



## ZAVARIVANJE LEGURE ALUMINIJA TIJEKOM IZGRADNJE POSTROJENJA ZA SEPARACIJU ZRAKA

## WELDING OF ALUMINIUM ALLOYS DURING CONSTRUCTION PLANT AIR-SEPARATING

Radomir JOVIČIĆ<sup>1)</sup>, Aleksandar SEDMAK<sup>1)</sup>, Radica PROKIĆ CVETKOVIĆ<sup>2)</sup>,  
Olivera POPOVIĆ<sup>2)</sup>, Meri BURZIĆ<sup>1)</sup>, Katarina JOVIČIĆ<sup>3)</sup>

**Ključne riječi:** postrojenje za separaciju zraka, zavarivanje legure aluminijska

**Key words:** air separation plants, welding aluminum

**Sažetak:** Godine 2005. i 2006. u Republici Srbiji izgrađeno je postrojenje za separaciju zraka. Najvažniji dio postrojenja su dva stupca, visine po 64 m, u kojima se nalazi više posuda pod tlakom međusobno povezanih cjevovodima. Posude i svi cjevovodi izrađeni su od legure aluminijska. Sva oprema izrađena je kod proizvođača u NR Kini. Zbog velikih gabarita neke su posude na mjesto montaže dopremljene u dijelovima te su spajane zavarivanjem. U ovom radu prikazano je zavarivanje i ispitivanje montažnih zavarenih spojeva. Ukazano je na probleme koji su posljedica zavarivanja legura aluminijska u uvjetima montaže i pokazano kako se takvi problemi rješavaju sve u cilju postizanja potrebne kvalitete zavarenih spojeva.

**Abstract:** Year 2005. and 2006. in the Republic of Serbia, built the plant for air separation. The most important part of the plant are two columns, 64 m altitude, where there is more pressure vessels connected by pipelines. Containers and all pipelines are made of aluminum alloy. All equipment is made by the manufacturer in the People's Republic of China. Because of the large dimensions of some of the containers to the place of installation transported in sections that are connected by welding. This paper shows the welding assembly and testing of welded joints. They pointed to problems resulting from welding of aluminum alloys in terms of installation, and shows how to that problems are solved in order to achieve the required quality of welded joints.

---

<sup>1)</sup> Inovacioni centar Mašinskog fakulteta u Beogradu, Kraljice Marije 16. Beograd, Srbija

<sup>2)</sup> Mašinski fakultet, Univerziteta u Beogradu, Kraljice Marije 16. Beograd, Srbija

<sup>3)</sup> Tehnološko metalurški fakultet, Univerziteta u Beogradu, Karnedžijeva 4, Beograd, Srbija

---



## 1. UVOD

U postrojenjima koja su predmet ovog rada, za separaciju zraka se koristi kriogena metoda. Ona se zasniva na prevođenju zraka u tekuće stanje i zatim njegovom razlaganju na dušik, kisik i argon, zahvaljujući različitim točkama vrelišta ovih plinova. Kriogeno razlaganje zraka je princip koji se koristi u više tipova postrojenja. Postrojenje o kojemu je ovdje riječ je tipa AIR SEPARATION UNIT (ASU). Značajke su: veliki kapacitet, plinovi visokih čistoća, istovremeno se proizvodi kisik, dušik i argon, a postoji mogućnost prevođenja plinova u tekuće stanje.

Proces razlaganja zraka u postrojenju tipa ASU se sastoji od kompresije, predhlađenja, pročišćavanja, pothlađivanja i razlaganja. Zrak se komprimira turbokompresorima koji imaju kapacitet od 100.000 Nm<sup>3</sup>/h. Predhlađenje se odvija u skruberima u kojima se zrak hladi vodom i istovremeno pročišćava od čestica, npr. prašine. Pročišćavanje zraka se odvija u molekularnim sitima koja su ispunjena aktivnim tvarima (silika gel, zeolit i aktivni ugljik) koja zadržavaju ugljični dioksid, ugljikovodike i vlagu. Pothlađivanje se izvodi umjerenim povećanjem tlaka, hlađenjem u izmjenjivačima i zatim naglim hlađenjem ekspanzijom sabijenog zraka. Ova faza se ponavlja više puta tako da je u svakom sljedećem ciklusu zrak sve hladniji.

Na ovaj način zrak se na kraju faze pothlađivanja ohladi do oko -170 °C. Razlaganje tj. rektifikacija zraka se izvodi u stupcima. Postrojenje o kojemu je ovdje riječ ima dva rektifikacijska stupca postavljena jedna na drugu. Donji stupac radi na tlaku oko 5 bara, a gornji na tlaku od 1 bara. Produkti razlaganja su plinoviti i tekući: dušik ( $T_{\text{ključ. N}_2} = -196 \text{ °C}$ ), kisik ( $T_{\text{ključ. O}_2} = -183 \text{ °C}$ ) i argon ( $T_{\text{ključ. Ar}} = -186 \text{ °C}$ ), [1].

U okviru ovog postrojenja napravljena su dva identična nova postrojenja ASU II i ASU III. Ona zajedno sa postrojenjem ASU I, koje je na istoj lokaciji izgrađeno 70-tih godina prošlog stoljeća, imaju kapacitet koji je trenutno najveći kapacitet ovog tipa u Europi.

## 2. REKTIFIKACIJSKI STUPCI

U ovom radu biti će riječi samo o izgradnji rektifikacijskih stupaca. S obzirom na jako niske radne temperature (-170 do -196 °C) i niske radne tlakove (1 do 2 bara) za izradu samih stupaca i cjevovoda koji ih povezuju odabrana je legura AlMg4,5Mn. Da bi postrojenje moglo raditi na ovako niskim temperaturama mora biti jako dobro toplinski izolirano. Zbog toga su stupci s pripadajućim cjevovodima smješteni u "kutije" – Cold box, izrađene od niskougljičnog čelika, koje su nakon montaže i ispitivanja cijelog postrojenja napunjene termoizolacijskim materijalom.

Stupci i cjevovodi su izrađeni u NR Kini. Zbog gabarita oni su na mjesto montaže dopremljeni u dijelovima koji su u Republici Srbiji spojeni zavarivanjem. Na slici 1. vide se dijelovi stupaca. S obzirom na dugotrajan transport i mogućnost zaprljanja stupaca, njihove čeonu stranu i mjesta za priključenje cjevovoda zaštićeni su zavarenim poklopcima. Također, unutrašnjost stupaca ima mali nadtlak dušika, što se kontrolira preko manometara, slika 1. Sitniji dijelovi kao što su dijelovi cjevovoda dopremljeni su u kontejnerima. Cjevovodi većih promjera izrađeni su od šavnih cijevi koje su već djelomično zavarene kod proizvođača. Na slici 2. vidi se donji dio stupca postavljen u Cold box, koji je u početnoj fazi montaže.

## 3. ZAVARIVANJE

Postrojenja ASU II i ASU III je montirala tvrtka iz NR Kine, sa svojim inženjerima i djelatnicima. Ovaj posao je bio prvi posao ove tvrtke u Europi, pa se zato prije početka radova moralo provjeriti osoblje i procedure zavarivanja i ispitivanja zavarenih spojeva, a temeljem propisa koji važe u Europi, pa time i u Republici Srbiji.



Slika 1. Dijelovi rektifikacijski stupaca prije montaže



Slika 2. Donji dio stupca postavljen u Cold box

Stručna osposobljenost zavarivača je provjerena prema standardu SRPS EN 287 – 2. Tvrtka je raspolagala s ukupno šest zavarivača od čega su dvije bile žene, slika 3. Tokom rada se pokazalo da one zavaruju spojeve sa najmanje grešaka, zbog čega je tokom daljnje montaže zavarivanje najodgovornijih spojeva povjeravano njima. Tehnologije zavarivanja su kvalificirane prema standardu SRPS EN 288 – 4. Uobičajeno je da se uzorci za kvalificiranje tehnologija zavarivanja zavaruju u radioničkim uvjetima. Međutim, uzorci za kvalificiranje tehnologija zavarivanja primijenjenih na ovim postrojenjima su zavareni na samoj konstrukciji, slika 3. Na taj način je bilo moguće provjeriti utjecaj čimbenika kao što su stabilnost struje napajanja, stabilnost napajanja zaštitnim plinom, rad na otvorenom i rad na visini na kvalitetu zavarenih spojeva. Ovi faktori mogu bitno pogoršati kvalitetu zavarenih spojeva, a pri zavarivanju ispitnih uzoraka u radionici njihov utjecaj ne može se registrirati.



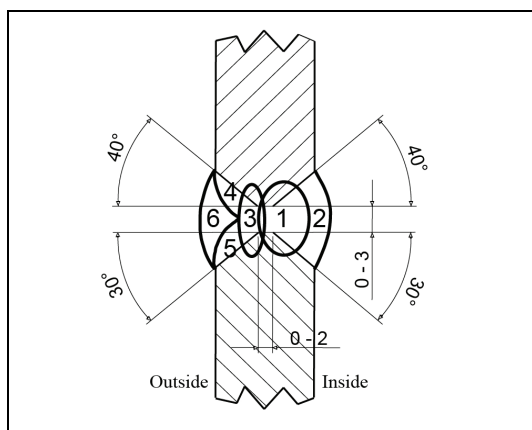
Slika 3. Zavarivanje ispitnog uzorka



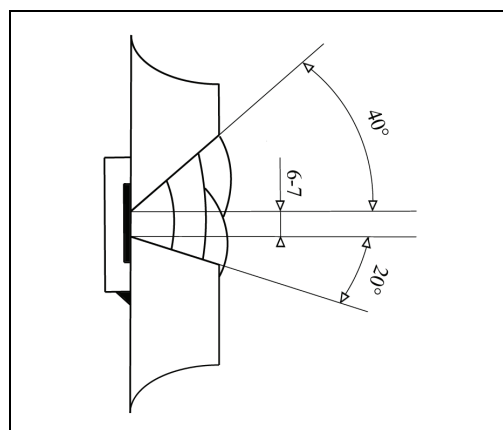
Slika 4. Priprema žlijeba na donjem dijelu stupca

Da bi se sastavili dijelovi stupaca na svakom od postrojenja zavarena su po tri spoja. Stupci imaju promjere 2 i 3 m i debljinu stjenke 14 mm, a izrađeni su od legure AlMg4, 5Mn. Jedan od tri spoja je pristupačan i sa unutrašnje i vanjske strane stupca, dok su preostala dva pristupačna samo sa vanjske strane. Oblici spojeva primijenjenih za zavarivanje vide se na slikama 5. i 6. Za zavarivanje je primijenjen TIG postupak u zaštiti argona. Kao dodatni materijal korištena je žica AlMg4, 5Mn. Detalji o postupku zavarivanja su dati u literaturi [2].

Rečeno je da su čeone strane dijelova stupaca zaštićene zavarenim limovima. Prije podizanja dijelova stupaca na mjesto montaže zaštitni limovi su odsijecani i istovremeno su pripremani rubovi spojeva za zavarivanje. Slika 4. pokazuje pripremu donjeg ruba žlijeba. Na slici se također vidi zaštitna folija koja sprječava upadanje nečistoća u donji dio stupca, koji je očišćen i definitivno pripremljen za rad kod proizvođača. S obzirom na ručni način pripreme, nije moguće dobiti rubove žlijeba potrebne točnosti, pa je bila nužna njihova dorada kada su dijelovi stupaca dovedeni u poziciju za spajanje.



Slika 5. Dvostrano zavareni spoj



Slika 6. Spoj sa podložnom trakom

Teško topivi oksid aluminija izaziva pogrešku naljepljivanja i dovodi do pojave nemetalnih uključaka u metalu šava (MŠ) [3]. Nečistoće i prije svega masnoće na površini osnovnog materijala (OM) i dodatnog materijala (DM) dovode do pojave poroznosti u MŠ [3]. Zbog toga je oksid aluminija uklanjao, s površine OM u okolici žljebova, najviše nekoliko sati prije početka zavarivanja i to mehaničkom obradom, glodalima. Za uklanjanje oksida i masnoća sa DM formirana je linija za kemijski tretman otopinom natrijeve lužine. U uvjetima rada na gradilištu postoje velike mogućnosti da se već očišćen DM zaprlja. Da bi se to spriječilo očišćene žice su pakirane u tekstilne tobolece, a zavarivači su koristili jeftine tekstilne rukavice koje su redovito mijenjane.

Slike 5. i 6. prikazuju dva tipa spojeva koji su zavareni na stupcima, jedan dvostrani i drugi jednostrani sa podložkom. Dvostrani spoj je zavaren tako da je prvo zavaren korijeni prolaz s unutrašnje strane stupca, a zatim je nakon čišćenja sa vanjske strane, spoj zavaren u potpunosti. Spojevi sa podložnom trakom su primijenjeni jer unutarnja strana stupaca na mjestima tih spojeva nije bila pristupačna. Podložna traka je napravljena od aluminijske trake sa žlijebom u kome se nalazila traka od austenitnog čelika, slika 6. Ova traka ima ulogu zadržati zaštitni plin u zoni korijena i formirati korijenu stranu spoja. Ona ne ulazi u sastav zavarenog spoja. Slitine aluminija imaju veliki koeficijent širenja zbog čega su sklone deformacijama pri zavarivanju [3].

Pri zavarivanju stupaca bilo je više popravaka i to uglavnom na dvostrano zavarenim spojevima, na oba postrojenja. Pri svakoj popravci javila se trajna lokalna deformacija zida stupca, koja se povećavala s povećanjem broja popravaka na istom mjestu. Na taj način je zaključeno: jedno mjesto dozvoljeno je popravljati maksimalno dva puta.

Cjevovodi su izrađeni tako da su njihove pojedine zavarene sekcije kod proizvođača dalje okrupnjavane u radionici na gradilištu, slika 7., a zatim su na samom postrojenju zavarivani montažni spojevi, slika 8.

Postrojenja imaju više desetaka cjevovoda različitih dimenzija. Montaža se odvijala tako da je istovremeno montirano više cjevovoda. Ovo je bilo moguće zahvaljujući tome što su oblici i

dimenzije (izometriji) svih cjevovoda bili poznati prije početka gradnje. Paralelna izrada više različitih cjevovoda je zahtijevala dobro osmišljen sustav obilježavanja sekcija cjevovoda i zavarenih spojeva na njima. Istovremeno sa izradom cjevovoda odvijala se i kontrola zavarenih spojeva metodama bez razaranja (IBR), pa je sustav za praćenje morao osigurati da svi spojevi budu prekontrolirani i da se neki spoj ne ugradi sa neprihvatljivim pogreškama. U svakom od postrojenja je zavareno po oko 2000 spojeva.



Slika 7. Zavarivanje dijela cjevovoda u radionici Slika 8. Zavarivanje montažnog spoja na cjevovodu

Svi spojevi na cjevovodima su zavareni sa podložnom trakom. Za zavarivanje primijenjen TIG postupak u zaštiti argona. Kao DM korištena je legura AlMg4, 5Mn. Detalji o postupku zavarivanja su dati u literaturi [4].

#### 4. ISPITIVANJE ZAVARENIH SPOJEVA

Potreban nivo kvaliteta zavarenih spojeva i vrste i obim njihovog ispitivanja metodama IBR definiran su i na temelju radnih tlakova i temperatura i predviđenog roka eksploatacije. Postrojenja rade na malim tlakovima i na vrlo niskim temperaturama i kada se puste u pogon predviđeno je da rade više godina bez zastoja.

Zavareni spojevi na stupcima su ispitani vizualno i penetrantima, a dvostrano zavareni spojevi i radiografski u opsegu 100 %. Najčešća greška u ovim spojevima bila je poroznost [2]. Osnovni uzroci pojave ove poroznosti su bili povremeno pogoršanje plinske zaštite MŠ, zbog rada na otvorenom i povremeno oslobađanje plinova iz OM tijekom zavarivanja.

Zavareni spojevi na cjevovodima su ispitani vizualno i radiografski u opsegu 100 %. Najčešće pogreške u ovim spojevima su bile poroznost, smaknuća, podlijevanja i nezavaren korijen [4]. Smaknuća su smanjivana tako što su u pojedine spojeve kombinirani dijelovi cjevovoda sa bliskim promjerima. Podlijevanja su nastajala na mjestima na kojima podložna traka nije dobro prijanjala na unutrašnju stranu cijevi. Pogreška se javljala na mjestima na kojima je postojala razlika u promjerima dviju cijevi u istom spoju. Poroznost je bila najčešća greška u zavarenim spojevima cjevovoda i nastajala je zbog povremene loše plinske zaštite MŠ, zbog rada na otvorenom.



## 5. ZAKLJUČAK

1. Nečistoće i oksidi na osnovnom i dodatnom materijalu lako dovode do pogrešaka u zavarenim spojevima legura aluminija. U uvjetima rada na otvorenom i pri montaži ovakve greške su još vjerojatnije. Pri montaži opisanih postrojenja navedene pogreške su svedene na minimum zahvaljujući kvalitetnoj kemijskoj pripremi dodatnog materijala, korištenju alata za obradu žljebova isključivo za obradu aluminija i zahvaljujući svijesti zaposlenih o potrebi održavanja čistoće (čiste tekstilne rukavice koje su redovito mijenjane, čista radna odijela, ne diranje očišćenih površina golim rukama, korištenje podloga i prostirki).
2. Primjena podložne trake od austenitnog čelika, koja je postavljena u žlijeb u aluminijskoj traci znatno pojednostavljuje postupak zavarivanja i smanjuje pojavu pogrešaka naročito u korijenom dijelu spojeva. Zbog primjene trake uglavnom je izostala potreba za pripajanjem, izostala je potreba za plinskom zaštitom korijena, olakšano je sklapanje pozicija i omogućeno je dobro formiranje korijene strane spoja.
3. Najčešća greška u zavarenim spojevima stupaca i cjevovoda je bila poroznost. U najvećem broju slučajeva poroznost je bila izazvana pogoršanjem plinske zaštite metala šava. Međutim, uočeno je da se poroznost pojavljivala i zbog oslobađanja plinova iz osnovnog metala tijekom zavarivanja.
4. Postrojenja su montirana tako da je istovremeno montirano više cjevovoda. Istovremeno sa izradom cjevovoda odvijala se i kontrola zavarenih spojeva metodama bez razaranja. To je zahtijevalo dobro organiziran sustav obilježavanja dijelova cjevovoda i zavarenih spojeva, da bi se osiguralo da svi spojevi budu kontrolirani i da se neki spoj ne ugradi sa neprihvatljivim pogreškama.

## 6. LITERATURA

- [1] Ljubiša Rašković, Osnovi kriogene tehnike. Akademski misao, Beograd (2005)
- [2] Elaborat o zavarivanju i ispitivanju montažnih spojeva na kolonama postrojenja ASU II, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2006.
- [3] B. Bajić: Elektrolučno zavarivanje u zaštiti inertnog i aktivnog gasa MIG-MAG, Gorenje Varstroj, Lendava, 1988.
- [4] Elaborat o zavarivanju i ispitivanju montažnih spojeva na cevovodima postrojenja ASU II, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2006.