

IZRADA CJEVOVODA No100 (Np81) ZA POTREBE REVERZIBILNE HIDROELEKTRANE BAJINA BAŠTA

MAKING PIPE No100 (Np81) FOR THE PURPOSES REVERSIBLE HYDRO POWER PLANT BAJINA BAŠTA

Darko BAJIĆ¹⁾, Mića ĐORĐEVIĆ²⁾

Ključne riječi: cjevovod, elektrolučno zavarivanje, ATIG zavarivanje, topitelj, slobodna kontrakcija

Key words: piping, arc welding, ATIG welding, welding flux, free contraction

Sažetak: Tijekom redovitog godišnjeg remonta u reverzibilnoj hidroelektrani Bajina Bašta izvršena je zamjena postojećeg cjevovoda No100 (Np81). Cjevovod služi za upuhivanje zraka u prostor radnog kola agregata R1 i R2 i mora posjedovati otpornost na kiseline iz kondenzata. Za osnovni materijal cijevi dimenzija Ø108×4, odabran je korozionski postojani čelik 316L. Zbog niza prednosti u odnosu na konvencionalne postupke zavarivanja REL ili TIG, odabran je ATIG postupak zavarivanja. Izvršena je verifikacija tehnologije. Ispitivanja sa i bez razaranja, metalurška ispitivanja zavarenih spojeva kao i provjera brtvenosti potvrđili su visoku kvalitetu zavarenih spojeva zavarenih ATIG postupkom zavarivanja.

Abstract: During the regular annual maintenance of the reversible hydro power plant Bajina Bašta replacement of the existing pipeline No100 (Np81) has been performed. Pipeline is used for blowing the air in the space of the impeller units R1 and R2, and must be resistant to acids from the condensate. Corrosion resistant steel 316L has been selected for the base material for the pipe size Ø108×4. ATIG welding has been selected due to its numerous advantages over the conventional welding technologies SMAW or TIG. Verification of the technology has been performed and tests with and without damage, metallurgical testing of welded joints, as well as tightness checking have confirmed the high quality of ATIG welded joints.

¹⁾ Univerzitet Crne Gore, Mašinski fakultet Podgorica, darko@ac.me

²⁾ TehWeld d.o.o., Loznica, tehweld@yahoo.com

1. UVOD

Posude pod tlakom spadaju u najodgovorniju i najzahtjevniju grupu zavarenih proizvoda, zbog povećanog ili visokog rizika za čovjeka, čovjekovu okolinu i materijalna dobra uslijed otkaza. Kvaliteta i pouzdanost zavarenih spojeva su osnovni parametri pri procjeni pouzdanosti svake posude pod tlakom u cjelini. Zbog značajnog udjela zavarivačkih radova pri njihovoj izradi, veoma je važno izabrati optimalnu tehnologiju izrade¹⁾.

Kvalitet zavarenog spoja, a samim tim i pouzdanost posude pod tlakom kao zavarene konstrukcije, zavisi od elemenata svrstanih u pet grupa koje se mogu predstaviti "4M+1E" (*Man-Material-Machine-Method-Enviroment*) Ishikawa dijagramom.

TIG postupak zavarivanja, kao jedan od najmobilnijih i najekonomičnijih postupaka elektrolučnog zavarivanja, stalno se usavršava i dalje razvija. Novu etapu u razvoju TIG postupka zavarivanja predstavlja razvoj i primjena tzv. *aktivirajućih topitelja*, po kojima je postupak i dobio naziv **ATIG** postupak zavarivanja.

Topitelji u sebi sadrže odgovarajuće elektronegativne i površinski aktivne elemente u mikrokoličinama, koji u zaštiti inertnih plinova osiguravaju odvijanje fizičko–hemiskih procesa pri zavarivanju. Ovim procesima povećava se dubina provarivanja zavarivanog metala, smanjuje pregrijavanje ZUT-a i poboljšava struktura MZ. Zbog povećanja brzine kristalizacije rastopljenog metala i zahvaljujući mikrolegiranju pomoću topitelja, vrši se usitnjavanje strukture MZ koja postaje dezorientirana, za razliku od konvencionalnog TIG postupka gdje je usmjerena – dendritska [1-10].

2. OSNOVNI MATERIJAL

Naručilac je odabrao materijal cijevi 316L (u klasi čelika Č4574) dimenzija Ø108×4. Navedeni materijal je otporan prema koroziji i kiselinama. Osnovna karakteristika ovog čelika je da pri njegovom zavarivanju nije neophodno predgrijavanje, niti naknadna toplinska obrada nakon zavarivanja. Usporedne oznake ovog čelika prikazane su u tablici 1, a u tablicama 2 i 3 dan je kemijski sastav i mehanička svojstva ovog čelika.

Tablica 1. Obilježavanje čelika prema različitim standardima

EN 10088/3	W.N.	BS	AFNOR	SIS (SWEDEN)	SUS (JAPAN)	AISI
X2CrNiMo18-14-3	1.4435	316S13	Z3 CND 18-14-03	2353	316L	316L

Tablica 2. Kemijski sastav čelika 316L

C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu
0.02	1.8	0.30	0.025	0.001	18.0	3.00	14.0	0.3

Tablica 3. Mehanička svojstva čelika 316L

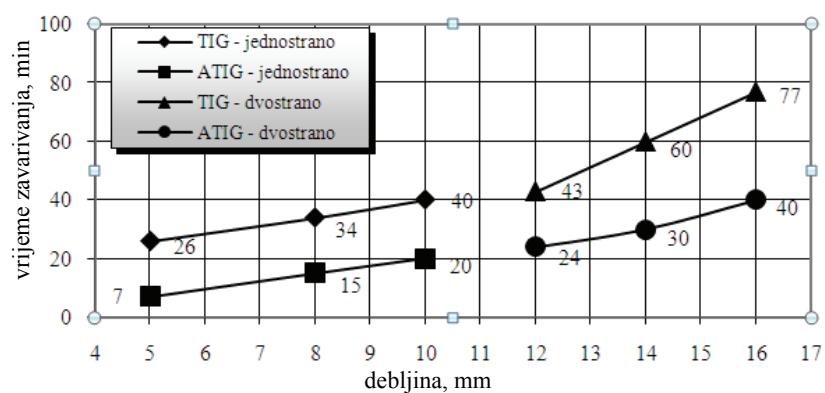
R_m , N/mm ²	$R_{p0,2}$, N/mm ²	A_5 , %	Z, %	HB
500-700	≥200	≥40	≥60	≤217

¹⁾ Autori rada se zahvaljuju Vladimиру Đorđeviću i Dragunu Đorđeviću na pomoći pri realizaciji ovog projekta.

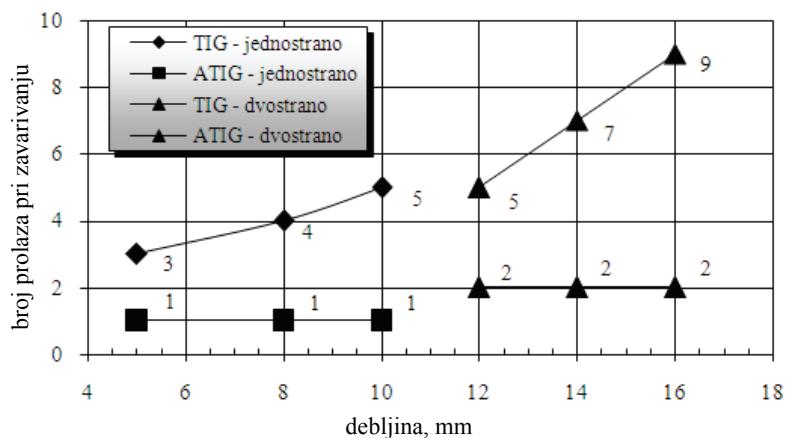
3. IZBOR POSTUPKA ZAVARIVANJA

Osnovni koncept za izbor tehnologije zavarivanja je: postići visokokvalitetne i pouzdane spojeve sa minimalnim troškovima. Kada se govori o troškovima, prije svega se misli na pripremu spojeva, utrošak dodatnog materijala i zaštitne atmosfere, utrošak energije i konačno, vrijeme zavarivanja. Poseban akcent se daje na eliminiranje subjektivnog faktora na kvalitetu zavarenog spoja - utjecaj osposobljenosti zavarivača.

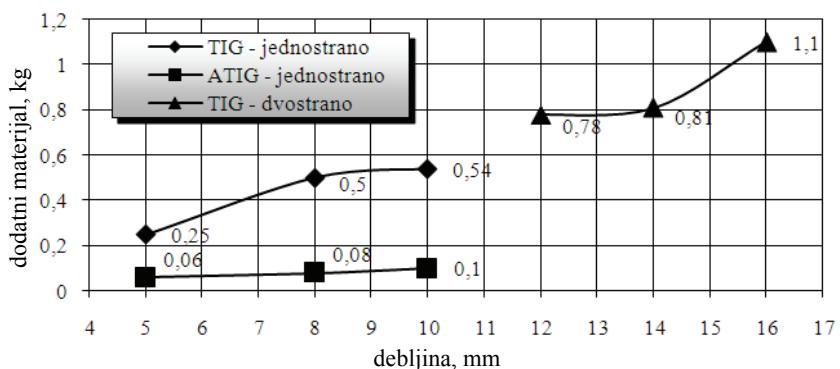
Zbog niza prednosti u odnosu na najčešće primjenjivane konvencionalne postupke zavarivanja, (slika 1-3) izabran je ATIG postupak zavarivanja.



Slika 1. Utjecaj debljine materijala na potrebno vrijeme zavarivanja

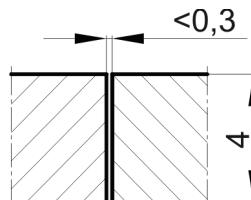


Slika 2. Utjecaj debljine materijala na ukupan broj prolaza

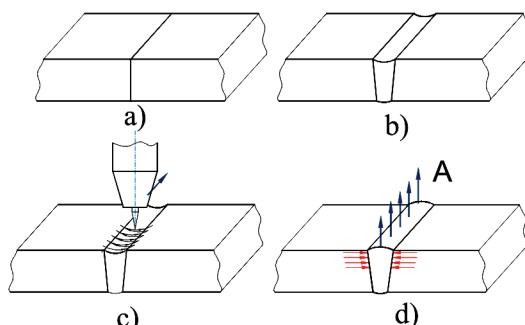


Slika 3. Utjecaj debljine materijala na potrebnu količinu dodatnog materijala

Za ATIG postupak zavarivanja, za ovu debljinu, nije potrebno raditi pripremu za zavarivanje (slika 4) niti koristiti dodatni materijal. Po završetku pripajanja cijevi, a prije početka zavarivanja, spoj se premazuje emulzijom koja se dobiva miješanjem aktivirajućeg topitelja i tehničkog alkohola.



Slika 4. Priprema stanic spoja



Slika 5. Ojačanje MZ postupkom slobodne kontrakcije: a) "I"-žljeb pripremljen za zavarivanje; b) prvi zavarivački prolaz (ATIG); c) drugi prolaz (poprečno njihanje volframove elektrode), d) zavareni spoj nakon primjene postupka slobodne kontrakcije

Nakon prvog zavarivačkog prolaza formira se visoko kvalitetan korijen zavarenog spoja. U zavisnosti od zazora između stranica spoja, na licu zavara dolazi do pojave manje ili veće konkavnosti površine (slika 5b). Da bi se dobilo adekvatno i standardom prihvatljivo nadvišenje, neophodno je drugim prolazom, sa poprečnim njihanjem vrha netopljive volframove elektrode (slika 5c) ostvariti visoko zagrijavanje MZ. Parametri termičkog i deformacijskog ciklusa u zavarenom spolu povećavaju tlačno naprezanje i plastične deformacije u zoni zavarivanja uslijed hladnijeg materijala okoline. Naprezanja izazvana zagrijavanjem prelaze granicu tečenja MZ i dovode do njegove plastične deformacije prilikom hlađenja, uslijed čega dolazi do potrebnog ojačanja zavara ne koristeći dodatni materijal. Na ovaj način dio metala ("višak metala") koji se zagrijava do visokih vrijednosti temperatura formira nadvišenje lica metala zavara. Plastična deformacija se odvija u pravcu slobodne površine (pravac A, slika 5d). Efekt slobodne kontrakcije (ojačanja) je moguć kod ove klase čelika jer ima veliki linearni koeficijent toplinskog istezanja (50 % veći u odnosu na ugljične čelike), a mali koeficijent toplinske vodljivosti (1/3 u odnosu na ugljične čelike).

Eksperimentalno je dokazano [2] da se postupkom slobodne kontrakcije najveći efekt ojačanja za ovu klasu čelika postiže pri pothlađenju spoja prethodnog prolaza od 200÷250 °C.

4. POSTUPAK ZAVARIVANJA

Pripajanje cijevi i cijevnih elemenata vrši se TIG postupkom bez dodatnog materijala. Pripajanje za promjere cijevi veće od 50 mm izvršeno je sa 4 simetrično postavljena pripoja dužine cca 10 mm. Zavarivanje je započeto između pripoja, a položaj zavarivanja je PA. Zavarivanje se vrši u radioničkim uvjetima koristeći za ovu priliku napravljeni pribor i naprave.

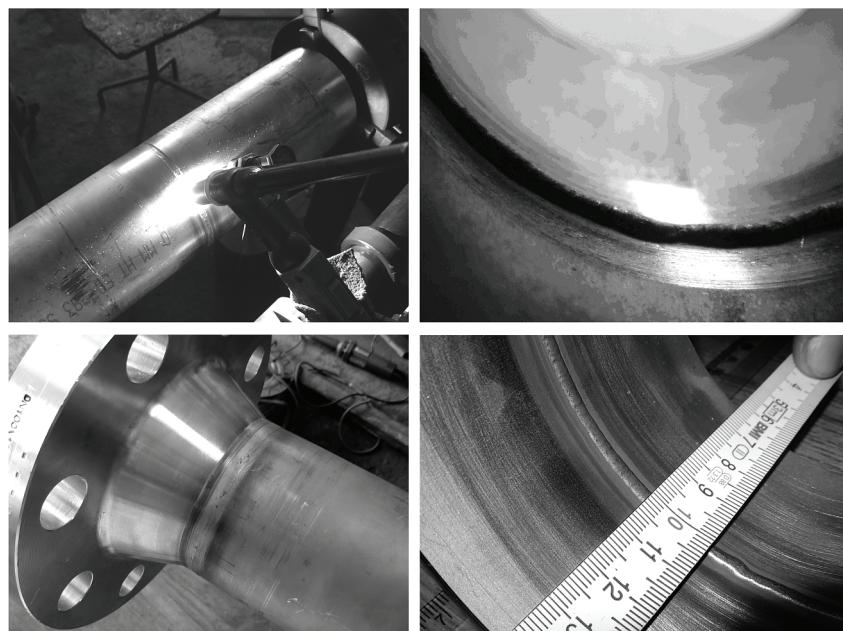
Pri zavarivanju gorionik i elektroda miruju, dok se cijev okreće oko svoje podužne osi. Zavarivanje se izvodi u uvjetima gdje nema značajnog strujanja zraka. Ukoliko je potrebno, radno mjesto se može zaštiti zastorima stvarajući kabinske uvjete zavarivanja, što u ovom slučaju nije bilo neophodno.

Kod spojeva koji su blizu kraja cijevi, zaštita korijena je vršene direktnim upuhivanjem argona u kupku zavara s korijenske strane. Međutim, kod spojeva koji su udaljeni od kraja cijevi, neophodno je bilo vršiti punjenje cijevi argonom.

Parametri zavarivanja su:

- struja zavarivanja: $I_z = 95$ A
- napon električnog luka: $I_{el} = 9,65$ V
- dužina električnog luka: 1,5 mm
- struja II prolaza (ojačanja): $I_z = 80$ A.
- napon električnog luka II prolaza: $I_{el} = 10,2$ V
- dužina električnog luka II prolaza: ~3,5 mm
- brzina zavarivanja i postupka ojačanja: $v = 11,3$ cm/min
- vrijeme progrijavanja materijala: $t = 4$ sec
- promjer mlaznice (šobe): 11 mm
- zaštita Volframova elektrode: 10 l/min
- volframova elektrode: WT-20 (DIN 32528) - 2,4 mm na (-) polu.

U slučaju da pri kontroli spoja bude uočena greška, njeni otklanjanje se vrši bez razdvajanja cijevi ili žlijebljenja zavara, već se na tu zonu nanese sloj aktivirajućeg topitelja i konvencionalnim TIG postupkom izvršiti pretapanje, bez upotrebe dodatnog materijala.



Slika 6. Izrada zavarenih spojeva

5. ISPITIVANJE ZAVERENIH SPOJEVA

Prema zahtjevima naručioca, predviđena je:

- Vizualna kontrola u opsegu 100 % prema standardu SRPS ISO 5817/03
- Radiografska kontrola u opsegu 100 % prema standardu EN 1435-class A

- Kontrola penetrantima u opsegu 100 % prema standardu SRPS ISO 5817/03.

Za radiografsku kontrolu korišten je industrijski rentgen Baltpost 300 kV, a kao defektoskop Gamavolt SU 50, energije γ zraka (izotop Ir₁₉₂) 0,6 MeV. Ocjenjivanje filmnova se provodi prema standardu EN ISO 5817 i EN 12517 sa zahtijevanom klasom B. Svi zavareni spojevi su ocijenjeni kao prihvatljivi [19].

U tablici 4. prikazana su dobivena mehanička svojstva materijala 316L za osnovni metal (OM), metal šava (MŠ) i zavareni spoj kao cjelini.

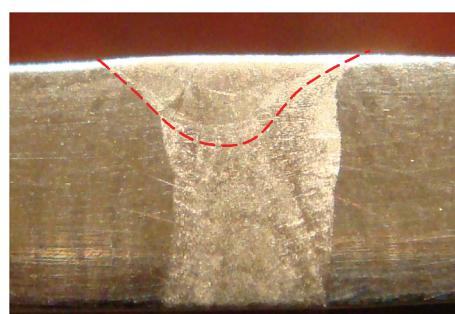
Tabela 4. Mehanička svojstva zavarenog spoja

Ispitivanje	R_m , N/mm ²	$R_{p0,2}$, N/mm ²	A_s , %	Z , %	Mjesto prekida
OM	582,51	237,81	58,88	70,58	-
Zavareni spoj	579,20	324,83	47,56	67,20	osnovni materijal
MŠ	599,40	430,92	20,35	34,37	linija stapanja



OM MZ zavareni spoj

Slika 7. Ispitivane epruvete na kidanjem



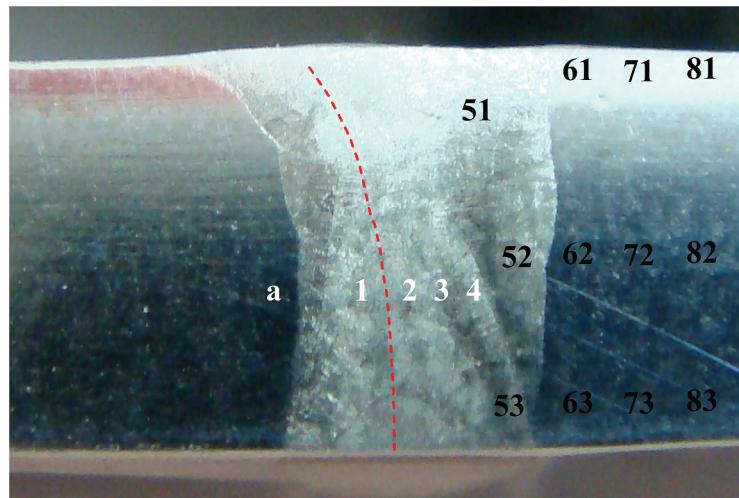
Slika 8. Mikroizbrusak zavarenog spoja čelika 316L ATIG postupkom

Na slici 8 prikazan je makroizbrusak zavarenog spoja čelika 316L nakon postupka slobodne kontrakcije, a na slici 9 prikazane su zone metalografske analize zavarenog spoja, čiji su nalazi dani na slici 10.

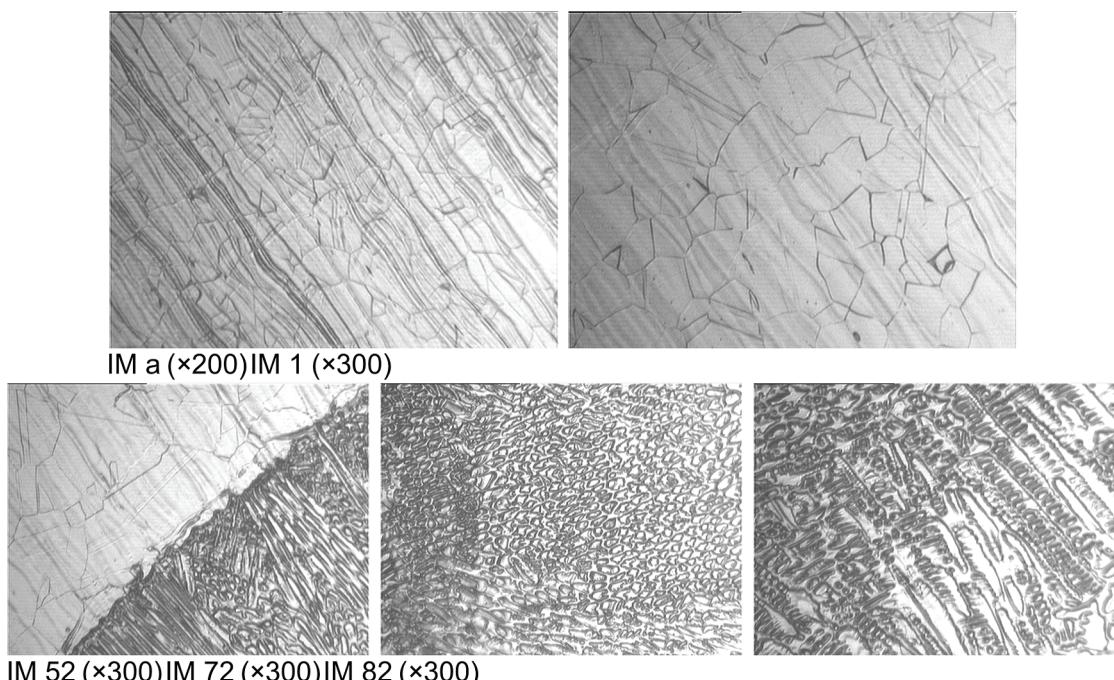
Ispitivanje žilavosti je izvršeno na Sharpijevom batu (tablica 5), sa V2 epruvetama.

Ispitivanje mikrotvrdoće (slika 11) izvršeno je po srednjoj horizontalnoj liniji uzorka s opterećenjem od 1000 g i povećanjem $\times 100$.

Po završetku svih zavarivačkih i montažnih radova, izvršeno je ispitivanje zaptivenosti. Nije bilo curenja, a cjevovod, nakon godinu dana eksplotacije funkcioniра bez bilo kakvih problema.



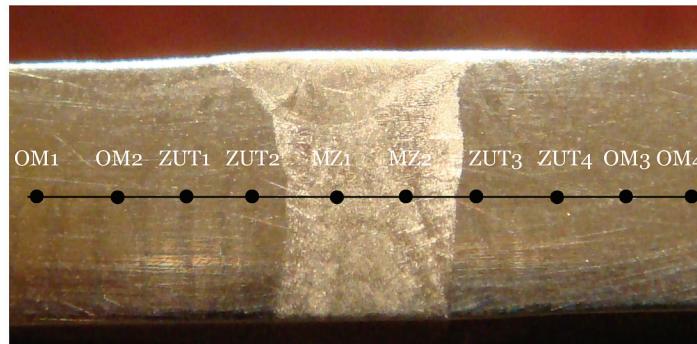
Slika 9. Metalografska analiza zavarenog spoja čelika 316L ATIG postupkom



Slika 10. Mikrosnimci ispitivanih mesta (IM) zavarenog spoja

Tablica 5. Određivanje udarne žilavosti

Položaj V2 zareza	Vrijednost KV, J/cm ²	Ispitna temperatura
OM	229,93	+20 °C
Linija stapanja (LS)	258,93	
Središnja linija zavara (MZ)	238,99	



Zona ispitivanja	OM1	OM2	ZUT1	ZUT2	MZ1	MZ2	ZUT3	ZUT4	OM3	OM4
Mikrotvrdoca, HV	155	154	171	170	235	245	173	179	152	150

Slika 11. Mjerene mikrotvrdoce

6. ZAKLJUČAK

Primjena ATIG postupka pri zavarivanju cijevi u HE Bajina Bašta pokazala se kao opravdana po više aspekata: kvaliteta spojeva, vremena potrebnog za završetak radova i ukupne cijene koštanja. Nije bilo pripreme (skošavanja) stranica spoja, utroška dodatnog zavarivačkog materijala osim topitelja 5 gr/m zavara, a u potpunosti je eliminiran utjecaj zavarivača na kvalitetu zavarenih spojeva. Visoka kvaliteta ostvarenih zavarenih spojeva, preporučila je ATIG postupak zavarivanja i pri izradi dva cjevovoda u ovoj hidroelektrani tokom 2011. godine.

7. LITERATURA

- [1] Anderson P., Wiktorowicz R., "Improving productivity with ATIG welding", www.airproducts.com/maxx/tach.asp
- [2] Bajić, D., "Istraživanje mogućnosti zavarivanja sklopova energetske opreme korišćenjem aktivirajućeg topitelja", Doktorska disertacija, Podgorica, 2003.god.
- [3] Bajic, D.R., Savitsky M.M., Melnichuk G.M. and Lusan A.F., "A-TIG welding of structural steels for power engineering applications", The Paton Welding Journal №9, 2002, Page 30-34, The PATON WELDING JOURNAL Monthly scientific-technical and production journal, ISSN: 0957-798X.
- [4] Bajic, D. R., Melnichuk G. M., Lusan A. F. and Savitsky M. M., "Procedure and parameters of A-TIG welding of structural steels", The Paton Welding Journal №10, 2002, Page 31-34, The PATON WELDING JOURNAL Monthly scientific-technical and production journal, ISSN: 0957-798X.
- [5] Bajić, D., Савицкий, М. М., Blečić, Ž., "Prednosti zavarivanja čelika postupkom A-TIG", Zavarivanje i zavarene konstrukcije, Vol.46, 4/2001, Str.149-154.
- [6] Bajić, D., Мельничук, Г. М., Лупан, А. Ф., Савицкий, М. М., Blečić, Ž., "Zavarivanje čelika tipa 18.10 primjenom ATIG-postupka", Zavarivanje i zavarene konstrukcije, №1, 2003. Str. 9-13.
- [7] Bajić, D., Bajić, B., Orban, J., Domijan, S., "Zavarivanje toplopostojanih visokolegiranih austenitnih hrom-nikal čelika postupkom ATIG", Slovensko varilstvo v evropski skupnosti in v scetu – Dosežki in izzivi, Ljubljana, 20.maj 2004.godine, Str.189-202.

- [8] Bajić, D., "TIG Welding of high-alloy austenitic steels" 14th Plant Engineering Conference, September 9-10, 2008. Hungary.
- [9] Fan D., Zhang R., Gu Yufen., Ushio M.: Effect of Flux on ATIG Welding of Mild Steels, Transactions of JWRI, Vol.30, 2001., №1, Joining and Welding research Institute Osaka University – Japan.
- [10] Lucas W., Howse D.: Activating flux – increasing the performance and productivity of the TIG and plasma processes, Welding&Metal Fabrication, №11, 1996., Str.11-17.
- [11] Lucas W.: Activating flux – improving the performance of the TIG process, Welding&Metal Fabrication, №2, 2000., Str.7-10.
- [12] Макара А. М., Кушниренко Б. Н., Замков В. Н.: Аргоно-дуговая сварка высокопрочных сталей мартенситного класса с применением флюса, Автоматическая сварка, №7, 1968., Str.73-74.
- [13] Патон Б. Е., Замков В. Н., Прилуцкий В. П., Порицкий П. В.: Контракция дуги флюса при сварке вольфрамовым электродом в аргоне, Автоматическая сварка, №1, 2000., Str.3-9.
- [14] Paskell T., Lundin C., Castner H.: GTAW Flux Increases Weld Joint Penetration, Welding Journal, april 1997., Str.57-62.
- [15] М. М. Савицкий; А. М. Савицкий; Д. Бадић; Џ. Блещић: "Tehnologija MIG zavarivanja korišćenjem aktivirajućih topitelj", Zavarivanje i zavarene konstrukcije, Vol.49, №1,
- [16] Савицкий М. М., Кушниренко Б. Н., Лупан А. Ф., Мельник А. Д.: Особенности формирования шва при сварке по активирующему флюсу, Автоматическая сварка, №2, 1981., Str.18-21.
- [17] Савицкий М. М., Лупан А. Ф., Мельничук Г. М., Олейник О. И.: Способы применения активаторов для сварки сталей в инертном газе, Автоматическая сварка, №3, 2000., Str. 48-49.
- [18] Савицкий М. М., Кушниренко Б. Н., Олейник О. И.: Особенности сварки сталей вольфрамовым электродом с активирующими флюсами (АТИГ-процесс), Автоматическая сварка, №12, 1999., Str.20-28.
- [19] Izvještaj Br. 257/RT/10 o radiografskom ispitivanju, Institut Goša, Zavod za ispitivanje i kontrolu, avgust 2010. godine.