Broj rada: 3.4
DOI: 10.65156/wws.sjdp.si.014

ZAVARIVANJE BAKARNIH ŠINA U HE BAJINA BAŠTA

WELDING OF COPPER RAILS AT HPP BAJINA BAŠTA

Mića Đorđević, diplomirani mašinski inženjer, ORCID broj: 0009-0005-7891-1853

"Tehweld" d.o.o. Loznica, Banjska br. 7, 15300 Loznica, Republika Srbija

tehweld@yahoo.com

Rezime:
U radu su dati opšti podaci o bakru kao i specifičnosti koje se javljaju pri zavarivanju. Zadatak je bio da se prvo izvrši rezanje Cu šina kako bi mogli da se izvade strujni namotaji – strujnjaci, a zatim postave novi. Dimenzija bakarnih šina je 25 x 200mm x *l*. Kroz navedeni presek prolazi struja jačine 16533 A i snage 315 000 KW. Agregat je izradila „Toshiba" iz Japana, 1982. god. Specifičnost ovog posla bila je u tome što je trebalo da se sačuva izolacija na šinama i strujnjacima. U isto vreme neophodno je da se Cu šina predgreva na 700^0C i da se vrši intenzivno hlađenje šine na udaljenosti oko 300mm od šava.
Zavarivanje je izvedeno poluautomatskim MIG-postupkom. Prostor gde se radilo je vrlo skučen što je dodatno otežavalo rad i zahtevalo ozbiljnu zaštitu zdravlja ljudi jer su isparenja bakra otrovna.
Nakon zavarivanja i brušenja površine i korena, zavarena mesta su ispitana penetrantima i ultrazvukom.

Ključne reči: zavarivanje bakra, predgrevanje, brušenje.

Abstract
The paper presents general data on copper as well as specific characteristics encountered during its welding. The initial task was to cut the copper (Cu) busbars in order to remove the existing current-carrying coils and install new ones. The dimensions of the copper busbars are 25 × 200 mm × *l*. A current of 16,533 A and a power rating of 315,000 kW pass through the specified cross-section. The generating unit was manufactured by Toshiba, Japan.
A specific challenge of this task was the requirement to preserve the insulation on both the busbars and the coils. Simultaneously, it was necessary to preheat the Cu busbar to 700 °C while intensively cooling it at a distance of approximately 300 mm from the weld seam.
Welding was carried out using a semi-automatic MIG process. The workspace was extremely confined, which further complicated the operation and demanded strict occupational health and safety measures due to the toxicity of copper fumes.
Following welding and the grinding of both the face and root of the weld, the joints were inspected using liquid penetrant and ultrasonic testing methods.

Keywords: copper welding, preheating, grinding.

1. UVOD

Osobine bakra

Posle srebra bakar je najbolji provodnik struje i toplote pa mu je najveća primena u elektrotehnici (Cu 99,5-99,9%) . Zbog navedenih osobina odvođenja toplote otežano je zavarljiv. Najčešće se zavarivanje vrši TIG i MIG-postupkom. Sa povećanjem debljine povećava se i problematika zavarivanja. Da bi zavarivanje bilo uspešno, bakar zahteva snažne uplive toplote i neophodno je da se primene neke mere.

Problematika zavarivanja

a) Osnovno je predgevanje. Bakar šest puta brže odvodi toplotu od čelika. Zbog toga nije dovoljna samo toplota koju ostvaruje električni luk, već je kod određenih debljina neophodno vršiti predgrevanje koje omogućava zajedno sa energijom električnog luka da se stvori neophodna zavarivačka kupka što je uslov za dobro kvašenje tj. zavarivanje bez nalepljivanja.

b) Problem stvaranja krupnih, usmerenih kristala koji su izduženi u pravcu odvođenja, širenja toplote. Zato predgrevanje, tj. unos toplote mora biti snažno i brzo.

c) Bakar u tečnom stanju lako upija kiseonik i vodonik.

d) Obrazovanje toplih i hladnih prslina (u zavisnosti od primesa)

Prostor u kome se vršilo zavarivanje je skučen i to je predstavljalo dodatni problem jer je poznato da su bakarna isparenja otrovna. Zbog toga se koristila specijalna maska sa filterima.

2. RAD

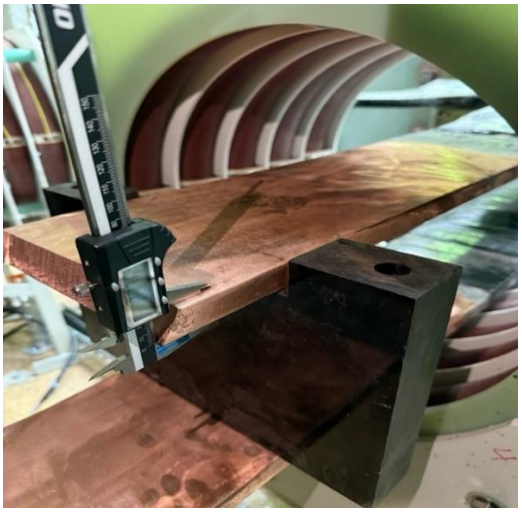
2.1. Priprema za zavarivanje

2.1.1. Električni provodnici, šine, su izrađene od elektrolitičkog bakra: Cu 99,9%. Na jednoj mašini postoje tri faze, a svaka faza ima dve šine dimenzija 25x200xL.

2.1.2. Da bi se izvršila zamena strujnih namotaja (strujnjaka) bilo je neophodno da se Cu šine preseku na najpovoljnijem mestu. Rezanje je izvršeno mehaničkim putem sa ručnim cirkularom i testerom sa tvrdim metalom (widiom).



Slika 1a) strujnjak



1b) prikaz Cu šine koja prolazi kroz strujnjak

Pri rezanju odmah je formiran žleb. Stranice su rezane pod uglom od 30^0 i tako je ostvaren žleb od 60̊ sa grlom žleba 3-4mm.



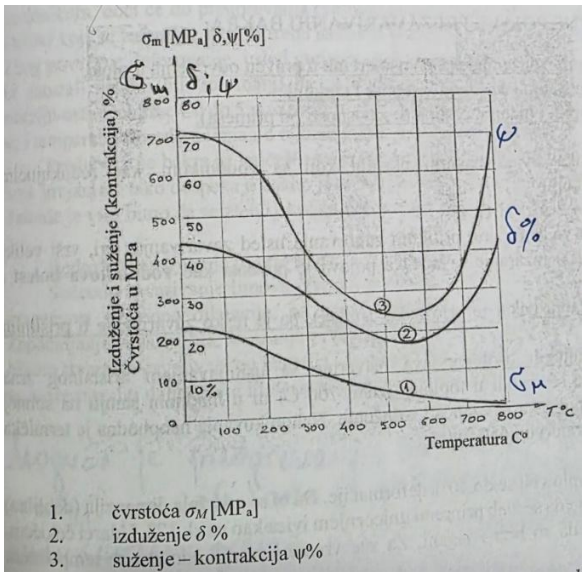
Slika 2. Pripremljen žleb sa podloškom od grafita

2.1.3. Po presecanju šina izvršena je zamena strujnih namotaja (strujnjaka, izvadili su se stari i zamenili novim) i pristupilo se pranju žleba alkoholom 70% nakon čega je moglo da se mehanički očisti žleb čeličnim četkama od inoxa.

2.1.4. Predgrevanje je vršeno butanom i kiseonikom sa dva snažna gorionika. Grejanje je bilo intenzivno kako bi vreme predgrevanja bilo što kraće da se ne bi stvarali previše krupni i usmereni – izduženi kristali. Temperatura od 700^0C postignuta je za desetak minuta. Na odstojanju od žleba levo i desno za oko 300mm bila je obmotana oko šine pamučna krpa koja je sve vreme grejanja i varenja polivana vodom da se spreči širenje toplote koja bi sagorela izolaciju.



Slika 3. a) i b) Predgrevanje i kontrola temperature



Slika 4. Uticaj temperature na mehaničke osobine bakra

2.2. Zavarivanje

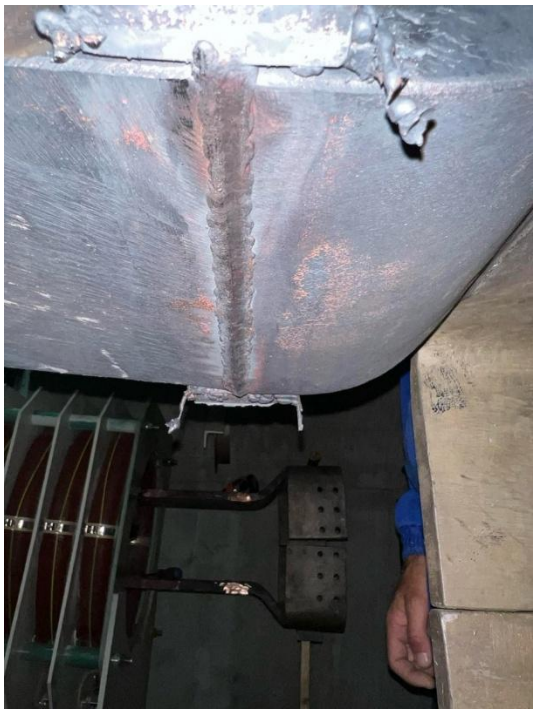
2.2.1. Formiran žleb je fiksiran uvodnim i izvodnim Cu pločicama debljine 5mm koje su privarene na hladno kratkim zavarima za Cu šine. Pločice nisu pružale neku čvrstoću, ali su zadovoljavale da se sa njih započne i završi koreni zavar. Koren je oblikovan kanalom u grafitu koji je bio podloga.



Slika 5. Zavarivanje



Slika 6. Maske za zavarivanje sa filterom



Slika 7. Izgled provara - korena



Slika 8. Završeno zavarivanje

2.2.2. Dodatni materijal

Kao dodatni materijal za MIG zavarivanje upotrebljena je žica MIG CuAg1 Ø 1,2mm. Srebro ima ulogu da usitnjava kristalno zrno i da bolje kvasi tj. razliva kupku. Ag u količini do 1% ima ulogu da usitnjava kristalno zrno i da bolje kvasi, tj. razliva kupku.

Tabela br. 1 Hemijski sastav žice (%)

Cu	Ag	P	Mn	Fe	**Ostali elementi**
Ostalo	1 ,0	< 0,04	< 1,0	< 0,03	< 0,50

Tabela br. 2 Mehaničke osobine čistog metala šava

	Napon tečenja R_p N/mm^2	Zatezna čvrstoća R_m N/mm^2	Izduženje A_5 %	Tvrdoća HB
MIG Cu Ag	> 80	> 200	> 20	200

Tabela br. 3 Parametri zavarivanja

R. br.	**Parametri**		**Koren**	**Popuna**
1.	T – predgrevanje	[^{0}C]	650-700	650-700
2.	Jz – struja zav.	[A]	240	275
3.	Uz – napon zavarivanja	[V]	24,2	26,5
4.	Vž – brzina žice	[m/min]	11,5	12
5.	Vz – brzina zavarivanja	[mm/s]	3,3	3,3
6.	Q – protok argona	[l/min]	15	15
7.	Prečnik žice Ø	[mm]	1,2	1,2

Zastitni gas: argon, Ar (I1 po EN 439).

2.2.2. Svaki zavar je očišćen četkanjem, dogrevan, prokivan kratko pneumatskim čekićem i tada je bilo spremno za zavarivanje drugog sloja.

Završni var je prokivan snažno čekićem, ručno. Na taj način je izvršena plastična deformacija vara u dubinu. Pošto je prokivanje izvršeno na vruće, nije bila potrebna operacija TO. Prokivanjem pneumatskim čekićem ne postiže se dubinska deformacija vara. tj. usitnjavanje zrna.

2.2.2.1. Prokivanje radi usitnjavanja kristalnog zrna

Bakar se prokiva ili na hladno, pa se vrši dogrevanje na 700-800^{0}C, ili na toplo što ne zahteva naknadno grejanje. U temperaturnom intervalu 350^{0}C do 650^{0}C ne sme da se vrši hladna deformacija tj. prokivanje što je vidljivo iz priloženog dijagrama (slika br.4). Struktura Cu je posle prokivanja i termičke obrade odžarivanja na 650^{0}C do 750^{0}C sitnozrna (kao valjana).

2.3. Brušenje zavara

Posle hlađenja (može i da se ubrza polivanjem vodom), vršeno je brušenje lica i korena zavara ručnim brusilicama uz upotrebu, prvo grubog, potom finog brusnog papira.



Slika 9 Izbrušen zavar

2.4. Kontrola zavara

Kontrola je obuhvatala:

- Vizuelni pregled: nije primećeno da ima zajeda
- Penetrantima: nije bilo identifikacija tipa pora niti prskotina



Slika 10 Primer Pt kontrole

Ultrazvukom je utvrđena homogenost, bez prisustva lunkera, pora, prskotina, nalepljivanja.



Slika 11. Kontrola ultrazvukom Krautkrämer USK7

3. ZAKLJUČAK

Zavarivanje je urađeno u kratkom roku. Kompletan posao je obavljen za četiri dana. Jedan dan za rezanje, dva dana za zavarivanje 6 spojeva i jedan dan za brušenje i kontrolu.

Najobjektivniji podatak o kvalitetu urađenog posla ogleda se u toku rada. Nakon puštanja mašine u rad nije ustanovljeno nikakvo dodatno zagrevanje na zavarenim mestima.

Deo izolacije na šinama je izgoreo i njega je trebalo naknadno izbrusiti kako bi se izvršila korektno kompletna izolacija.

Jedan agregat je rađen i zavarivan 2024. godine, a drugi 2025. godine.

LITERATURA

[1] Đorđević Mića, Priručnik za zavarivače, Drugo dopunjeno izdanje 2020., Tehweld doo Loznica, Srbija

[2] Stanković Vukosava, Mašinski materijali sa termičkom obradom I deo (1983), VTŠ, Novi Sad

[3] Katalog elektroda Jesenice, Elektrode Jesenice doo (2012.), Cesta Zelezarjev 8, Jesenice