,8	241,6
		OM	155	149	202,5	198,6
Serija II	Oznaka	M1-1	M1-2	M2-1	M2-2	
	Tvrdoća	MZ	232	230	272,7	283
		ZUT	193,3	211,8	276,7	290,5
		OM	179	202,4	210,5	245

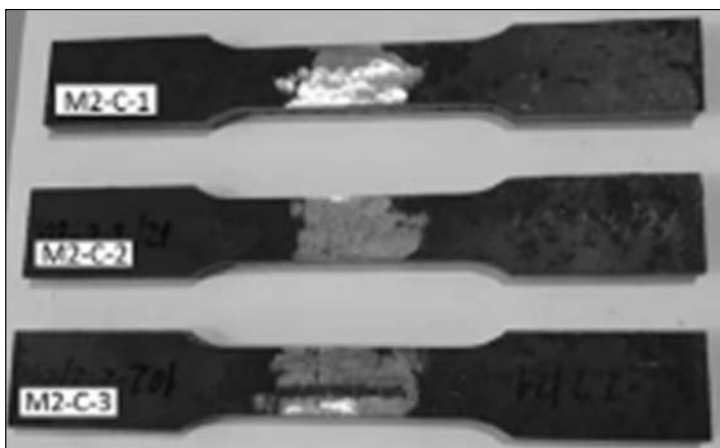
Tvrdoća serije II je povećana u odnosu sa seriju I.



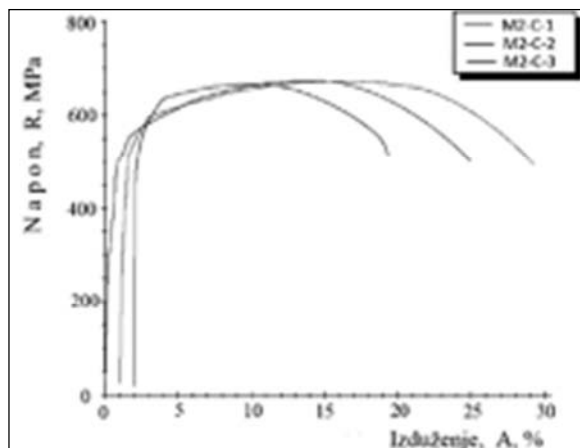
2.2. Određivanje zateznih svojstava uzoraka

Zatezna ispitivanja epruveta izvađenih iz podnice posude pod pritiskom, rađena su na sobnoj temperaturi pri +18°C. Ispitivanje je izvedeno na univerzalnoj hidrauličkoj mašini za statička ispitivanja AMSLER, ser.br. 599/625. Sam

postupak ispitivanja je definisan standardom BAS EN ISO 6892-1:2017 B [4], na epruvetama za zatezna ispitivanja čija je geometrija data standardom BAS EN ISO 4136:2014 [5]. Epruvete su modifikovane sa urezanim poprečnim žlijebom u zoni ZUT, prikazane su na slici 3.



Slika 3. Epruvete za određivanje zateznih svojstava
Figure 3. Test samples for testing tensile properties



Slika 4. Dijagram napon-izduženje epruveta iz serije I (M1)

Figure 4. Stress - elongation diagram of test samples from series I (M1)

Dijagram ispitivanja epruveta dat na slici 4. Rezultati zateznih ispitivanja epruveta za dvije serije su prikazani u tabeli 2.

Tabela 2. Srednje vrijednosti mjerenja tvrdoće (HV) epruveta iz serije I i II za oba materijala

Table 2. Mean hardness measurement values (HV) of test samples from series I and II for both materials

Materijal		S235JR (M1)		P460NL1 (M2)	
Debljina, mm		6	15	6	15
Promjer, mm		φ 1500			
Serija I	Oznaka	M1-1B	M1-2A	M2-1D	M2-2C
	R _{eH} , MPa	344	340	407	531
	R _m , MPa	465	475	593	670
	A ₅ (%)	27,33	34,0	20,83	31,6
Serija II	Oznaka	M1-1	M1-2	M2-1	M2-2
	R _{eH} , MPa	534	612	614	763
	R _m , MPa	597	637	682	480
	A ₅ (%)	9,75	10,75	9,5	11,75

Analizirajući rezultate ispitivanja zatezanjem datih u tabeli 2., može se konstatovati da su rezultati u granicama standardom propisanih

vrijednosti za analizirane materijale. Karakter krive odgovara duktilnom materijalu.



Vrijednosti mehaničkih svojstava na uzorcima iz serije II (uzorci iz podnica nakon plastične deformacije) su iznad vrijednosti u osnovnom materijalu, tabela 4. Plastična deformacija je dovela do ojačavanja materijala i povećanja vrijednosti napona tečenja i zatezne čvrstoće. Istovremeno je uočeno smanjenje duktilnih svojstava, odnosno smanjenje izduženja materijala. Lom se, kontrolisano, dogodio u ZUT. Ovo ukazuje da se radi o „overmatching“-u odnosno da su bolja mehanička svojstva čvrstoće u ZUT nego u osnovnom materijalu.

2.3. Određivanje žilavosti loma K_{Ic}

Pogodnost primjene parametara J i δ je u mogućnosti njihove analize i poslije razvoja značajnih plastičnih deformacija, sa jedne strane, i u pogodnosti njihovog eksperimentalnog određivanja, propisanog standardima ASTM E399 [6] i ASTM E1820 [7]. Kako zahtjevi za ispunjenje uslova ravnog stanja deformacije u skladu sa jednačinom:

$$B \geq 2,5 \left(\frac{K_{Ic}}{R_T} \right)^2 \quad (1)$$



Slika 5. Epruvete za ispitivanje lomne žilavosti

Figure 5. Test samples for fracture toughness testing

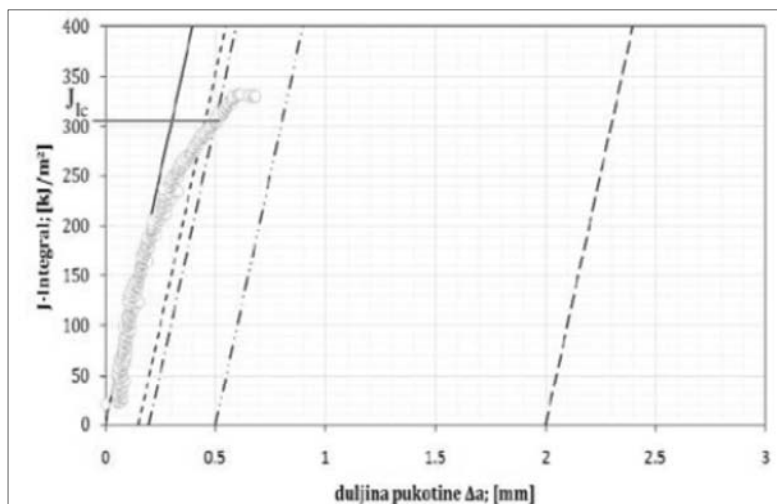
Ispitivanje je izvedeno na servo-hidrauličkom stroju INSTRON 1255 sa dinamično - statičnom mogućnošću opterećivanja do 250 kN. Epruvete su zamorene dinamičkom silom koja je s obzirom na mehanička svojstva i debljinu epruveta izračunata u skladu s standardom ASTM 1820-20, s omjerom

nisu zadovoljeni, umjesto primjene linearno-elastične mehanike loma, pristupilo se korišćenju elastoplastične mehanike loma. Cilj korišćenja elasto - plastične mehanike loma je da se vrijednost kritičnog faktora intenziteta napona, K_{Ic} , odredi posredno preko kritičnog J integrala, J_{Ic} , odnosno da se prati razvoj prsline u uslovima izražene plastičnosti.

Poznavajući vrijednosti kritičnog J_{Ic} integrala može se izračunati vrijednost kritičnog faktora intenziteta napona ili žilavost loma pri ravnoj deformaciji, K_{Ic} , pomoću zavisnosti:

$$K_{Ic} = \sqrt{\frac{J_{Ic} \cdot E}{1 - \nu^2}} \quad (2)$$

Iz svake ploče je izrađena kompaktna zatezna epruveta (ang. »Compact Tension-CT«), kako je prikazano na slici 5, istih nominalnih dimenzija širine W , visine H ali različite debljine B , s obzirom na debljinu ploče (tako da se mogla izraditi u skladu sa standardom za epruvetu sa paralelnim bočnim stranicama.



Slika 6. Određivanje parametra mehanike loma za CT epruvetu.

Figure 6. Determination of the fracture mechanics parameter for the CT sample

sila $R = F_{max}/F_{min} = 0,1$ nakon 2 mm prirasta na površini.

Za mjerenje otvaranja pukotine koristi se mjerač INSTRON-CMOD clip gauge. Ispitivanje je računarski upravljano programom INSTRON Wiewmaker i računarske jedinice INSTRON 8500+. U skladu s standardom ASTM standardima



ASTM E399 i ASTM E-1820 obrađeni su dobiveni rezultati i izrađene CTOD-R krivulje otpornosti materijala prema širenju pukotine. U skladu s standardom ASTM E-1820 korištena je metoda normalizacije za praćenje rasta pukotine. Na slici 6

prikazana je tipična krivulja za određivanje lomne žilavosti prema lomnom ponašanju za epruvetu serije I.

Kritične vrijednosti lomne žilavosti za svaku epruvetu su prikazane u tabeli 3.

Tabela 3. Vrednosti lomne žilavosti epruveta iz serije I i II

Table 3. Values of fracture toughness of test samples from series I and II

Materijal		S235JR (M1)		P460NL1 (M2)	
Debljina, mm		6	15	6	15
Promjer, mm		φ 1500			
Serija I	Oznaka	M1-2.1	M1-2.2	M2-1.1	M2-2.2
	Δa , mm	0,412	0,408	0,491	0,485
	K_{Ic} , MPa·m ^{1/2}	172,4	169,5	229,9	218,9
Serija II	Oznaka	M1-1	M1-2	M2-1	M2-2
	Δa , mm	0,401	0,325	0,454	0,460
	K_{Ic} , MPa·m ^{1/2}	166,9	118,1	206,1	196,1

Procjenu sposobnosti za rad podnice, kod postojanja pukotine u materijalu moguće je uraditi na osnovu dijagrama procjene otkaza, FAD (engl. Failure Assessment Diagram) i sile za rast prsline, CFD (engl. Crack Driving Force). Kod procjene cjelovitosti pomoću FAD pristupa potrebno je za ispitivani materijal podnice odrediti vrijednosti kritičnog koeficijenta intenziteta naprezanja K_{Ic} . Da bi se dobio potpuniji uvid u postojanje veze između dobijenih rezultata ispitivanja tvrdoće zavarenog spoja i kritičnog koeficijenta intenziteta naprezanja provedena je obrada podataka za dobijene

vrijednosti napona tečenja ReH , debljine i prečnika podnica primjenom softverskog paketa MATLAB 7.0 [8].

Na osnovu eksperimentalno određenih vrijednosti tvrdoće u zoni uticaja topline-ZUT-u na uzorcima iz podnica poslije zavarivanja, tabela 4 [2], izračunati su koeficijenti regresione jednačine, primijenjena je *stepwise* procedura sa ciljem utvrđivanja signifikantnosti uticajnih faktora i njihovih interakcija i dobiven je matematički model (izraz) sa 3 člana:

$$K_{Ic} = 76,6658 + 0,130034 \cdot T + 6,56163 \cdot t - 0,0864 \cdot D - 0,04823 \cdot T \cdot t + 0,0002356 \cdot T \cdot D + 0,00225 \cdot t \cdot D \quad (3)$$

Tabela 4. Poređenje eksperimentalnih i modelskih vrijednosti žilavosti loma [2]

Table 4. Comparison of experimental and model values of fracture toughness [2]

Tvrdoća	t	D	K_{Ic} exp	K_{Ic} mod	odstup.
HV	mm	mm	MPa·mm ^{1/2}	MPa·mm ^{1/2}	%
211.8	15	1500	45.4	45.274	-0.278
276.7	6	1500	60.1	60.354	0.42
306.8	15	3000	52.2	51.914	-0.55
223.1	10	2250	41.1	38.156	-7.16
156.4	6	1500	34.1	37.009	8.53
171.0	15	3000	33.7	36.517	8.36
250.2	15	1500	32.9	36.057	9.59
249.3	6	3000	30.6	32.763	7.07
202.3	10	2250	42.9	43.457	1.30



Na osnovu predstavljenih karakteristika modela, to jest njihovih odstupanja od eksperimentalnih rezultata koji su se koristili za njihovo izvođenje vidi se da je apsolutno odstupanje modela za sve tačke ispod 10%. Na osnovu ovoga može se zaključiti da

izvedeni model zadovoljavajuće predstavlja rezultate istraživanja uticaja tvrdoće HV , debljine t i prečnika D rundele na faktor intenziteta napona, K_{Ic} . U tabeli 5. date su statističke karakteristike datog modela (3).

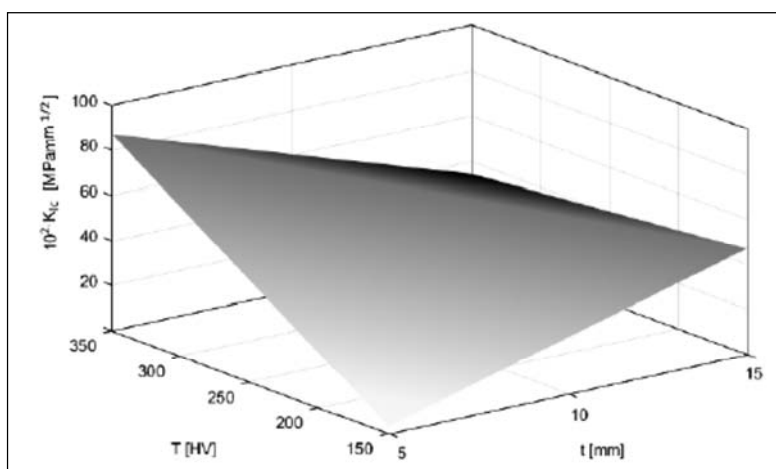
Tabela 5. Statističke karakteristike faktora intenziteta napona, K_{Ic}

Table 5. Statistical characteristics of the fracture toughness intensity factor, K_{Ic}

R^2	S_{ey}	$SS_{reg.}$	$SS_{rez.}$	F_M	$F_{ITab.}$	Signif.
0,852	10,81	6 734,37	116,863	19,81	19,33	DA

Adekvatnost modela (2.3) izvršena je prema kriteriju Fishera, gdje je za stepene slobode $df_{reg} = 6$, $df_{rez.} = 2$ i prag značajnosti $\alpha = 0,05$ tablična, odnosno kritična vrijednost $F_{(6,2,0.05)} = 19,33$ [9]. Kako je računaska vrijednost $F_{1M}=19,81 > F_{1Tab.}=19,33$, matematski model za faktor intenziteta napona, K_{Ic} je adekvatan. Dakle, postavljeni matematski model kojim se uspostavlja veza između glavnih konstrukcionih elemenata podnice D , t i tvrdoće HV , zadovoljava kako u pogledu adekvatnosti modela, tako i u pogledu njene tačnosti.

Naknadnom analizom je tražena funkcionalna zavisnost rezultata faktora intenziteta napona, K_{Ic} sa osnovnim konstrukcionim parametrima (HV , D i t). Budući da se površine regresije (opisane izrazom 3) ne mogu predstaviti u trodimenzionalnom prostoru, regresione varijable su zamjenjene njihovim prosječnim vrijednostima. Prikazi 3D modela za različite vrijednosti promjenljivih varijabli u posmatranom intervalu dati su na slici 6., za srednja stanja treće komponente.



Slika 6. Prikaz funkcionalne zavisnosti faktora intenziteta napona od vrijednosti tvrdoće i t

Figure 6. Presentation of the functional dependence of the stress intensity factor of the hardness value and t

3. Zaključak

U radu su analizirani različiti uticajni parametri (materijali, debljine i promjer podnica) na mehanička svojstva, R_{eH} i R_m , i žilavost loma K_{Ic} . Za ove uticajne parametre se iskustveno pretpostavlja da su ključni tehnološki parametri za izradu sfernih podnica posuda pod pritiskom zavarivanjem iz više segmenata. Uticaj zavarenog spoja posmatran je bez geometrijske nepravilnosti odnosno sa pretpostavkom da nema neprihvatljivih nedostataka.

3. Conclusion

In the paper, various influential parameters (materials, thicknesses and diameter of head shells) on mechanical properties, R_{eH} and R_m , and fracture toughness K_{Ic} were analyzed. For these influential parameters, it is empirically assumed that they are the key technological parameters for the production of spherical pressure vessel head shells by welding from several segments. The effect of the welded joint was observed without geometric irregularity, with the assumption that there are no unacceptable defects.



Rezultati ispitivanja zatezanjem su u granicama standardom propisanih vrijednosti za analizirane materijale. Vrijednosti mehaničkih svojstava na uzorcima iz serije II (uzorci iz podnica nakon plastične deformacije) su iznad vrijednosti u osnovnom materijalu. Plastična deformacija je dovela do ojačavanja materijala i povećanja vrijednosti napona tečenja i zatezne čvrstoće. Istovremeno je uočeno smanjenje duktilnih svojstava, odnosno smanjenje izduženja materijala. Lom se, kontrolisano, dogodio u ZUT-u. Ovo ukazuje da su bolja mehanička svojstva čvrstoće u ZUT-u nego u osnovnom materijalu.

Ispitivanjem žilavosti loma, K_{Ic} , može se zaključiti da je lomna žilavost u ZUT-u serije II snižena u odnosu na seriju I. Efekat ojačavanja uslijed plastične deformacije je uzrok sniženju lomne žilavosti.

Podnice izrađene postupkom inkrementalne deformacije zavarenih polaznih komada kao integralnog dijela zatvorenih posuda pod pritiskom su zadovoljile zahtjeve standarda kojima se definišu posude pod pritiskom i kojima se garantuje sigurnost ovih odgovornih konstrukcija.

Statističkom obradom eksperimentalnih rezultata moguće je dobiti funkcionalna zavisnost rezultata faktora intenziteta napona, K_{Ic} , kao bitnog parametra u procjeni integriteta podnica izrađenih postupkom inkrementalne deformacije i zavarivanjem sa osnovnim konstrukcionim parametrima podnica (HV, D i t),

Za daljnju eksploataciju ispitanih podnica mjerodavni su rezultati ispitivanja u ZUT, s obzirom da su izmjerene vrijednosti u ZUT ispod vrijednosti izmjerenih u osnovnom materijalu polaznih uzoraka.

Literatura / References

[1] prEN 13445-3:2002, (2002): "Unfired Pressure Vessels", European Committee for Standardization, Brussels

[2] Ištvančić Z. (2022): "Prilog utvrđivanju integriteta cilindričnih danaca izrađenih postupkom inkrementalne deformacije", doktorska disertacija, Mašinski fakultet Univerziteta u Zenici, Zenica

[3] BAS EN ISO 6507-1:2018 (2018): Metallic materials, Vickers hardness test, Part 1: Test method

[4] BAS EN ISO 6892-1:2017 B (2017): Metallic materials Tensile testing Part 1: Method of test at room temperature

The results of the tensile test are within the limits of the values prescribed by the standard for the analyzed materials. The values of mechanical properties on samples from series II (samples from head shells after plastic deformation) are above the values in the base material. The plastic deformation led to the strengthening of the material and an increase in the value of yield stress and tensile strength. At the same time, a decrease in ductile properties, as a decrease in the elongation of the material, was observed. The fracture took place in a controlled manner in HAZ. This indicates that the mechanical strength properties are better in HAZ than in the base material.

By examining the fracture toughness, K_{Ic} , it can be concluded that the fracture toughness in HAZ of series II is reduced compared to series I. The effect of strengthening due to plastic deformation is the cause of the reduction in fracture toughness.

Head shells made by the process of incremental deformation of welded starting pieces as an integral part of closed pressure vessels have met the requirements of the standards defining pressure vessels and guaranteeing the safety of these responsible constructions.

By the statistical processing of the experimental results, it is possible to obtain the functional dependence of the results of the stress intensity factor, K_{Ic} , as an important parameter in assessing the integrity of head shells made by the process of incremental deformation and welding with the basic design parameters of head shells (HV, D and t).

For the further exploitation of the tested head shells, the test results in the HAZ are relevant, given that the values measured in the HAZ are below the values measured in the base material of the starting samples.

[5] BAS EN ISO 4136 (2014): Destructive tests on welds in metallic materials - Transverse tensile test

[6] ASTM E 399-95 (1995): Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials, Philadelphia, USA

[7] ASTM E 1820-99a (1999): Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness

[8] Lazić D., V., Ristanović M., R. (2005): "Uvod u Matlab", Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd

[9] Ekinović, S. (2008): "Metode statističke analize u Microsoft EXCEL-u", Mašinski fakultet u Zenici, Univerzitet u Zenici, Zenica, 233



Tihomir Marsenić^{1,a}, Marko Župan¹, Božo Despotović², Ivan Samardžić³, Dejan Marić³

BITNE VARIJABLE ZA NAVARIVANJE PREGRIJAČA KOJI SE KORISTE U „RECOVERY“ KOTLOVIMA

ESSENTIAL VARIABLES FOR OVERLAY WELDING OF SUPERHEATER USED IN RECOVERY BOILERS

Stručni rad / Professional paper

Rad primljen / Paper received:

Novembar 2023.

Rad prihvaćen / Paper accepted:

Februar 2024.

Ključne reči: navareni sloj, bitne varijable navarivanja, zahtjevi za navareni sloj.

Rezime

U radu su opisane bitne varijable koje se odnose na navarivanje i zahtjevi za kvalitetu navarenog sloja na komponentama pregrijača u „Recovery“ kotlovima. Navedeni su rezultati ispitivanja navarenog sloja na proizvodnom ispitnom uzorku navarenom u tvornici Andritz TEP.

1. Uvod

„Recovery“ kotlovi su sastavni dio Kraft postrojenja koje se primjenjuje za proizvodnju papira. Pomoću njih se proizvodi električna energija potrebna za održavanje proizvodnje papira i para koja se koristi za zagrijavanje sječke u procesu kuhanja, zatim za pripremu goriva „black liquore“ – crne tekućine kojem je potrebno smanjiti udjel tekućine u odnosu na krutninu i za ispuhavanje [1]. Pregrijački sustavi su sastavni dio „Recovery“ kotla

Author's address / Adresa autora:

¹ Andritz TEP., Slavonski Brod, Hrvatska

² Društvo za tehniku zavarivanja Slavonski Brod, Slavonski Brod, Hrvatska

³ Strojarski Fakultet u Slavanskom Brodu, Slavonski Brod, Hrvatska

email: ^a tihomir.marsenic@ddtep.hr

Keywords: overlay deposited by welding, essential variables of overlay welding, requirements for overlay deposit

Abstract

The paper describes the important variables relates to overlay welding and requirements for the quality of the overlay deposits on superheater components in Recovery boilers. The results of testing of the overlay deposits on the production test sample welded at the Andritz TEP factory are given.

u kojem se proizvodi para zahtijevane temperature i tlaka. Zbog sastava i agresivnosti dimnih plinova, načina strujanja, lokacije pregrijača u kotlu u gornjem dijelu ložišta ili na izlazu iz ložišta, pregrijači se izrađuju od čelika namjenjeni za rad na visokim temperaturama. Da bi se postigla njihova korozivna postojanost često se navaruju, djelomično ili u potpunosti, ovisno o uvjetima eksploatacije navedenim gore.

Rad je u originalnom obliku objavljen u Zborniku radova sa Međunarodnog naučnog i stručnog skupa: Zavarivanje spaja – „Zavarivanje i zavarene konstrukcije 2023“ održanog u Sarajevu, BiH, od 25. do 27. oktobra 2023. godine.



2. Zahtjevi za navarivanje pregrijačkih komponenti

Prije ugovaranja izrade pregrijača u skladu s normom EN ISO 3834 – 2, inženjer zavarivanja je pregledao zahtjeve za izradu i zavarivanje. Tijekom pregleda uočene su specifičnosti koje se odnose na postupak navarivanja. Premda ANDRITZ Termoenergetska postrojenje D.O.O. (ATEP) ima dugogodišnje iskustvo na području navarivanja, pojedini zahtjevi su bili vrlo strogi. Uprava ATEP-a je bila upoznata s ovim zahtjevima i s predloženim aktivnostima neophodnim za ispunjavanje ovih zahtjeva.

Pod navarivanjem podrazumjevamo nanošenje materijala određenih karakteristika na osnovni materijal zavarivanjem kako bi se osnovnom materijalu poboljšale određene karakteristike, odnosno kako bi tako izrađene komponente u eksploataciji imale dug životni vijek. Kvalifikacija navarivanja, odnosno osnovni uvjeti za izvođenje navarivanja na ispitnom uzorku i područje kvalifikacije su specificirani normom EN ISO 15614-7.

Kako su pregrijači u „Recovery“ kotlovima vrlo bitne komponente i podložni su štetnim utjecajima produkata izgaranja – dimnih plinova, zatim visokom unutarnjem tlaku i temperaturi, kupac je specificirao dodatne zahtjeve za navarivanje, odnosno navareni sloj. Prije svega zahtjevi za navarivanje cijevi podjeljeni su u dvije kategorije. Prva kategorija se odnosi na provjerene dobavljače s visokom i stabilnom kvalitetom proizvoda, dok se kategorija 2 odnosi na nove dobavljače, gdje je svrstan i ATEP.

Osim toga traži se da dobavljač ima certificiran sustav kvalitete prema ISO 9001 i da minimalno ispunjava zahtjeve za kvalitetom izvođenja zavarivačkih radova sukladno normi EN ISO 3834-3.

Po pitanju zavarivačke dokumentacije WPS i pripadajući WPQR trebaju biti odobreni od strane kupca uključujući certificate zavarivača i operatera. Prihvatljivost postupka navarivanja treba se dokazati primjenom sljedećih ispitivanja;

- Vizualna kontrola (VT) navarenog sloja se provodi u skladu sa zahtjevima norme EN ISO 17637 i kriterijima prihvatljivosti prema EN ISO 5817, nivo B. Navareni sloj treba biti bez pukotina, poroznosti i sa blagim prijelazima između gusjenica. Postupak navarivanja treba biti stabilan što znači da se ne smije prekidati, odnosno može biti prekinut nakon 4 m podužno navarene cijevi. Sve ispod te dužine navarivanja postupak

navarivanja smatra se nestabilnim i mjesta prekida trebaju biti dodatno ispitana.

- Definirana debljina navarenog sloja iznosi od 1,5 do 2,1 mm. Na temelju debljine navarenog sloja vanjski promjer navarene cijevi treba se kretati u području od 60 do 61,2 mm.

- Penetrantska kontrola (PT) u opsegu 100 % u skladu s normom EN ISO 3452-1, a kriterij prihvatljivosti ne dopuštaju linearne indikacije, niti okrugle indikacije veće od 2 mm.

- Ultrazvučna kontrola u skladu s EN ISO 17640, twin probe min. 5 MHz da se otkriju greške vezivanja između osnovnog materijala i navara, maksimalna dopuštena veličina greške 3 x 3 mm.

- IRIS (Internal rotary inspection system) je ultrazvučna metoda kojom trebaju biti ispitane navarene cijevi, odnosno uzorci ispitani 100 %. Kriteriji prihvatljivosti su isti kao i za ultrazvučnu metodu.

- Hemijski sastav navarenog sloja potrebno je ispitati na površini navarenog sloja i poprečnom presjeku navarene palice i to na četiri mjesta; na vanjskoj površini navara, dva mjerenja između linije staljivanja i vanjske površine, zatim blizu linije staljivanja. Ova mjerenja se trebaju izvesti primjenom SEM/EDS tehnike. To je kombinirana tehnika koja primjenjuje SEM (Scanning electron microscope) i EDS (Energy-dispersive X-ray spectroscopy) za analizu materijala. Hemijski sastav navara na površini uključujući bitne elemente 309L žice za navarivanje, može odstupati samo 10% u odnosu na nominlani sastav dodatnog materijala.

- Makroskopsko ispitivanje uključujući tvrdoću navarenog spoja se mjeri u skladu s normom EN ISO 15614-7, s tim da je prema kupčevoj specifikaciji dopuštena max. razlika 30 HV između osnovnog materijala (OM) i zone utjecaja topline (ZUT). Tvrdoća za navareni sloj treba odgovarati tvrdoći tipičnoj za tu kvalitetu dodatnog materijala.

- Penetracija dodatnog materijala u osnovni materijal se mjeri na poprečnoj palici i uspoređuje se s dijelom cijevi koja nije navarena. Dopuštena maksimalna vrijednost penetracije iznosi 0,5 mm.

- Sadržaj ferita se određuje iz mikrostrukture navarenog sloja i treba biti u skladu sa dodatnim materijalom koji se navaruje.



3. Podaci o osnovnom i dodatnom materijalu

Cijevi pregrijača izrađene su od niskolegiranog čelika kvalitete 10CrMo910. Cijevi su izrađene u

skladu s normom EN 10216-2. Dimenzije cijevi pregrijača su $\varnothing 57 \times 6,3$ mm. U Tabeli 1 prikazan je hemijski sastav cijevi iz certifikata, šarža 790663.

Tabela 1. Hemijski sastav cijevi (mas. %) 10CrMo910

Table 1. Chemical composition of pipes (mass. %) 10CrMo910

C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	Fe
0,11	0,41	0,22	0,11	2,35	1,03	ostatak
Cu	P	S	Sn	Al	N	
0,14	0,01	0,002	0,009	0,013	0,0096	

Ova kvaliteta cijevi upotrebljava se u eksploataciji maksimalno do temperature 600°C, premda najčešće u području od 500 do 550 °C i ima dobru otpornost na puzanje. Izmjerena zatezna čvrstoća za ovu cijev iznosi 536 MPa što je u skladu s normom, dok zatezna čvrstoća na povišenoj temperature od 500 °C iznosi 403 MPa.

Dodatni materijal za zavarivanje je odabran prema zahtjevima projektanta, nosi prepoznatljivu

oznaku 309 L. To je visokolegirana čelična žica klasifikacijske oznake EN ISO 14343-A: W/G 23 12 L. Na temelju probnog navarivanja i preporuka proizvođača odabrana je legura 309 L posebno preporučena za navarivanje. Postoji više verzija 309 L dodatnog materijala; 309 LMo, 309 LNb, 309 LSi, 309 Si. U Tabeli 2. je prikazan hemijski sastav dodatnog materijala naveden u certifikatu dodatnog materijala.

Tabela 2. Hemijski sastav dodatnog materijala (mas. %) G 23 12 L

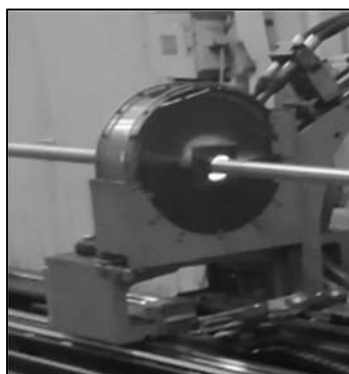
Table 2. Chemical composition of filler material (mass. %) G 23 12 L

C	Si	Mn	P	S	Cr	Fe
0,009	0,34	1,78	0,011	0,001	23,67	ostatak
Ni	Mo	Nb	Cu	Ti	V	
13,39	0,05	0,02	0,02	0,005	0,042	

Sadržaj ferita u metalu zavara iz certifikata FN WRC -92 iznosio je 13,7 %.

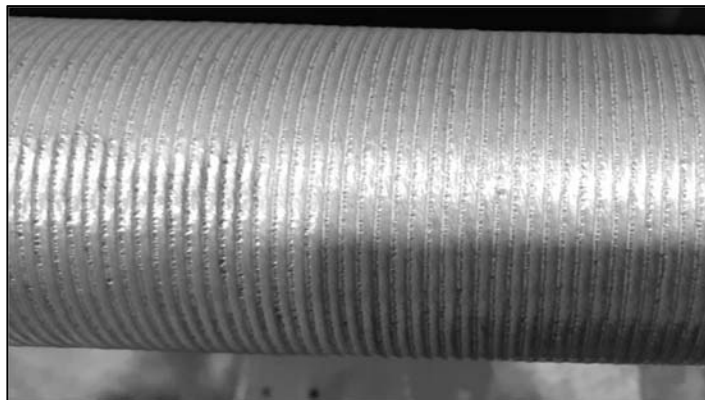
4. Postupak navarivanja pojedinačnih cijevi

Za navarivanje je odabran potpuno mehanizirani postupak navarivanja pojedinačnih cijevi. Navarivanje je provedeno na stroju R350, koji je konstruiran od stručnog osoblja ATEP iz odjela za razvoj, slika 1.

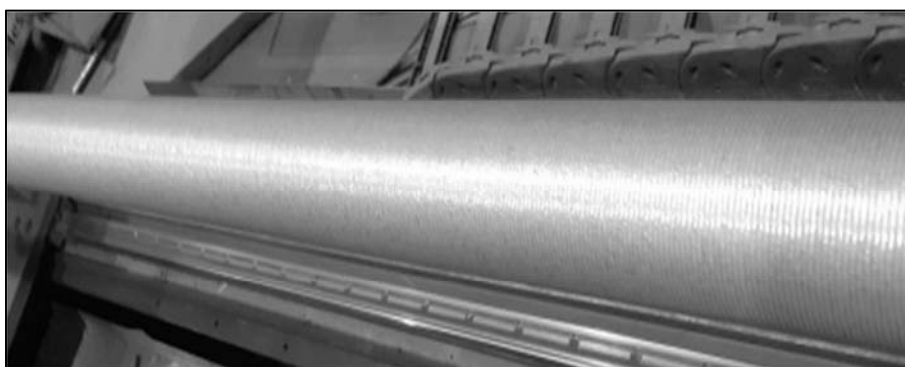


Slika 1. Navarivanje cijevi na stroju R350

Figure 1. Overlay welding of pipe on the R350 machine



Slika 2. Izgled navarene cijevi primjenom 309 L dodatnog materijala
Figure 2. Appearance of a overlay welded pipe using 309 L filler material



Slika 3. Navarena cijev u dužinu 4 m bez prekida i nepravilnosti
Figure 3. Overlay deposited pipe by welding in a length of 4 m without discontinuities and irregularities

Na stroju je instalirana posebno odabrana oprema za navarivanje. Na odabir opreme najviše su utjecali sljedeći zahtjevi iz kupčeve specifikacije;

- maksimalna penetracija u osnovni materijal 0,5 mm,

- zahtjevani hemijski sastav na površini navarenog sloja, maksimalni gubitak elementata na površini u odnosu na nominalan sastav dodatnog materijala iznosi 10 %.

Bitne varijable navarivanja su specificirane ispod:

- postupak navarivanja,
- priprema površine cijevi za navarivanje izvodi se sačmarenjem, na površini cijevi ne smije biti oksida niti masnoća,
- unos topline utječe na oblik navara i penetraciju,
- brzina navarivanja, oscilacija i posmak gorionika,
- struja navarivanja, polaritet,
- napon navarivanja,

- položaj gorionika i slobodan kraj žice, utječu na oblik navara i penetraciju,

- dodatni materijal za navarivanje je naveden iznad,

- zaštitni plin.

5. Rezultati ispitivanja

VT, PT ispitivanja, zatim kontrola dimenzije promjera navarene cijevi su provedena u ATEP-u, dok su ostala ispitivanja provedena u laboratorijima ĐĐ CIR, Istarskom veleučilištu i Inštitutu za kovinske materijale in tehnologije.

Vizualna kontrola je provedena na navarenoj cijevi. Na navarenoj cijevi nisu uočene greške tipa poroznosti, nepravilne geometrije, prskotina i uključaka, slika 2. Navarena površina je ravnomjerna bez grubih prijelaza.

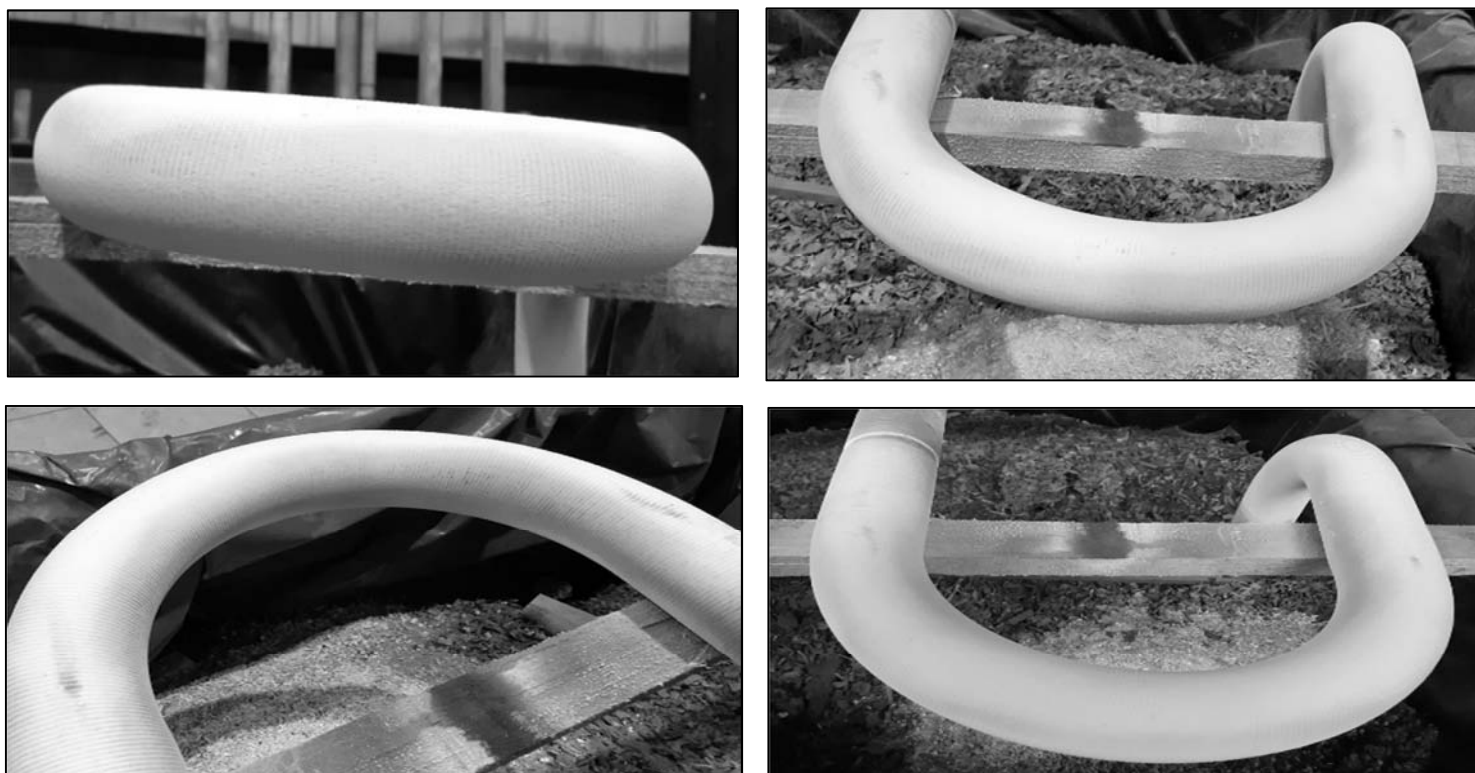
Nije bilo prekida navarenog sloja na dužini od 4 m što upućuje da se radi o stabilnom procesu navarivanja, čija definicija je navedena u kupčevoj specifikaciji, slika 3.



Dimenzionalna kontrola navarene cijevi podrazumjeva mjerenje promjera navarene cijevi. Na temelju promjera može se izračunati debljina navarenog sloja u odnosu na površinu stijenke cijevi. Mjerenje promjera izvedeno je pomičnim mjerilom, a vrijednosti su se kretale od 60,5 do 60,9 mm. Na osnovu izmjerenog promjera izračunata je debljina navarenog sloja, a iznosila je od 1,75 do 1,95 mm. Također provjerena je debljina navarenog sloja na makro presjeku, a izmjerene vrijednosti su od 1,97 do 2,1 mm što odgovara zahtjevima

specifikacije iako je u pojedinim područjima debljina navarenog sloja maksimalno dopuštena.

Penetrantska kontrola navarene cijevi je provedena nakon navarivanja i savijanja navarene cijevi. Radijus savijanja je 150 mm približno radijusu navedenom na crtežu. Prije savijanja nije provedena toplinska obrada nakon zavarivanja (PWHT). Rezultati penetranskog ispitivanja su prihvatljivi, što je prikazano na slici 4.



Slika 4. Savijena cijev nakon navarivanja ispitana PT. Rezultati ispitivanja su prihvatljivi

Figure 4. Banded pipe after overlay deposited by welding tested by PT. The test results are acceptable.

Osim savijanja navarene cijevi, provedeno je i savijanje palica [2]. Ultrazvučna kontrola je provedena na manjoj površini i nisu otkrivena odstupanja vezivanja. IRIS metoda nije provedena jer nije bilo moguće organizirati takvo ispitivanje, odnosno nije pronađen laboratorij s takvom opremom.

Hemijski sastav navarenog sloja je provjeren na površini i poprečnom presjeku. Na površini navara je izmjeren spektroanalizatorom od strane ATEP-a. U Tabeli 3. su prikazane izmjerene vrijednosti. Uglavnom ovom metodom se određuju glavni legirni elementi u navarenom sloju dok sadržaj ugljika nije moguće izmjeriti.

Tabela 3. Hemijski sastav navara na površini navarenog sloja (mas. %)

Table 3. Chemical composition of weld metal from the surface of the overly welded layer (mass. %)

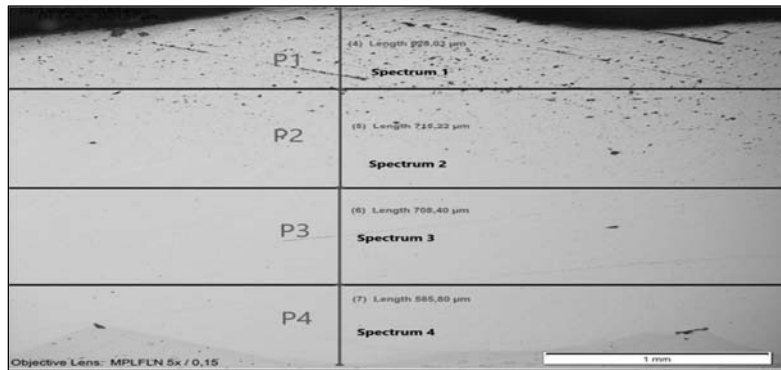
Cr	Mn	Ni	Mo	Fe
22,40	1,92	12,15	0,11	63,02

U laboratoriju Istarskog veleučilišta EDS metodom uz primjenu SEM tehnike izmjerene su vrijednosti kemijskog sastava navara, Tabela 4. na

lokacijama P1, P2, P3 i P4 : poprečno na navareni sloj; na površini navara, uz liniju staljivanja i dva mjesta jednako raspoređena između površine



navara i linije staljivanja, slika 5. Na svakoj lokaciji su provedena četiri mjerenja.



Slika 5. Navareni sloj, lokacije mjerenje kemijskog sastava na poprečnom presjeku navara

Figure 5. Overlay welded layer, locations, measurement of chemical composition on the cross-section of welds

U Tabeli 4. su prikazani rezultati mjerenja. Na temelju mjerenja može se zaključiti da nije došlo do gubitka glavnih legiranih elementata ispod 10 % na poprečnom presjeku navarenog sloja, odnosno sadržaj Cr i Ni je približno jednak po čitavom

presjeku navara, što upućuje da navareni sloj ima približno jednaka svojstva po čitavom presjeku. Ova metoda nije relevantna za mjerenje sadržaja ugljika, ali rezultati su zabilježeni.

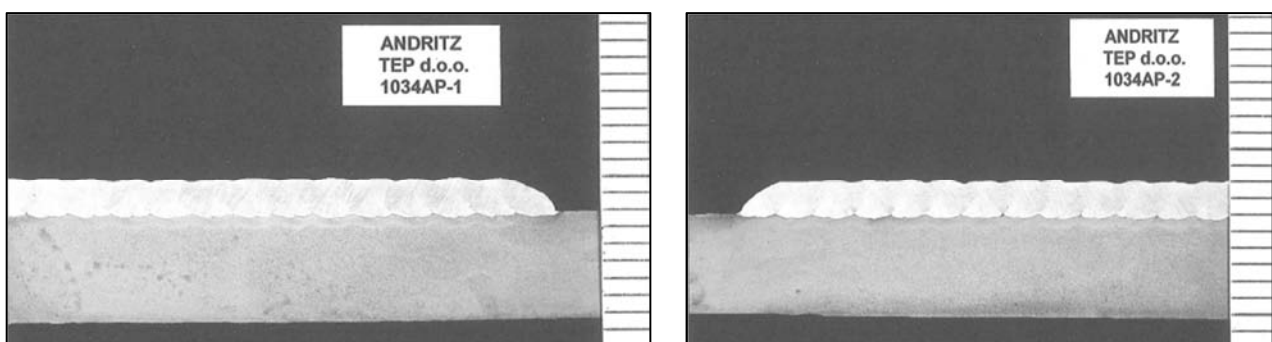
Tabela 4. Prosječni hemijski sastav navara na poprečnom presjeku navarenog sloja (mas. %), odnosno na lokacijama mjerenja [3]

Table 4. Average chemical composition of overlayed welds from the cross-section of the welded layer (mass. %), i.e. at the measurement locations [3]

Lokacija mjerenja	C	Si	Cr	Mn	Fe	Ni
P1	1,05	1,05	22,77	1,87	61,25	12,0
P2	0,94	0,93	22,81	1,89	61,36	12,07
P3	0,70	0,71	22,93	1,93	61,62	12,11
P4	0,64	0,53	22,64	1,90	62,23	12,05

Makroskopskim ispitivanjem utvrđeno je da navar ne sadrži nikakve anomalije, odnosno nema grešaka vezivanja, poroznosti i pukotina, slika 6.

Površina navara i linije staljivanja je ravnomjerna [4].



Slika 6. Makro presjek navarenog sloja bez anomalija

Figure 6. Macro cross section of the overly welded layer without anomalies

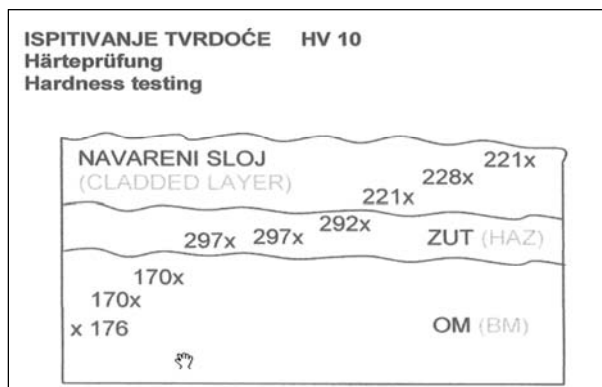
Tvrdoće navarene cijevi izmjerene su u skladu s normom EN 15614-7 gdje je specificirana maksimalna vrijednost 380 HV10. Prema VGB R 501H edicija 2002, dopuštena tvrdoća osnovnog materijala treba biti u području 140-190 HV10,

maksimalna tvrdoća u zoni utjecaja topline 320 HV10, dok maksimalna tvrdoća metala zavara 280 HV10. Na slici 7. može se vidjeti distribucija tvrdoća; na navaru 221-228 HV10 što odgovara dodatnom materijalu, u zoni utjecaja topline 292-



287 HV10 i osnovnom materijalu 170-176 HV10. Tvrdće su u skladu s zahtjevima navedenih normi i propisa, ali ne ispunjavaju zahtjev iz specifikacije kupca gdje se traži da razlika tvrdoća između zone utjecaja topline (ZUT) i osnovnog materijala (OM) bude maksimalno 30 HV. U specifikaciji nije navedena kvaliteta osnovnog materijala niti uputa

vezane za toplinsku obradu nakon navarivanja, tako da se specificirana vrijednost razlike tvrdoća između ZUT-a i OM ne može bezuvjetno primjenjivati. Ovaj zahtjev će se dodatno provjeriti jer se navarivanje radi na čeliku 10CrMo910 bainitne mikro-strukture koji je sklon povećanju tvrdoće usljed zavarivanja.



Slika 7. Distribucija tvrdoća na navarenoj cijevi [4]

Figure 7. Hardness distribution on the overlay welded pipe [4]

Penetracija navara u osnovni materijal je također ograničena i iznosi 0,5 mm. Mjerenjem u laboratoriju na dva makro uzorka utvrđene su vrijednosti [4]. Iz Tablice 5. može se vidjeti da minimalna penetracija u osnovni materijal iznosi 0,03 mm, a maksimalna 0,33 mm. Penetracija navara u OM ispunjava zahtjeve specifikacije, ali su vrijednosti penetracije vrlo male iako su te

vrijednosti karakteristične za postupak navarivanja. Malim korekcijama parametara navarivanja dodatno će se pokušati povećati penetracija za 0,1 mm kako bi se izbjegle greške vezivanja, a s druge strane ispunili zahtjevi za minimalni nepenetrirani dio stijenke cijevi koji iznosi 4,5 mm i zahtjev za hemijskim sastavom navarenog sloja.

Tabela 5. Mjerenje karakterističnih dimenzija na makro palici navarene cijevi [4]

Table 5. Measured characteristic dimensions on a macro stick of a overlay welded pipe [4]

Oznaka uzorka	1		2	
	Debljina OM (mm)		Debljina navara bez penetracije	
			Izmjereno (mm)	Zahtjev (mm)
1034AP-1	6,31		1,97-2,07	1,5-2,1
1034AP-2	6,30		1,98-2,10	
Oznaka uzorka	3		4	
	Dubina penetracije		Minimalna debljina OM bez navara	
	Izmjerno min. (mm)	Izmjereno max. (mm)	Izmjereno (mm)	Zahtjev (mm)
1034AP-1	0,05	0,26	6,13	≥4,5
1034AP-2	0,03	0,33	6,06	

Skica pripada Tabeli 5.



6. Zaključci

Zadatak navarivanja cijevi pregrijača kvalitete 10CrMo910 legurom 309 L zahtijevao je pažljiv pristup i veliku angažiranost osoblja iz Tehnike zavarivanja ATEP-a, što je uključivalo slijedeće:

- proučavanje literature, kupčevih specifikacija i tehničke dokumentacije,
- specificiranje zahtjeva za navareni spoj temeljem normi i kupčeve specifikacije,
- kupovinu osnovnog materijala za probna navarivanja uključujući pripremu uzorka,
- nabavu adekvatnog dodatnog materijala,
- određivanje primjerenog postupka navarivanja,
- instaliranje opreme za navarivanje na postojeće jedinice,
- navarivanje ispitnih uzoraka,
- ispitivanje navarenih uzoraka metodama bez razaranja,
- savijanje navarene cijevi i ispitivanje,
- organiziranje ispitivanja u nekoliko laboratorija,
- prezentiranje stanja po pitanju usvajanja navarivanja pregrijača u pogonu ATEP-a,
- prikupljanje, obrada dokumentacije i izrada kvalifikacija postupka kod ovlaštene institucije,
- definiranje normativa navarivanja.

Sve ove aktivnosti trajale su oko 2 mjeseca, s tim da je dio koji se odnosi na proizvodnju trajao samo 10 dana. Zavaren je veliki broj proba različitim varijacijama postupka navarivanja kako bi se dobila zahtjevana kvaliteta navarenog sloja. Osoblje na području zavarivanja, inženjeri, tehnolozi, poslovođe su bili pod velikim pritiskom zbog složenih zahtjeva, kratkog vremena za testiranje i usvajanje ove tehnologija navarivanja.

Na temelju rezultata ispitivanja može se zaključiti da su kupčevi zahtjevi za navareni spoj ispunjeni. Također može se potvrditi da je implementiran novi proizvodni program, navarivanje pregrijača za "Recovery" kotlove u pogonima ATEP-a. U grupaciji ANDRITZ navarivanje navedenih komponenti se provodi samo u pogonima ATEP-a, tako da se u bližoj budućnosti može očekivati povećanje opsega posla na ovom području.

6. Conclusions

The task of welding 10CrMo910 grade superheater tubes with 309 L alloy required a careful approach and great commitment from ATEP's Welding Techniques staff, which included the following;

- study of literature, customer specifications and technical documentation,
- specifying the requirements for the welded joint based on standards and the customer's specification,
- purchase of basic material for trial welding, including sample preparation,
- procurement of adequate additional material,
- determining the appropriate surfacing procedure,
- installing welding equipment on existing units,
- welding of test samples,
- examination of welded samples by non-destructive methods,
- bending of the welded pipe and testing,
- organization of tests in several laboratories,
- presenting the situation regarding the adoption of superheater welding in the ATEP plant,
- collection, processing of documentation and preparation of procedure qualifications at the authorized institution,
- definition of the norms of overlay welding.

All these activities lasted about 2 months, with the fact that the part related to production lasted only 10 days. A large number of samples were welded with different variations of the welding procedure in order to obtain the required quality of the welded layer. Welding personnel, engineers, technologists, foremen were under great pressure due to complex requirements, short time for testing and adoption of this welding technology.

Based on the test results, it can be concluded that the customer's requirements for the welded joint have been met. It can also be confirmed that a new production program has been implemented, surfacing of superheaters for "Recovery" boilers in ATEP plants. In the ANDRITZ group, welding of the mentioned components is carried out only in the ATEP plants, so in the near future an increase in the volume of work in this area can be expected.



Literatura / References

[1] Esa K. Vakkilainen,(2006), "Kraft recovery boilers – high solids firing aslov dijela, rada", 2/2006

[2] ĐURO ĐAKOVIĆ CENTAR ZA ISTRAŽIVANJE I RAZVOJ d.o.o., (2023), "Izvještaj o mehaničkim svojstvima M-143/23", ĐĐCIR

[3] Istarsko veleučilište, Universita Istriana di scienze applicat, Test report No.: 2023/56", 2023

[4] ĐURO ĐAKOVIĆ CENTAR ZA ISTRAŽIVANJE I RAZVOJ d.o.o., (2003), "Izvješće o ispitivanju MG-148/23", ĐĐCIR



SIGMA LAB

Ispitivanje Tvrdće Materijala & Zavarenih Spojeva

U zavisnosti od oblika i kvaliteta materijala predmeta ispitivanja za merenja tvrdće Sigma Lab koristi više metoda:

- > Brinel
- > Vickers
- > Rokvel
- > Ispitivanje prenosivim uređajem (HL, HB, HV, HRC)



www.sigmalab.rs



71. GODIŠNJA SKUPŠTINA DRUŠTVA ZA UNAPREĐIVANJE ZAVARIVANJA U SRBIJI Beograd, 26.06.2024.

Dana 26. juna 2024. godine, u svečanoj sali Instituta IMS u Beogradu, održana je redovna 71. godišnja skupština DUZS - Društva za unapređivanje zavarivanja u Srbiji sa sledećim dnevnim redom:

1. Otvaranje zasedanja Skupštine; izbor radnih tela
2. Verifikacija mandata članova Skupštine
3. Izveštaj o radu DUZS za period 2023 - 2024. godine. Podnosilac izveštaja: predsednik DUZS
4. Izveštaj o radu DUZS-CertPers za period 2023 - 2024. godine. Podnosilac izveštaja: izvršni rukovodilac DUZS-CertPers
5. Izveštaj o finansijskom poslovanju u 2023. godini. Podnosilac izveštaja: predsednik Nadzornog odbora
6. Diskusija po podnetim izveštajima i usvajanje izveštaja
7. Predlog plana rada za 2024 - 2025. godinu; diskusija i usvajanje
8. Razno

Sa 39 glasova ostvaren je kvorum za punovažan rad i odlučivanje Skupštine.

U okviru izveštaja o radu, između ostalog prezentovano je i poslovanje časopisa „Zavarivanje i zavarene konstrukcije“ i konstatovano da su tokom 2023. g. na vreme izašla sva četiri broja časopisa u ukupnom obimu od 192 strane. Status časopisa za 2023. godinu je M-52 Istaknuti nacionalni časopis. Takođe, bilo je reči i o nacionalnom i međunarodnom takmičenju mladih zavarivača u kojima je učestvovao DUZS, o čemu ste mogli da pročitate više u prethodnim brojevima časopisa (4/2023 i 2/2024).

Što se tiče DUZS-CertPers-a, napomenuto je da je 2023. godine započelo 7 međunarodnih kurseva u svih 5 ATB centara. Od ove godine, pored ATB Zavoda za zavarivanje i ATB Instituta GOŠA, i ATB MFNiš ima u svom obimu kurs za međunarodne inspektore zavarivanja.

Na predlog UO DUZS, jednoglasnom odlukom Skupštine, povećana je cena članarine sa 3.500 na 5.000 dinara na godišnjem nivou, pa će od 2025. godine iznos članarine biti veći s obzirom da članarina nije menjana od 2011. godine.

Izveštaji o radu DUZS i DUZS-CertPers, izveštaj o finansijskom poslovanju, planovi rada, kao i predlog o visini članarine usvojeni su jednoglasno.





Mića Đorđević ^{1,a}, Dragan Đorđević ^{1,a}, Vladimir Đorđević ^{1,a}, Nenad Gačić ²

IZRADA REAKTORA ZA PROIZVODNJU HLOR-DIOKSIDA OD DVSLOJNIH PLOČA TITAN - ČELIK

MANUFACTURE OF THE REACTOR FOR CHLORINE-DIOXIDE PRODUCTION FROM DOUBLE-LAYER TITANIUM-STEEL PLATES

Stručni rad / Professional paper

Rad primljen / Paper received:

Novembar 2023.

Rad prihvaćen / Paper accepted:

Mart 2024.

Ključne reči: titan, eksplozija, plakatura Č/Ti, zavarivanje plakature Č/Ti, termička obrada plakature.

Rezime

Titan ima najširu primenu od svih reaktivnih metala. Osnovne osobine titana su: dobra otpornost na koroziju i odličan odnos težine i čvrstoće. Primenjuje se u: hemijskoj industriji, avijaciji, raketnoj tehnologiji, medicini itd. Razvojem metalurgije dobijanja titana njegova cena je postala znatno pristupačnija, ali je i dalje visoka, pa je reparatura zavarivanjem zastupljena gde god je to moguće. Zavarivanje je u znatnoj meri zastupljeno i pri izradi mašinskih delova. U ovom radu dat je detaljan postupak izrade reaktorske posude za dobijanje hlora-dioksida (ClO_2) u hemijskoj industriji CELULOZA – Viskoza. Reaktor je izrađen od dvoslojnog kompozita titan-čelik. Prikazan je način izrade kompozita eksplozijom i princip zavarivanja (spajanje elemenata). Pre početka izrade reaktora izvršene su probe spajanja čelika i titana eksplozijom radi definisanja potrebnih parametara. Od probnog kompozita su izrezane ploče koje su ispitane ultrazvukom i penetrantima nakon čega se izvršilo probno zavarivanje koje je dalo konačan odabir parametara zavarivanja. Relaksacija kompozita od zaostalih napona izvršena je u peći bez odstranjivanja vazduha da bi se ustanovilo u kakvom stanju će biti titan posle termičke obrade.

Adresa autora / Author's address:

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

²Eniko d.o.o. Loznica, Srbija

Keywords: titanium, explosion, steel / titanium cladding, welding of steel / titanium claddings, heat treatment of cladding

Abstract

Titanium has the widest application of all reactive metals. The basic properties of titanium are good corrosion resistance and an excellent strength-to-weight ratio. It is applied in: chemical industry, aviation, rocket technology, medicine, etc. With development of metallurgy of titanium production, its price became much more accessible, but it is still very high, the welding repair is therefore applied wherever possible. Welding is also significantly used for the production of machine parts. This paper presents a detailed procedure of reactor vessel production for obtaining chlorine-dioxide (ClO_2) in the chemical industry PULP-Viskoza. The reactor is made from a titanium-clad steel plate. Explosive cladding and the principle of clad welding (bonding of elements) are described. Prior to the onset of the reactor production, the tests of titanium/steel bonding by explosive cladding were made for defining the required parameters. The plates were cut from the trial cladding, and inspected by ultrasound and penetrant testing followed by trial welding, resulting in the final selection of welding parameters. Relaxation of cladding from the residual tension was made in the furnace without air removal in order to determine the condition in which the titanium will be after heat treatment.

Rad je u originalnom obliku objavljen u Zborniku radova sa Međunarodnog naučnog i stručnog skupa: Zavarivanje spaja – „Zavarivanje i zavarene konstrukcije 2023“ održanog u Sarajevu, BiH, od 25. do 27. oktobra 2023. godine.



1. Uvod

Reaktorska posuda se sastoji od plašta sa donjom kalotom i poklopca u obliku kalote na kome je urađen tehnološki otvor za mogućnost ulaska u reaktor, a ima i zaštitno-sigurnosnu ulogu da se otvori prilikom iznenadnih eksplozija koje se povremeno javljaju pri reakciji u procesu proizvodnje. Na poklopcu i telu reaktora nalaze se razni priključci za dopremu sirovina i merni uređaji za temperaturu i pritisak. Zapremina reaktora je 5 m³. Dimenzije Ø1600x2500 mm. Hlor-dioksid se dobija od razblažene sumporne kiseline (H₂SO₄), natrijum-hlorata (NaClO) i sumpor-dioksida (SO₂). Unutar posude nalazi se raspršivač vode, spirala – cevna “zmija” od titana koja služi za stabilizaciju procesa u reaktoru.

Zbog izuzetno agresivnog medija unutrašnjost posude mora da bude od čistog titana (VT1-tehnički čist titan). Bilo je pokušaja da se titan zameni olovom (Pb), ali je ono vrlo brzo prelazilo u testasto stanje. Pokušavalo se i sa ugradnjom plastike. Plastični materijali su postajali kruti i ubrzo su se javljale pukotine i procurivanja.

Stara posuda je izrađena u Japanu i bila je u upotrebi 20 godina. Urađena je na principu uvlačenja Ti posude u čeličnu posudu, a obezbeđenje titanijumske posude od usisavanja zbog povremenog vakuuma izvršeno je

mestimičnim vezivanjem šrafova za čelični plašt. Zbog procurivanja na plaštu trebalo je da se uradi nova posuda.

Debljina čeličnog plašta je 6 mm, a titan lima 1,5 mm. Dno i poklopac imaju oblik kalote. Titanska posuda je završena u komori ispunjenoj inertnim gasom. Zbog povremenih eksplozija u toku reakcije u posudi vlada varirajući pritisak, a i vacuum (350 – 400mm Hg). U našem slučaju obezbeđenje od vakuumske usisavanja, tj. gužvanja titana ostvareno je plakiranjem čelika titanom. Plakiranje je izvršeno energijom eksplozije. Nova posuda je urađena od bimetala Čelik/Titan. Umesto kalota, dance i poklopac su izrađeni u obliku zarubljenih kupa. Izrada reaktorske posude izvršena je 1995. godine i bila je u upotrebi 5 godina, sve do raspada fabrike Celuloze (Viskoza).

1.1 Izbor osnovnog materijala

a) Čelik

Odabran je čelik kvaliteta Č.0362 (S235JO – EN10025), debljine od 7mm. Ovaj čelik je odabran zbog odgovarajućih mehaničkih osobina koje treba da zadovolje uslove prilikom izrade dvoslojnog kompozita eksplozijom. Osnovni uslov je žilavost materijala kako ne bi došlo do pojave prslina prilikom dejstva eksplozije. Dimenzije čeličnog lima bile su: 1000x7x2000 mm.

Tabela 1. Hemijski sastav čelika Č.0362 (SRPS C.BO.500)

Table 1. Chemical composition of the steel Č.0362 (SRPS C.BO.500)

Element mas. %	Cmax	Si max	Mn max	P max	S max	Fe
	0,17	0,40	0,50	0,045	0,045	ostatak

Tabela 2. Mehaničke osobine čelika Č.0362 (SRPS C.BO.500)

Table 2. Mechanical properties of steel Č.0362 (SRPS C.BO.500)

Oznaka	Granica razvlačenja	Zatezna čvrstoća	Izduženje	Savijanje	Žilavost	
C.BO.500 (JUS)	Rp (N/mm ²)za debljinu do 16mm	Rm (N/mm ²)	A ₅ , (%)	A, 180°	A _v min (j)	T (°C)
Č.0362	235	360-440	25	d = a	27	0

b) Titan

Odabir titana: Hemijska analiza titana od koje je napravljena posuda u Japanu pokazuje da se radi o titanu čistoće Ti>99%. Na tržištu je pronađen

titanski lim poreklom iz Ukrajine, dimenzija 1030 x 2 x 2040 mm čistoće 97-98% Ti. Po ruskom standard on spada u klasu VT1 – tehnički čist titan.



Tabela 3. Hemijski sastav titana

Table 3. Chemical composition of titanium

Elementi	Mo	Sn	V	Cu	Fe	Mn	Ni	Cd	Al	Pb	Ti
mas. %	0,0077	0,002	0,002	0,0043	0,072	0,0066	0,0396	0,0043	1,11	0,96	ostalo

Mehaničke i fizičke veličine titana

- specifična masa (δ) 4,5 (g/cm³)
- temperatura topljenja (T) 1668 (°C)
- zatezna čvrstoća (σ_m) 250 (N/mm²)
- granica Rp_{0,2} 140 (N/mm²)
- izduženje (A₅) 55%
- modul elastičnosti (E) 10,8x10⁴ (N/mm²)
za ugljenične čelike je duplo veći E
- koeficijent linearnog širenja (0-100°C) 8,5 (10⁻⁶K⁻¹)
za Č. 10,8x10⁻⁶
- specifična toplota (C) 523 (J/kgK)
- toplotna provodljivost (λ) za Ti 22 (W/mK)
- toplotna provodljivost (λ) za Č 50-58 (W/mK)
- brzina zvuka na 20°C 4140 (m/s)
- fazna transformacija $\beta \leftrightarrow \alpha$ 882 (°C)

1.2 Izbor dodatnog materijala

Pošto nije bilo moguće naći odgovarajuće šipke (žice) kao dodatni materijal za Ti, problem je rešen izrezivanjem uzanih traka od titanovog lima d=2mm. Širina žice bila je 2 - 3mm. Pre rezanja titan je očišćen brušenjem (uklonjena je zaštitna oksidirajuća patina). Tako izrezane šipke dužine oko 400 mm čuvane su u kartonskim kutijama. Vodilo se računa da se ne dodiruju golim rukama.

2. Izrada dvoslojnog kompozita čelik - titan

Spoj titana i čelika praktično je jedino moguće ostvariti velikim pritiskom, primenom energije eksplozije. I primenom eksplozije postoje znatni problemi. Treba uspostaviti i kontrolisati više parametara da bi se ostvario spoj bez ili sa malo tačkastih grešaka tipa titan karbida koji čine velike smetnje pri mehaničkoj obradi kompozita, naročito pri bušenju zbog velike tvrdoće Ti karbida.

2.1 Priprema lima titana i čelika za spajanje eksplozijom

Osnovno je da treba postići čistoću površina koja se ostvaruje brušenjem.

2.2 Izračunavanje parametara

Treba odrediti brzinu detonacionog talasa koja ne sme da bude veća od brzine zvuka u metalu koji se tretira eksplozivom. Za titan je potrebna brzina od 2200 m/s. Raspolagano je eksplozivom: amonex 1 čija je brzina 4100 – 4300 m/s. Zbog toga je bila potrebna flegmatizacija amonexa 1 koja je obavljena mešanjem sa kuhinjskom soli. Odnos amonexa 1 i kuhinjske soli se određuje ekperimentalno. Izvršena su merenja brzine i napravljen je dijagram po kome smo mogli da odredimo odnose amonexa 1 i kuhinjske soli za brzinu V=2200 m/s.



2.3 Postupak merenja brzine eksplozivne smeše amonexa 1 i kuhinjske soli

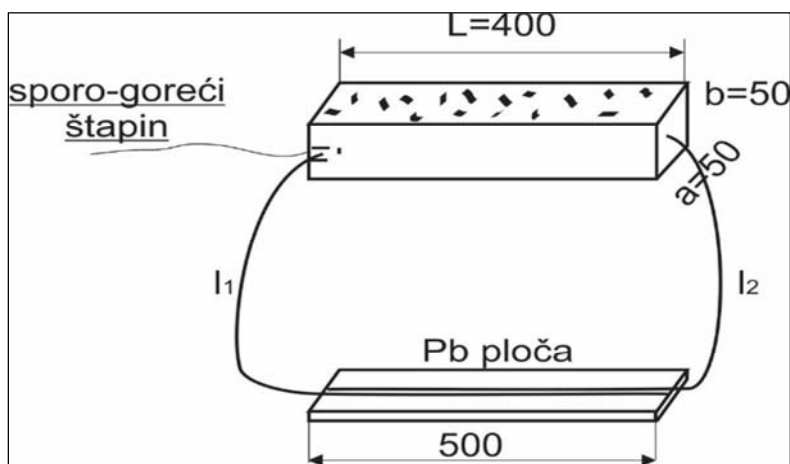
Za merenje brzine eksplozivne smeše potrebno je:

- kartonska kutija
- olovna ploča
- eksploziv
- kuhinjska so
- sporigoreći štapin i rudarska kapisla br. 8
- brzogoreći – detonirajući štapin

Prvo se napravi kutija od dasaka ili kartona, dimenzija: $L \cdot a \cdot b$. Iz praktičnih (iskustvenih) razloga naše mere su bile: 400 x 50 x 50 mm. Izmeša se amonex 1 i kuhinjska so: 950 gr amonex 1 (toliko je pakovanje) i 900 gr NaCl (51,35% amonex 1 i 48,65% NaCl). Pretpostavka je da će tražena brzina eksplozivne smeše biti $V_x = 1700-1800$ m/s. Ako ta pretpostavka nije tačna, onda neće doći do sudara eksplozije detonirajućih štapina na olovnoj ploči i ceo eksperiment mora da se ponovi. Brzina detonirajućeg štapina, prema deklaraciji bila je 7000 m/s. Karakteristike primenjenog amonexa 1 su sledeće:

- gustina	1,05-1,10 (kg/dm ³)
- brzina detonacije	4100-4300 (m/s)
- gasna zapremina	.955 (l/kg)
- radna sposobnost, proba po trauzl-u (ne bi trebalo da je manja od 300 cm ³)	380 -390 (cm ³)

Sa skice se vidi da su u kutiji dužine L pobodeni detonirajući štapini dužine l_1 i l_2 . Oni su zalepljeni (selotejpom) za olovnu ploču jedan uz drugoga. Dimenzija olovne ploče je 500 x 5 x 100 mm. Na levoj strani kutije postavljena je rudarska kapisla br. 8 povezana sa sporigorećim štapinom.



Slika 1. Šema postavljanja eksploziva za merenje brzine eksplozije

Figure 1. Scheme of installation for explosives measuring of the explosion speed

Detoniranje rudarske kapisle br. 8 inicira eksploziju smeše u kutiji i istovremeno se inicira eksplozija u detonirajućem-brzogorućem štapinu l_1 . Kad detonacija eksplozivne smeše pređe put L , aktivira se i brzogoreći štapin l_2 . Negde na olovnoj ploči doći će do sudara eksplozija od detonirajućih štapina l_1 i l_2 i na tom mestu će se pojaviti mali krater na olovnoj ploči.

Merenjem dužine i primenom navedenih odnosa kroz datu formulu dobija se tražena nepoznata

brzina eksplozivne smeše u kutiji, V_x . Izmere se dužine detonirajućih štapina od kutije do mesta sudara na Pb ploči, l_1 i l_2 .

Iz jednakosti vremena t slede odnosi:

$$t = \frac{l_1}{V_1} = \frac{L}{V_x} + \frac{l_2}{V_1} \quad (1)$$



Određivanje početnih dužina l_1 i l_2 , detonirajućih štapina

Uz pretpostavku da je brzina eksplozivne smeše $V=1700-1800$ m/s izabrana je minimalna dužina štapina $l_2=1$ m.

Izračunavanje dužine l_1 kako bi se sudar desio na Pb ploči

U slučaju da se sudar eksplozije detonirajućih štapina ne desi na Pb ploči, ceo postupak se ponavlja sa drugom pretpostavkom brzine V_x .

$$V_1 = V_2 = 7000 \text{ m/s}$$

$$V_x = 1750 \text{ m/s (pretpostavka za odnos amonexa 1 = 0,95kg i kuhinjske soli = 0,9kg)}$$

$$l_2 = 1 \text{ m}$$

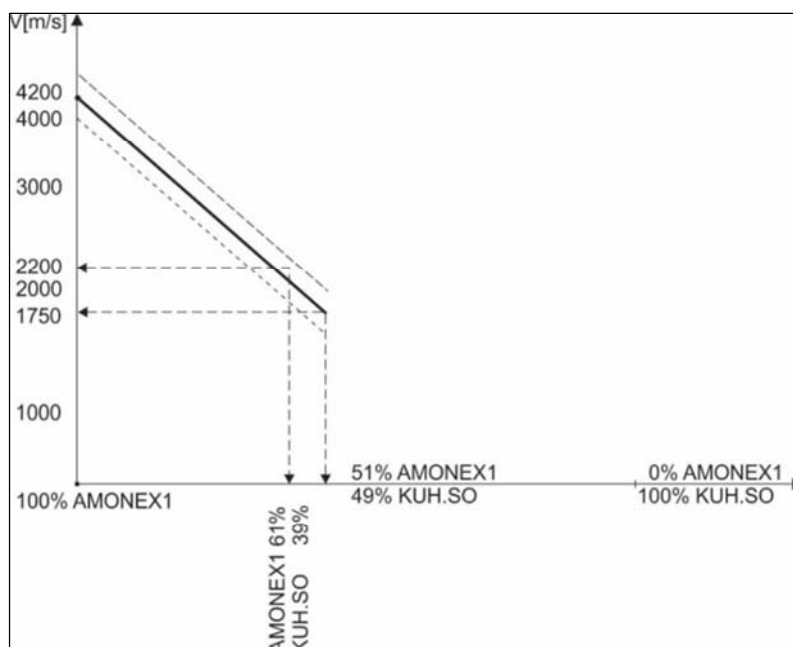
$$L = 0,4 \text{ m}$$

$$l_1 = \frac{LV_1}{V_x} + l_2 = 1,6 + 1 \text{ (m)} \quad (2)$$

Prema proračunu je $l_1 = 2,6$ m, a brzina V_x je:

$$V_x = \frac{LV_1}{l_1 - l_2} = \frac{0,4 \text{ m} \cdot 7000 \text{ m/s}}{2,6 \text{ m} - 1 \text{ m}} = 1750 \text{ m/s} \quad (3)$$

Nakon merenja brzine detonacije eksplozivne smeše (V_x) moguće je nacrtati dijagram iz kojeg se može odrediti brzina, tj. odnos amonexa 1 i kuhinjske soli za bilo koji metal. Potrebna brzina za titan je 2200 m/s. Prema dijagramu bilo je potrebno 61% amonexa 1 i 39% NaCl.



Slika 2. Dijagram za određivanje brzine mešavine amonexa 1 i kuhinjske soli

Figure 2. Diagram for determining the speed of a mixture of ammonia 1 and salt

3. Način izrade dvoslojnog kompozita Ti/Č

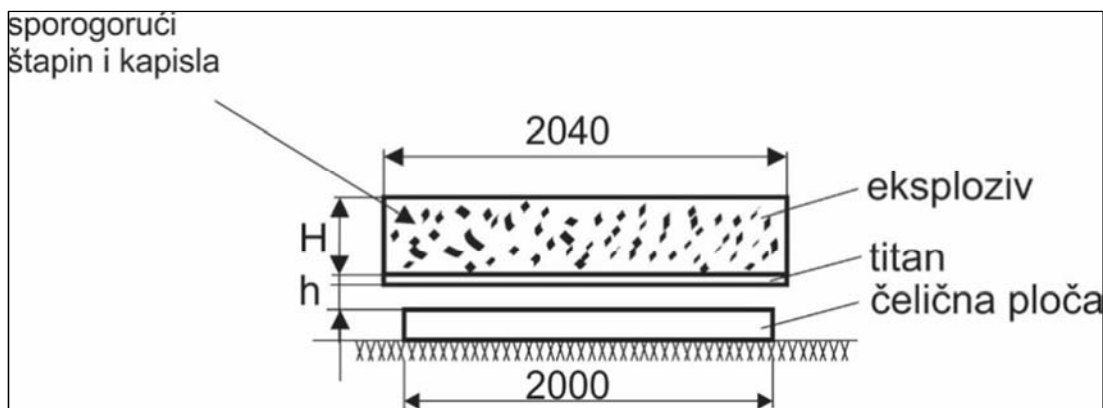
Za taj spoj bilo je potrebno 50 kg eksplozivne smeše. Ta količina je u funkciji težine titanove ploče. Težina titana $Q_{Ti} = ab\gamma_{Ti} = 103 \text{ cm} \times 204 \text{ cm} \times 0,2 \text{ cm} \times 4,5 \text{ g/cm}^3 = 18,9 \text{ kg}$.

Faktor r kojim se množi težina titanove ploče je: $r = 2,65$. Ovaj odnos je određen na bazi iskustva. Težina Q eksplozivne smeše je: $Q = r \times Q_{Ti} = 2,65 \times 18,9 = 50 \text{ kg}$. Određivanje količine amonexa 1 i kuhinjske soli je: Amonex1: $50 \text{ kg} \times 0,61 = 30,5 \text{ kg}$, Kuh.soli: $50 \text{ kg} \times 0,39 = 19,5 \text{ kg}$.

Na pripremljeno mesto stavlja se donja ploča od čelika, a na nekom rastojanju h iznad čelika

postavlja se lim od titana. To rastojanje h treba da je dovoljno malo kako bi se postiglo potrebno ubrzanje do sudara ploča, a i dovoljno veliko da se ostvari kvalitetan spoj sa karakterističnim talasima na spoju. Mi smo odredili na bazi iskustva h (2,5-4.5) d_{Ti} , odnosno: $h = (5-9) \text{ mm}$.

Visina eksploziva u nasipnoj gustini H je: $H = Q_{ex}/P \times \gamma = 25 \text{ mm}$ – srednja visina, zbog inertnosti brzine eksplozije početna visina eksploziva je veća a krajnja manja. Kapisla se zaranja u buster (pojačivač eksplozije, na jednom uglu), gde je Q_{ex} – težina eksplozivne smeše, P – površina titana, γ - specifična težina eksplozivne smeše.



Slika 3. Postavljanje ploča za spajanje eksplozijom

Figure 3. Installation of plates for joining by explosion

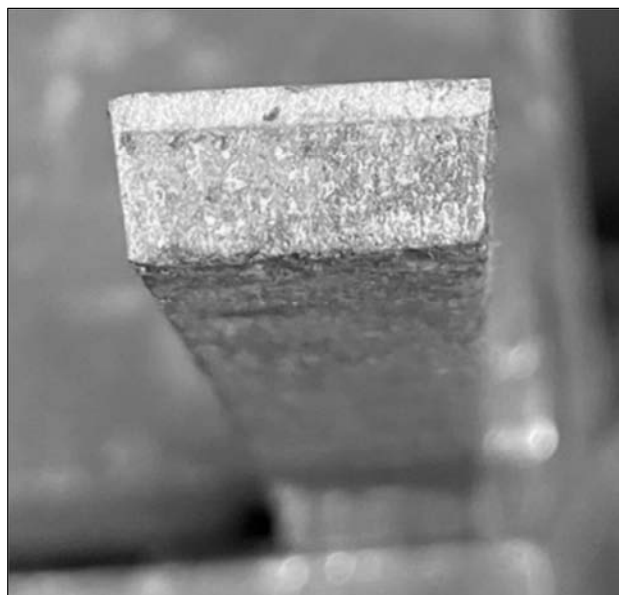
Posebnu pažnju treba posvetiti mešanju amonexa1 i kuhinjske soli. To se radi u drvenim koritima, drvenim lopatama, ne sme da se pojavi nikakva iskra jer bi došlo do detonacije. Poznato je da titan intenzivno iskri. Mi smo mešali eksploziv ručno, direktno na titanski lim koristeći gumene

rukavice. Nije preporučljivo ni Al lopatama da se meša jer u aluminijumu može da bude železa koje bi izazvalo varnicu. Nisu korišćene ni plastične lopate zbog moguće pojave statičnog naelektrisanja.



Slika 4. Postavljanje detonirajućeg štapina i trenutak eksplozije

Figure 4. Installation of the detonating rod and the moment of the explosion



Slika 5. Spoj titan - čelik

Figure 5. Titanium - steel joint

Nakon spajanja eksplozijom elementi kompozita titan i čelik otvrdnjavaju i poželjno je da se izvrši relaksacija zaostalih napona i smanjenje tvrdoća. To se radi zagrevanjem u vakuumu ili u atmosferi argona. Moguće je i zagrevanjem na vazduhu na 600°C u trajanju do jednog sata. Nakon toga je obavezno brušenje površine titana kako bi se uklonio film, taman sloj koji je apsorbovao iz vazduha gasove (O_2 i N_2). Termička obrada je radjena na probnom uzorku dimenzija 450 x 600 mm, kako bi se dokazalo da je moguće vršiti

odžarivanje kompozita u običnim pećima i da površina titana oksidiše po logaritamskom principu, a i da nema razaranja spoja Ti/Č. Žarenje je vršeno na 600°C u trajanju od 60 minuta. Nakon hlađenja izvršeno je uklanjanje filma, stvorenog oksida, brušenjem. Na taj način se vraćaju mehaničke osobine čistog titana. Takođe je moguće vršiti lokalnu termičku obradu. Nije radjena nikakva termička obrada, jer nisu uslovi dozvoljavali, pa je bilo poteškoća prilikom rolovanja plakiranih limova, bušenja, a i zavarivanja.



4. Zavarivanje titana VT-1

Titan je reaktivan metal, ima visoku hemijsku aktivnost na povišenim temperaturama, sa gasovima iz vazduha (O_2 , N_2). Na $882^\circ C$ javlja se alotropska modifikacija kristalne rešetke $\alpha \leftrightarrow \beta$. Tehnički čist titan, VT1, ima α strukturu ispod temperature $882^\circ C$ i dobro je zavarljiv. Primenom odgovarajućih tehnoloških uslova postižu se varovi visokog kvaliteta. Osnovni uslovi koje treba zadovoljiti za kvalitetno zavarivanje su:

- dobra zaštita od uticaja atmosferskih gasova na temperaturi iznad $350^\circ C$,
- čistoća i stanje površine pripremljenog žleba za zavarivanje i dodatnog materijala,
- obezbeđenje termičkog dejstva za regulisanje mehaničkih svojstava i strukturu

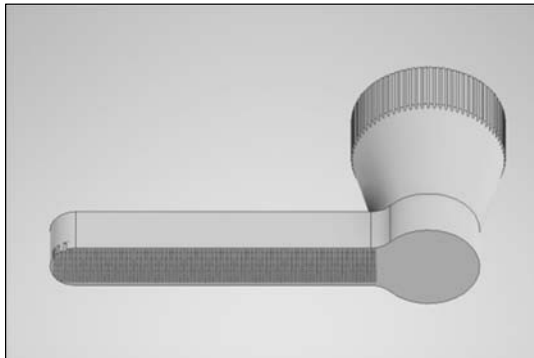
šava potrebno je odrediti odgovarajuće parametre u tehnologiji zavarivanja: struja i brzina zavarivanja, protok argona, brzina pothlađivanja.

a) Zaštita

Zaštita može biti opšta (u komorama sa inertnim gasom ili vakuumom) i lokalna sa specijalnim izduženim mlaznicama (šobama) i tada se razlikuju:

- primarna zaštita kupke,
- sekundarna zaštita ostvarenog vara iza šobe
- tercijalna zaštita korena vara.

Primenjena je lokalna zaštita koja je u upotrebi u najvećem broju slučajeva, slika 6.

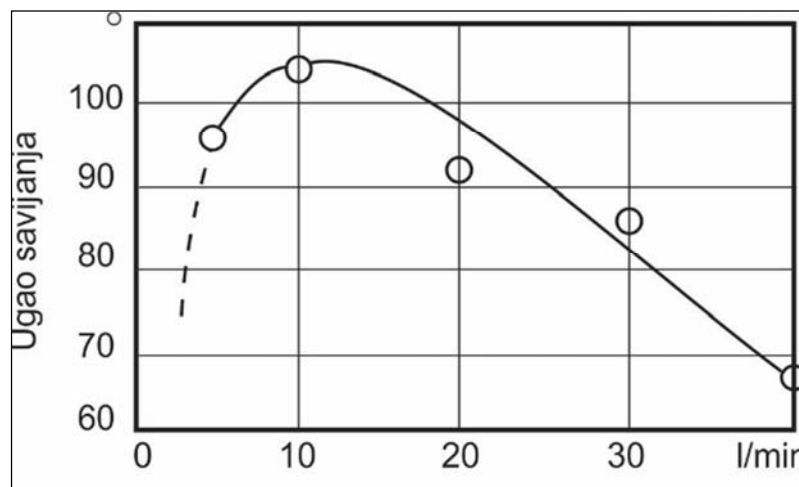


Slika 6. Izdužena mlaznica

Figure 6. Elongated nozzle

Na žilavost titana veoma utiče količina, tj. protok argona. Na početku je primarna zaštita argonom vršena sa 18-20 l/min. Nakon par minuta dolazilo je

do pucanja vara. Tek kada je protok sveden na 10-12 l/min., varovi nisu pucali.



Slika 7. Uticaj potrošnje argona na savijanje šava (debljina Ti lima 2 mm)

Figure 7. Effect of argon consumption on seam bending (Ti sheet thickness 2 mm)



Protok gasa za sekundarnu zaštitu je bila 8 l/min, a za tercijalnu, tj. zaštita korena iznosila je 6 l/min.

b) Čistoća i stanje površine stranica žleba

Površine koje ulaze u sastav vara i zone pod uticajem toplote (ZUT) potrebno je očistiti mehanički i hemijski. Mehaničko čišćenje površina od oksida i nitrida iz vazduha vrena je brušenjem, četkanjem četkama od titana ili od prohroma. Za hemijsko čišćenje upotrebljen je rastvor: HF – 2%, HNO₃ – 30%, H₂O – 68%.

c) Obezbeđenje termičkog dejstva

Titan je osetljiv na termički ciklus zavarivanja. Pojava krtosti usled termofizičkog dejstva odnosi se na pregrevanje, zadržavanje na temperaturama iznad temperature preobražaja (882°C) i od brzine hlađenja. Zadržavanje na visokim temperaturama utiče na stvaranje krupnozrnaste strukture, a brzina pothlađivanja omogućava stvaranje igličaste strukture (Widmanštetenove strukture). Za kvalitetan šav potrebno je ostvariti optimalne parametre: vreme zadržavanja na visokim temperaturama i odgovarajuća brzina hlađenja. Tako se postižu najbolje mehaničke osobine (plastičnost, odnos tvrdoće i žilavosti). Rešenje je upotreba minimalne energije i velike brzine zavarivanja, što je svakako jedno drugom suprotno.



Slika 8. Segment zavarenog titana

Figure 8. Welded titanium segment

Tabela 4. Parametri zavarivanja Ti

Table 4. Welding parameters for Ti

Parametri	I _z [A]	U [V]	Brzina zavarivanja [mm/s]	Protok Ar primarna zaštita [l/min]	Sekundarna zaštita [l/min]	Zaštita korena [l/min]	Netopiva WTh elektroda [mm]
Vrsta struje Jednosmerna (-)	90	12,5	4,2	10-12	8	6	Ø2,4

Titan nije sklon toplim prslinama u toku zavarivanja, jer je vrlo mali interval između likvidus i solidus temperatura, ali je sklon hladnim, zakasnelim prslinama, koje su izazvane apsorpcijom vodonika u vrućem stanju, prisustvom

zaostalih napona izazvanih hladnom deformacijom ili od zavara. Odstranjivanjem nečistoća eliminiše se prisustvo vodonika, a odgovarajućom termičkom obradom, odžarivanjem, vrši se relaksacija zaostalih napona i tako se sprečava nastanak hladnih prslina.



4.1. Kontrola - ispitivanje kvaliteta šavova

4.1.1. Vizuelna kontrola

- sjajna, srebrna boja znači šav visokog kvaliteta, ugao savijanja $\alpha \geq 100^\circ$
- slamnato-žuta boja – dobar kvalitet, $\alpha = 90^\circ$ (srebrna boja se postiže četkanjem posle hlađenja)
- bledo-plava boja – uslovno zadovoljava, $\alpha < 90^\circ$ (obavezno je četkanje posle hlađenja)
- tamno-plava, ljubičasta je diskutabilna, $\alpha \ll 90^\circ$ (poboljšanje kvaliteta se postiže četkanjem ili brušenjem)
- mat-bela (boja krede koja se peruta) ili mat žuta, $\alpha = 0$, ne zadovoljava i ne može se popraviti nikakvim postupkom, jer je došlo do linearne oksidacije.

4.1.2. Penetrantska kontrola

Kontrola na pojavu prslinama se vrši penetrantima i to 48 h nakon zavarivanja (zakasnele hladne prsline).

4.1.3. Radiografska kontrola

Radiografska kontrola nije preporučljiva jer šav može da bude loš, a da na filmu pokazuje da je BN (bez nalaza).

4.1.4. Kontrola sa razaranjem

Najčešća kontrola sa razaranjem vrši se savijanjem epruvete, statički ili dinamički. Prihvatljiv kvalitet je ugao savijanja veći od 60° .

4.1.5. Termofizički procesi u toku zavarivanja

Za dobijanje povoljne strukture šava potrebno je da se odredi vreme hlađenja $t_{9/4}$. Termo-fizički procesi u toku zavarivanja su u funkciji brzine hlađenja. Pri velikoj brzini hlađenja struktura je igličasta i martenzitna pa je šav krt (Widmanštetenova struktura). Ako je vreme hlađenja dugo, struktura je krupnozrnasta, pa je šav opet krt. Potrebno je dovesti brzinu hlađenja u optimalne granice.

4.1.6. Način izračunavanja vremena hlađenja $t_{9/4}$

Vreme $t_{9/4}$ se odnosi na temperaturni interval od temperature fazne transformacije $\beta \leftrightarrow \alpha$ na $t = 882^\circ\text{C}$, pa do temperature kada reakcija apsorpcije gasova nije više intenzivna, odnosno kada se dešavaju samo površinski uplivi O_2 , N_2 , H_2 i C_2 koji se nakon potpunog ohlađenja (do $t \approx 60^\circ\text{C}$) uklanjaju obavezno četkanjem četkom od

nerđajućeg materijala. Tako se postižu dobre mehaničke osobine.

Da bi se odredilo vreme $t_{9/4}$ neophodno je prvo da se izračuna granična debljina prema formuli za d_{gr} . Ukoliko je stvarna debljina manja od izračunate granične vrednosti, za izračunavanje toplotnog imputa koristi se 2D model provođenja toplote. U suprotnom, primenjuje se 3D model provođenja toplote. U konkretnom slučaju je stvarna debljina titana $d = 2 \text{ mm}$, pa je:

$$d_{gr} = \sqrt{\frac{Q}{2\rho C} \left(\frac{1}{400 - T_o} + \frac{1}{882 - T_o} \right)} \quad (4)$$

gde su:

Q – unesena energija, $Q = UI\varepsilon$ [W], $\left[\frac{J}{s} \right]$

T_o – početna temperatura OM (20°C)

d – debljina koja se zavaruje (mm)

ε – koeficijent toplotne efikasnosti za TIG, $\varepsilon = 0,6 - 0,65$

V – brzina zavarivanja, $V = 4,2 \text{ mm/s}$ (eksperimentalno)

ρ – gustina, $\rho = 4,5 \text{ g/cm}^3$

C – specifična toplota za Ti, $C = 523 \text{ J/kgK}$

Sledi da je:

$$d_{gr} = \sqrt{\frac{900}{2 \cdot 4,5 \cdot 523} \left(\frac{1}{400 - 20} + \frac{1}{882 - 20} \right)}$$

$$d_{gr} = 15,5 \text{ mm}$$

odnosno, pošto je $d_{gr} > d$, dalje sledi primena 2D modela.

4.1.7. Izračunavanje vremena hlađenja $t_{9/4}$

Izračunavanje vremena hlađenja $t_{9/4}$ izvršeno je primenom analitičkog 2D modela za titan debljine 2mm prema jednačini:

$$t_{882/400} = \frac{Q^{x2}}{4\pi\lambda C\rho d^2} \left[\frac{1}{(400 - T_o)^2} - \frac{1}{(882 - T_o)^2} \right] \quad (5)$$

gde su:

$Q = \varepsilon \frac{UI}{v} \left[\frac{J}{mm} \right]$ – količina unete energije (toplotne) ili unos toplote za određeno vreme hlađenja

$\varepsilon = 0,65$ – termička efikasnog TIG-zavarivanja



$I_z = 90 \text{ A}$ – jačina struje zavarivanja

$U = 12 + 0,004I_z = 12,36 \text{ V}$ – napon zagrevanja

$V = 4,2 \text{ mm/s}$ – brzina zavarivanja

$\lambda = 22 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}} \right] = \left[\frac{\text{J}}{\text{sm}^0\text{K}} \right]$ – toplotna provodljivost

$C = 523 \text{ [J/kg}^0\text{K]}$ – specifična toplota

$\rho = 4,5 \text{ [kg/dm}^3]$ – gustina

$d = 2 \text{ mm} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ – debljina titana

Zamenom vrednosti u jednačini (5)

$$t_{882/400} = \frac{\left(0,65 \frac{12,36 \cdot 90}{4,2}\right)^2}{4\pi \cdot 22 \cdot 523 \cdot 4,5 \cdot 10^{-3} \cdot (2 \cdot 10^{-3})^2} \left[\frac{1}{(400 - 20)^2} - \frac{1}{(882 - 20)^2} \right]$$

dobijeno vreme hlađenja iznosi: $t_{882/400} = 63,7 \text{ s}$.

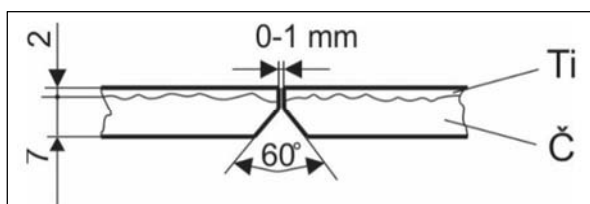


Slika 9. Ugao savijanja titana 83° , (kriterijum prihvatljivosti savijanja 60°)

Figure 9. Bending angle of titanium 83° , (bending acceptance criterion 60°)

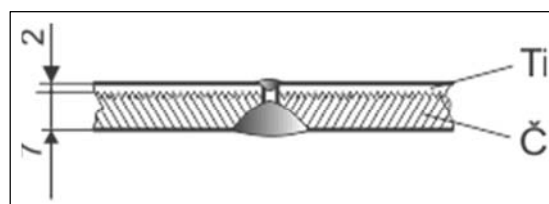
Nakon spajanja Ti i Č eksplozijom na poligonu, izvršeno je čišćenje površine titana, pranje deterdžentom i vodom radi uklanjanja prljavštine i ostataka od eksplozije. Ravnanje deformisanih delova kompozita urađeno je na valjcima prilikom rolovanja na zadati radijus. Ukрупnjavanju

segmenata u plašt prethodila je priprema ivice za zavarivanje. Priprema je izvedena ručnim brušenjem i turpijanjem u smeru od titana prema čeliku kako se ne bi nanosili opiljci od čelika na titan. Polirkama, tj. brusnim papirom za INOX, očišćena je površina titana u širini do 30 mm od ivice koje se zavaruju.



Slika 10. Priprema sučeonog spoja dvoslojnog kompozita Ti/Č

Figure 10. Preparation of butt joint of two-layer composite Ti/Č



Slika 11. Prikaz načina zavarivanja dvoslojnog kompozita Ti/Č

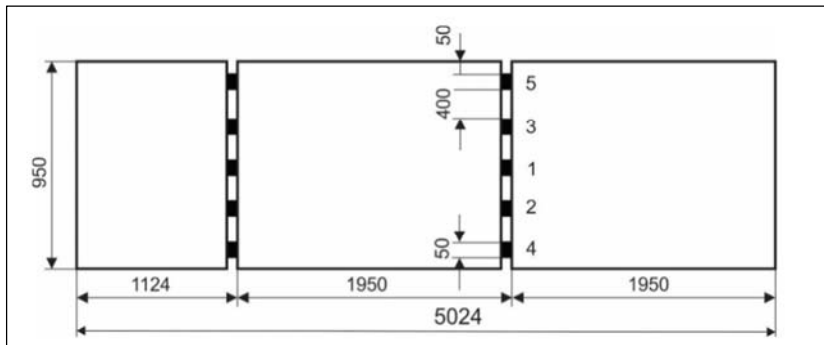
Figure 11. Presentation of the method for welding the two-layer Ti/Č composite



5.2. Pripajanje segmenata

Ukupnjavanje i centriranje za spajanje dvoslojnog kompozita Ti/Č zavarivanjem urađeno je upotrebom hidraulike u specijalnom alatu.

Privarivanje je rađeno na titanu od sredine segmenata levo i desno prema krajevima. Na tom principu su izvršena sva pripajanja sučeonih zavara.



Slika 12. Dužina privara i redosled izvođenja privara

Figure 12. The length of the temporary weld and the sequence of the temporary weld

5.3. Ukupljeni segmenti za rolovanje i izradu plašta Ø1600 mm

Dvoslojni kompozit Ti/Č bilo je potrebno opkrojiti posle eksplozije, odnosno ukloniti rubne efekte radi loše prionljivosti u širini 25 mm (efekat biča). Tako su se dobile plakirane ploče za ugradnju dimenzije 950 x 1950 mm.

Posle spajanja – ukupnjavanja ploča na potrebnu dužinu prišlo se zavarivanju plakature. Zavarivao se prvo titan od sredine prema krajevima levo i desno, a potom se zavarivala strana čelika, poluautomatskim postupkom, pri čemu je zaštitni gas bio argon. Vodilo se računa da ne dođe do kontakta titana i čelika u toku zavarivanja.

Tabela 5. Parametri MIG-zavarivanja čelika na dvoslojnoj kompozita Ti/Č

Table 5. Parameters of MIG-welding of steel on two-layer Ti/ Č composite

Struja zavarivanja I_z [A]	Napon zavarivanja U_z [V]	Dodatni materijal	Prečnik žice d [mm]	Zaštitni gas Ar [l/min]	Brzina dotoka žice [m/min]
100	19	VAC – 60 SG 2	1	16-18	3



Slika 13. Penetrantska kontrola potvrđuje da nije došlo do kontakta između Ti i čelika u toku zavarivanja

Figure 13. Penetrant control confirms that it did not occur contact between Ti and steel during welding



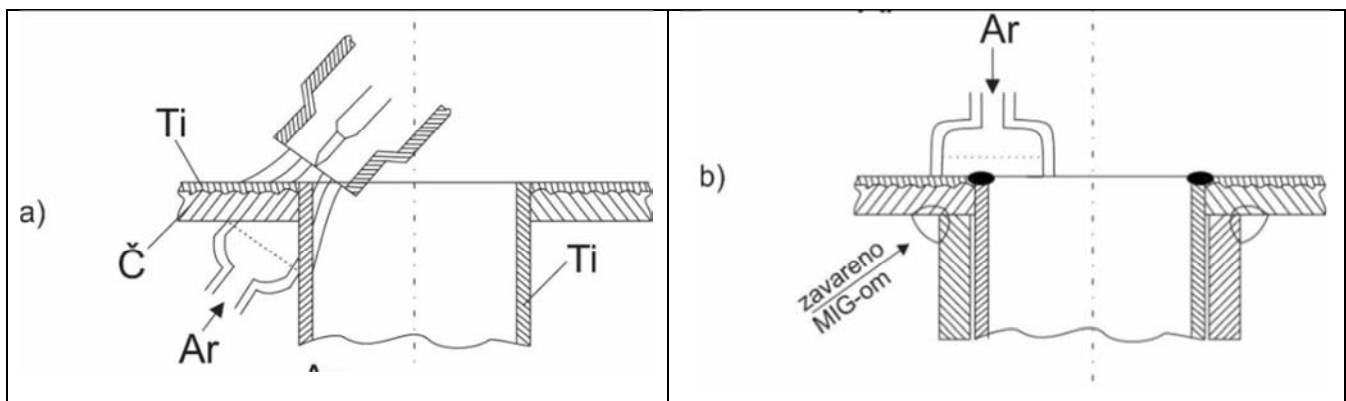
Po završenom zavarivanju kompletnog šava izvršeno je četkanje titana, pa su zavari po hlađenju imali srebrnu boju. Za vreme zavarivanja čelika titan se štiti argonom od temperaturnog uticaja i reakcije Ti sa gasovima iz vazduha. Ukrupnjeni i zavareni segmenti su rolovani na mašini sa pet valjaka.

5.4. Zavarivanje priključaka i ugaonih varova

Zavarivanje priključaka i ugaonih varova vršeno je sa parametrima zavarivanja prikazanim u Tabeli 6 i pod uslovima prikazanim na slici 14.

Tabela 6. Parametri zavarivanja titana na dvoslojni kompozit
Table 6. Parameters for welding titanium on two-layer composite

Vrsta struje	Netopiva elektroda od WTh , [mm]	Jačina struje zavarivanja I_z , [A]	Napon zavarivanja U , [V]	Brzina zavarivanja, [mm/s]
Jednosmerna (-)	Ø2,4	150	16,5	3



Slika 14. Zavarivanje priključaka: a) zavarivanje priključaka Ti/Ti, b) zavarivanje priključaka Č/Č
Figure 14. Welding of connections: a) welding of Ti/Ti connections, b) welding of Č/Č connections

Ugaoni var Ti/Ti zavaren je bez dodatnog materijala. Posle zavarivanja titanove cevčice vrši se navlačenje cevčice od čelika i zavaruje se čelik od plakature sa čeličnom cevčicom MIG-postupkom.

5.5. Ispitivanje varova

Nakon zavarivanja izvršena su osnovna ispitivanja:

- a) Vizuelno – kontrolisana je boja šavova. Nakon četkanja u hladnom stanju boja svih varova bila je srebrno-bela.

- b) PT kontrola – Kontrola penetrantima vršena je 48 h nakon zavarivanja zbog mogućnosti pojave hladnih – zakasnelih prskotina. Svi varovi su zadovoljili penetrantsku kontrolu.
- c) Hladna proba – Posuda je napunjena vodom i držana na dogovoreni pritisak od 3 bara u vremenu od 30min. Nisu se javila mesta koja vlaže, niti pad pritska na manometru. Nakon svih kontrola i ispitivanja reaktor je pušten u proces. Reaktor je bio u pogonu 5 godina, sve dok nije došlo do gašenja pogona.



6. Zaključak

U radu je detaljno opisan način izrade dvoslojnog kompozita titan-čelik (Ti/Č). Detaljno je opisan i način meranja brzine eksplozivne smeše koja je bitna za izradu plakature titana i čelika. Prikazan je način izračunavanja kritičnog vremena hlađenja $t_{9/4}$ za titan debljine 2 mm. Poseban problem bio je određivanje vremena hlađenja kompozita pri zavarivanju Ti i to se rešilo eksperimentima, primenom predgrevanja kako bi se usporilo pothlađivanje.

Izvršena su ispitivanja uzoraka savijanjem i najbolji rezultati nakon predgrevanja uzeti su za osnovu daljeg rada. Ti rezultati važe za uslove koji su tada vladali, spoljna temperatura je bila -3 do 2°C.

Izvršena je analiza osnovnog i dodatnog materijala za titan.

Proračunati su i definisani parametri i uslovi zavarivanja. Izvršena je probna izrada dvoslojnog kompozita i zavarivanja titana i čelika. Na osnovu dobijenih dobrih rezultata izvršena je izrada reaktora.

Kvalitet izrade proveren je kontrolama bez razaranja: vizuelno i penetrantima. Kontrole su zadovoljile nivo kvaliteta prema standardu SPRS EN ISO 5817 „B“.

Po završetku reaktora izvršena je hladna proba na nepropusnost i na pritisak.

Reaktor je urađen u dogovorenom roku i kvalitetno, te je pušten u pogon. Radio je pet godina, sve dok nije došlo do zatvaranja pogona.

References / Literatura

[1] Aleksa Blagojević, (1982), „Zavarivanje“, Mašinski fakultet Banja Luka, Banja Luka

[2] Inženjersko Tehnički Priručnik (1979), „Zavarivanje“, knjiga 2, RAD Beograd

[3] Inženjersko Tehnički Priručnik (1980), „Zavarivanje“, knjiga 4, RAD Beograd

[4] Mića Đorđević, (2020), „Priručnik za zavarivače“, drugo dopunjeno izdanje, štampa DOART d.o.o. Loznica

6. Conclusion

The paper describes in detail the method of making a two-layer titanium-steel (Ti/Č) composite. The method of measuring the speed of the explosive mixture, which is essential for the production of titanium and steel plaques, is also described in detail. The method of calculating the critical cooling time $t_{9/4}$ for titanium with a thickness of 2 mm is shown. A special problem was the determination of the cooling time of the composite when welding Ti, and this was solved by experiments, using preheating to slow down the undercooling.

Bending tests of the samples were performed and the best results after preheating were taken as the basis for further work. Those results are valid for the conditions that existed at the time, the outside temperature was -3 to 2°C.

An analysis of the basic and additional material for titanium was performed.

The welding parameters and conditions were calculated and defined. Trial production of two-layer composite and welding of titanium and steel was performed. On the basis of the obtained good results, the construction of the reactor was carried out.

The quality of production was checked by non-destructive controls: visually and penetrants. The controls met the quality level according to the SPRS EN ISO 5817 "B" standard.

After the completion of the reactor, a cold leak and pressure test was performed.

The reactor was completed within the agreed time and with high quality, and was put into operation. He worked for five years, until the plant was closed.

[5] Obezbeđenje kvaliteta u zavarivanju, (2012), „Tehnologija zavarivanja prilog D“, izdavači: Institut za standardizaciju Srbije i Društvo za unapređenje zavarivanja u Srbiji, štampa Grafikon UNO, Beograd

[6] Vladimir Semjan, (1978), Izabrana poglavlja iz „Tehnike zavarivanja“, Mašinski fakultet Univerziteta u Sarajevu, Sarajevo

[7] Vladimir Semjan, (1990), „Određivanje optimalnih parametara zavarivanja“, Energoinvest-Sa, Sarajevo.



Prikaz knjige

KAKO JE LAKO ZAVARIVATI SA ELEKTRODAMA

autora Saše Pejkića

Treća po redu knjiga, iz edicije Inženjersko radioničkih priručnika: „Kako je lako zavarivati sa elektrodama“ je svakako knjiga sa potpuno novim konceptijskim pristupom prenosu znanja na mlade zavarivače. Reč o materiji koja sem stručnih saveta obiluje i praktičnim, životnim porukama koje su potrebne mladom čoveku kao vezivno tkivo, suvoparnih informacija. Svakako je iznenađenje, kako je jedna na prvi pogled lagana i jednostavna obuka za zavarivača sa obloženim elektrodama, detaljno opisana u značajnom obimu i začinjena praktičnim savetima. Da li to možemo nazvati načinom ili podstrehom za rad i napredovanje, više ili manje je bitno. Suština je da imamo tekst koji je prilagođen mladim ljudima, sa jednostavnom i prihvatljivom terminologijom, na dohvat ruke, koja nije u suprotnosti novom digitalnom dobu i revoluciji brzih informacija, već je važan temelj za budućnost i nadgradnju znanja. Ova knjiga nam ukazuje na potrebu da se elementarno znanje nađe na jednom mestu, dostupno u svakom trenutku, pregledno i prihvatljivo.



Knjiga je podeljena u dva dela, pri čemu u prvom delu obrađena su potencijalna radna mesta, opasnosti i mogućnost napredovanja. Baš ono, što je često skriveno od očiju zaposlenih, iako se nalazi ispred njih, a ne vidi se, što se samo nagoveštava i često ostane nepoznanica, iako se nalazi tu, potpuno očigledno.

Drugi deo je atraktivna celina podeljena u 100 lekcija, koja upućuje apsolutnog početnika u tajne i veštine zavarivačkog zanata i profesije. Sitni detalji ukomponovani uz životne savete, stvorilo je prijatnu melodiju za zabavu i učenje. Tajna je svakako u tome što autor potencira na tome da materija bude zabavna kako bi se dugo pamtila. Uostalom, zašto učenje mora da bude teško?

Ono što je upadljivo na prvi pogled je svakako pojednostavljen i slikoviti prikaz praktičnih primera iz zavarivanja, počev od najjednostavnijih do najsloženijih i najzahtevnijih položaja zavarivanja, za koje je neophodno razviti dosta umeća. A način kako do toga stići, je svakako zanimljiv. Mladi zavarivač ima priliku da kroz razvoj svoje veštine, istovremeno razvije i sopstvenu ličnost i smanji svoj ego, kako bi svoj životni vek učinio zanimljivim i srećnijim.

Priručnik „Kako je lako zavarivati sa obloženim elektrodama“ je praktično štivo, koje učenika upoznaje sa sva tri ključna tipa zaštitne obloge elektrode i finesama u radu sa njima. I ne samo to, on će kroz vežbe upoznati se i sa ključnim razlikama i mogućnostima, za koje su ove elektrode konstruisane.

Interesantno je da autor insistira na tome da mora da se nauči i kako se pogrešno radi, kako namerno praviti greške. Možda je to pravi put da se greške spreče, da se ne dozvoli opuštanje i dokolica u radu. Sigurno je prednost što se u gotovo svim vežbama radi sa potpuno umirenim čelikom S235JRG2, koji je konstruisan sa ciljem da omogući rad sa svim tehnikama zavarivanja u svim položajima. Kombinacije prečnika, jačine struje, položaja zavarivanja, podešavanja zazora, promena debljina materijala i tehnike vođenja elektrode omogućava tu raznovrsnost koja je preko neophodna ne samo za razvoj šireg spektra veština, nego i stvara zabavu kod učenika.

I da zaključimo u duhu knjige: Dragi čitaoče, pred Vama se nalaze potpuno nepoznati i veoma lepi trenuci u životu, koji tek treba da nastanu i za koje se vredi boriti!

Profesor emeritus Aleksandar Sedmak

Knjiga se može naručiti na stranici: <https://pejkic.com> ili na zmajsale@gmail.com, odnosno telefonom: 064 829 8875



78. godišnja skupština MIZ (IIW) i međunarodna konferencija o zavarivanju i spajanju

Godišnja skupština i međunarodna konferencija će se održati u junu 2025. godine u Đenovi, Italija. Italijanski institut za zavarivanje (IIS) biće domaćin ovog događaja od globalnog značaja. IIS je za mesto održavanja odabrao staru lučku četvrt, renoviranu da stvori jedinstveno radno i slobodno okruženje, tik ispred mora, a takođe je osmislio niz događaja koji će pratiti ceremonije MIZ, uključujući koncerte i posetu najvećem akvarijumu u Evropi. Međunarodna konferencija će se održati paralelno sa italijanskim nacionalnim danima zavarivanja (GNS) koji svake druge godine okupe više od 1500 učesnika iz cele zemlje. Održavanje godišnje skupštine i međunarodne konferencije je jedinstvena prilika da učesnici stupe direktno u kontakt sa brojnim predstavnicima italijanske industrije i na taj način prošire perspektivu i saradnju u oblasti zavarivanja i spajanja. Izvor: <https://iiw2025.com/> *Bojan Gligorijević*

Formnext expo – skup posvećen aditivnoj proizvodnji

Na *Formnext-u*, preko 850 izlagača i više od 32.000 posetilaca sastaje se između 19. do 22. novembra 2024. u Frankfurtu na Majni (Nemačka) i pretvoriće ovaj grad u prestonicu aditivne proizvodnje. Posetioци će imati priliku da vide i štandove komplementarnih tehnologija tehnologiji za aditivnu proizvodnju. Pored inovativnih 3D štampača za industrijsku primenu, biće predstavljeni najpogodniji materijali za različite primene, rešenja za automatizaciju, softver koji podržava proces projektovanja, planiranja i proizvodnje, kao i tehnologije za naknadnu obradu i kontrolu kvaliteta. Formnext i njegovi izlagači predstavljaju rešenja iz celog lanca procesa aditivne proizvodnje i industrijske 3D štampe. Od softvera, tehnologije i materijala za sve procese, aditivne proizvodnje do naknadne obrade i automatizacije u proizvodnom procesu. Obimni profili kompanija i proizvoda izlagača nude sveobuhvatan pregled najnovijih dostignuća u industriji aditivne proizvodnje. Izvor: <https://formnext.mesaqo.com/frankfurt/en/expo-convention.html> *Bojan Gligorijević*

AJP 2025 konferencija o naprednim tehnologijama spajanja

Četvrta međunarodna konferencija o naprednim tehnologijama spajanja održaće se u Coimbra (Portugal) između 16 i 17. oktobra 2025. Mesto održavanja konferencije je hotel Vila Galé Coimbra sa 4 zvezdice. Ova konferencija se održava svake druge godine. Konferencijom predsedava Lucas F. M. da Silva, a kopredsedavaju Paulo Martins (Univerzitet u Lisabonu, Portugal) i Uve Reisgen (Univerzitet u Aachen-u, Nemačka). Fokus je na svim naprednim metodama spajanja kao što su zavarivanje trenjem, spajanje plastičnom deformacijom, lasersko zavarivanje, napredno mehaničko spajanje, lepljenje, hibridno spajanje itd. Izvor: <https://www.engeduconferences.com/AJP2025/> *Bojan Gligorijević*

ICWAM 2025: 19. međunarodna konferencija o zavarivanju i aditivnoj proizvodnji

ICWAM 2025 ima za cilj da okupi vodeće i druge istraživače iz oblasti zavarivanja i aditivne proizvodnje kako bi razmenili i podelili svoja iskustva i rezultate istraživanja. Takođe, ova međunarodna konferencija pruža vrhunsku interdisciplinarnu platformu za istraživače, praktičare i edukatore da predstave i diskutuju o najnovijim inovacijama, trendovima, praktičnim izazovima i rešenjima u okviru pomenutih oblasti. Potencijalni autori se pozivaju da doprinesu i pomognu u oblikovanju konferencije putem podnošenja apstrakata svojih istraživanja, radova i e-postera. Originalni i neobjavljeni rezultati iz oblasti zavarivanja i aditivne proizvodnje su srdačno pozvani za prezentaciju na konferenciji. Konferencija će se održati između 12 i 13. jula 2025. u Ottawa, Kanada. Izvor: <https://waset.org/welding-and-additive-manufacturing-conference-in-july-2025-in-ottawa> *Bojan Gligorijević*

ČASOPIS ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE**Cenovnik oglasnog prostora u četiri uzastopna broja 2024**

	A4	2/2	1/1	1/2	1/4	1/8
dimenzije (mm)		2 x 210 x 297	210 x 297	180 x 120	90 x 120	90 x 60
DIN	crno/beli	-	42 900	25 300	17 600	11 000
	kolor	115 500	82 500	-	-	-

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

WELDING & WELDED STRUCTURES, Quarterly review
Advertising prices for four successive numbers in 2024

	A4	2/2	1/1	1/2	1/4	1/8
dimensions (mm)		2 x 210 x 297	210 x 297	180 x 120	90 x 120	90 x 60
EUR	black/white	-	924	480	372	264
	colour	2 880	1 848	-	-	-

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

INDEKS OGLAŠIVAČA
ADVERTISERS INDEX

MESSER TEHNOGAS

REFIT INŽENJERING

YASKAWA SLOVENIJA

HONEX

ELIMP

NEMINIK

SIGMA LAB

EDC D.O.O. HRVATSKA

TMS CEE D.O.O BEOGRAD

1. ČLANARINA DUZS za 2024. godinu **3.500 dinara**
Članovima DUZS **GRATIS** godišnje izdanje časopisa "ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE"
2. ČASOPIS "ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE" - 2024. godina u slobodnoj prodaji (u cene je uračunat PDV 10%):
 - cena pojedinačnog broja..... 825 dinara
 - godišnja pretplata za 1 komplet brojeva godišnjeg izdanja..... 2.500 dinara
3. ČASOPIS - stari brojevi (u cene je uračunat PDV 10%)
 - a) u slobodnoj prodaji:
 - cena pojedinačnog broja za 2023. godinu 500 dinara
 - cena pojedinačnog broja za prethodne godine..... 250 dinara
 - b) beneficirane cene za članove DUZS:
 - cena pojedinačnog broja za 2023. godinu (pouzećem ili preuzimanjem) 400 dinara
 - cena pojedinačnog broja za prethodne godine (pouzećem ili preuzimanjem) Gratis
4. Knjiga Organizacija i ekonomika zavarivačkih radova – autor: prof. dr Zoran Radojević (uračunat PDV 10%) 1.045 dinara
5. Zbirke standarda OBEZBEĐENJE KVALITETA U ZAVARIVANJU, komplet 4 toma 6.750 dinara