

# METODOLOGIJA REPARATURNOG ZAVARIVANJA VRATILA TURBINA NA HIDROELEKTRANI ĐERDAP 2 BEZ DEMONTAŽE AGREGATA

Miodrag Arsić<sup>1\*</sup>, Brane Vistić<sup>1</sup>, Zoran Odanović<sup>1</sup>, Aleksandar Đorđević<sup>2</sup>, Zoran Savić<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut za ispitivanje materijala, Beograd

<sup>2</sup>Messer Tehnogas, Beograd

*Na deset hidro-generatorskih jedinica „Đerdap 2“ ugrađene su horizontalne Kaplan turbine, nominalne snage 28 MW, izrađene u Rusiji. Posle 163411h rada (približno 22 godine) došlo je do loma vratila turbine agregata A6 u zoni velike koncentracije napona, na mestu prelaznog radijusa R80 između prirubnice i glavčine radnog kola. To je bio povod da se izvrše ispitivanja, metodama bez razaranja (vizuelno ispitivanje, ispitivanje penetrantima, ispitivanje magnetnim česticama, ultrazvučno ispitivanje), zavarenih spojeva i osnovnog materijala vratila ostalih turbina. Tim ispitivanjima utvrđeno je da na svim vratilima u zoni prelaznih radijusa, po čitavom obimu vratila, postoji veliki broj površinskih prslina, koje su mogle odgovarajućim projektom tehnologije reparaturnog zavarivanja da se saniraju iako su pojedinačne prsline bile dužine do 430 mm i dubine do 20 mm. Šuplja vratila turbina izrađena su, zavarivanjem, iz tri dela i to cilindrični delovi od čelika 20GS, a prirubnički deo vratila i sama prirubnica od čeličnog liva 20GSL.*

*U cilju produženja radnog veka i ušteda na demontaži i montaži vratila turbina, razvijena je metodologija reparaturnog zavarivanja bez demontaže agregata. Metodologijom sanacije prslina na vratilima turbina je, zbog njihovog konstrukcionog rešenja i funkcije u eksploataciji, trebalo veliki broj detalja precizirati, pažljivo razmotriti i koordinisano izvršiti u cilju sigurnosti za njihovo ponovno korišćenje. Ukoliko bi se samo neki od ovih detalja prevideo, podcenio ili nepravilno sagledao, moglo bi doći do značajnih problema u radu kompletne turbine. U radu je, zbog specifičnosti sprovedene metodologije u sanaciji prslina, pored tehnologije zavarivanja data i procedura pripreme vratila sa redosledom izvođenja radova.*

**Ključne reči:** Vratila turbina, ispitivanja, prslina, metodologija reparaturnog.

## 1 UVOD

Na deset hidro-generatorskih jedinica „Đerdap 2“ ugrađene su horizontalne Kaplan turbine, nominalne snage 28 MW, izrađene u Rusiji, Slika 1 [1]. Projektovane su za radni vek od 40 godina. Ovako dug radni vek je predviđen obzirom na veličinu i konstrukciono rešenje, odnosno nemogućnos periodičnog ispitivanja i analize stanja.

Imajući u vidu da je zamor materijala započeo na mnogim delovima i konstrukcijama turbinske i hidromehaničke opreme izvršena su istraživanja uticaja režima opterećenja, radne sredine i vrste oštećenja na njihov integritet.

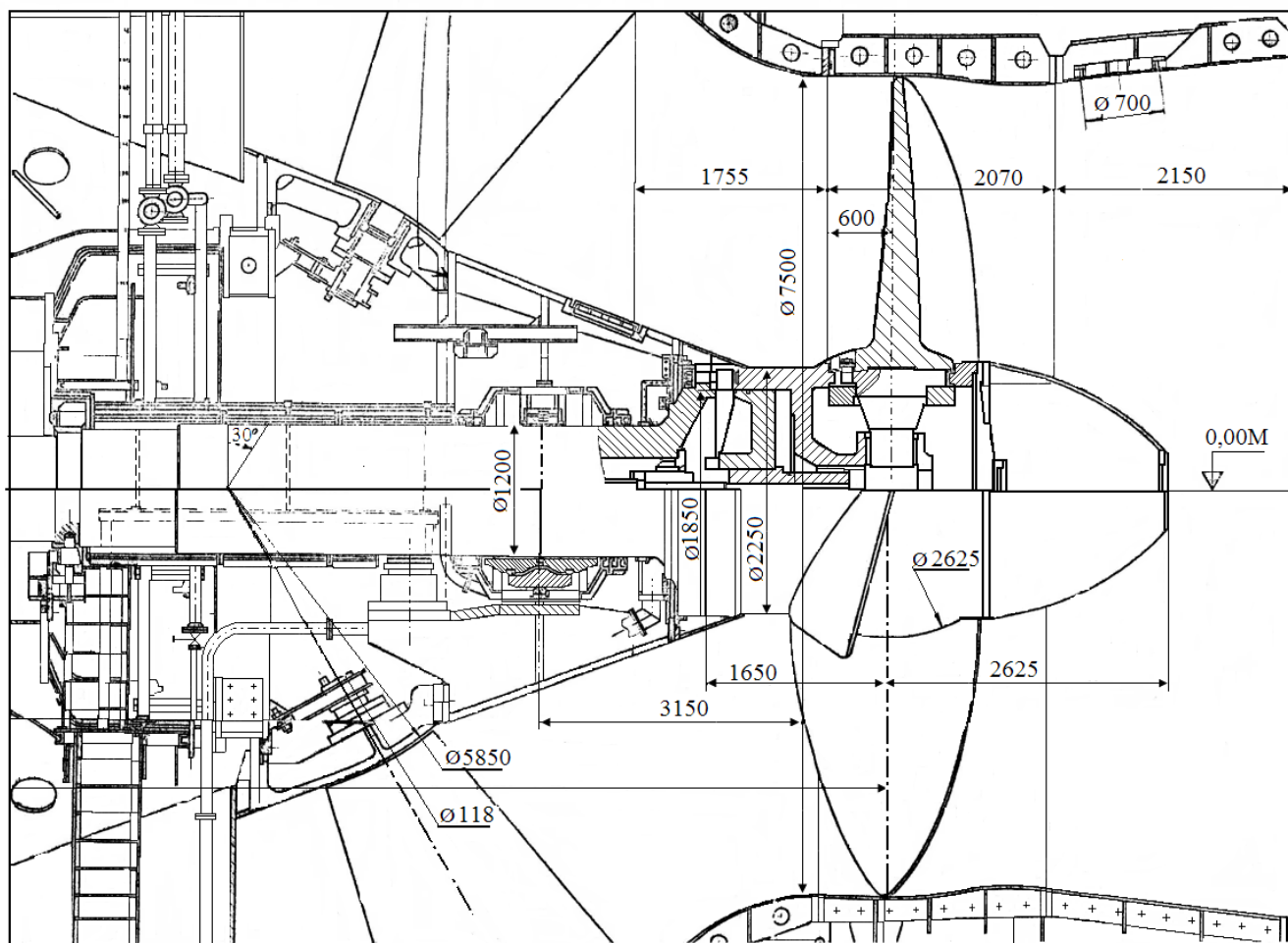
Povod za to je bio loma vratila turbine agregata A6 u zona velike koncentracije napona, na mestu prelaznog radijusa R80 između prirubnice i glavčine radnog kola, Slika 2 [2]. U toku eksploatacije vrtila turbine u uslovima visokocikličnog zamora u korozionoj sredini došlo je do pojave inicijalnih prslina, čijim spajanjem su nastale prsline dužine 20-30 mm, što potvrđuju prisutni produkti korozije na glatkoj površini preloma. Kada je noseća površina poprečnog preseka vratila turbine, u zoni rasta prslina, pala ispod kritične vrednosti došlo je do loma, u uslovima niskocikličnog zamora. Taj deo površine je reljefni i bez produkata korozije. Takođe, ispitivanjem vratila ostalih turbina utvrđene su prsline, razičith dužina i dubina, koje su mogle odgovarajućim projektom tehnologije reparaturnog zavarivanja da se saniraju. Šuplja vratila turbina izrađena su, zavarivanjem, iz tri dela i to

cilindrični delovi od čelika 20GS, a prirubnički deo vratila i sama prirubnica od čeličnog liva 20GSL.

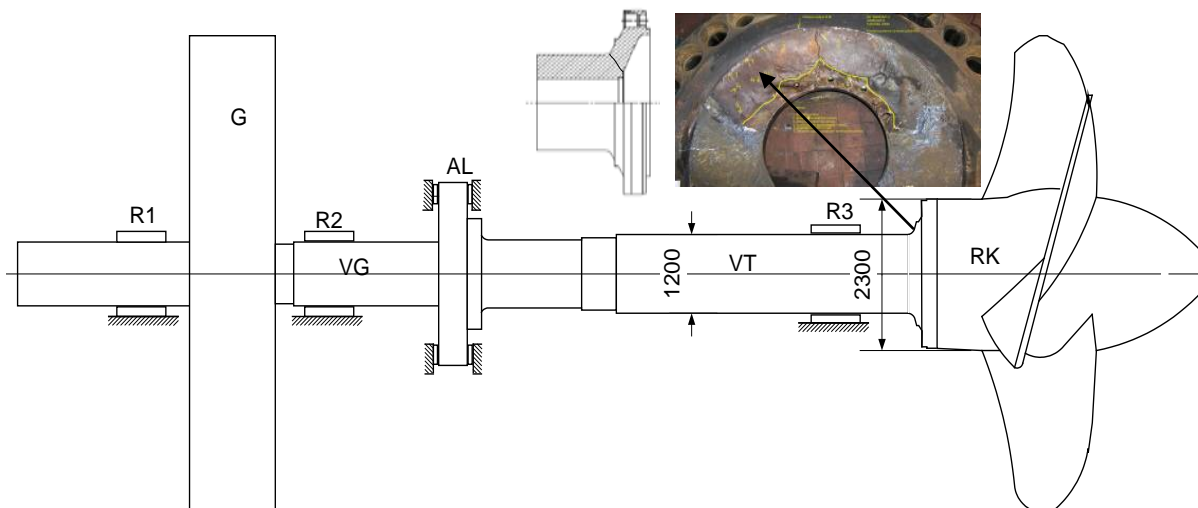
Osnovni parametri ugrađenih agregata PL-15/826-G-750 su: maksimalni napor - 12,75m, proračunski napor - 7,45m, minimalni napor - 5m, snaga turbine pri proračunskom naporu - 28MW, pečnik radnog kola - 7500mm, broj obrtaja - 62,5 min-1, broj lopatica radnog kola - 4, a osnovni delovi: G - rotor generatora, VG - vratilo generatora, VT - vratilo turbine, RK - radno kolo, R1, R2 i R3 - radijalni ležaji, AL - aksijalni ležaj, Slika 2.

Šuplja vratila turbina izrađena su, zavarivanjem, iz tri dela i to cilindrični delovi od čelika 20GS, a prirubnički deo vratila i sama prirubnica od čeličnog liva 20GSL. Spoljnji prečnik vratila je  $D = 1200$  mm, a unutrašnji  $d = 1200$  mm.

Metodama bez razaranja (vizuelno ispitivanje, ispitivanje penetrantima, ispitivanje magnetnim česticama, ultrazvučno ispitivanje) utvrđeno je da na svim vratilima u zoni prelaznih radijusa, po čitavom obimu vratila, postoji veliki broj površinskih prslina. Prostiranje prslina na prelaznom radijusu vratila turbine, jednog od agregata (agregat A8), utvrđeno vizuelnim ispitivanjem prikazano je na Slici 3, penetrantima na Slici 4 i magnetnim česticama na Slici 5. Ultrazvučnim ispitivanjima izmerene su dubine prslina od 4 - 20 mm.



Sl. 1 Prikaz horizontalne Kaplan turbine, nominalne snage 28 MW



Sl. 2 Prikaz osnovnih delova agregata PL-15/826-G-750 i detalja loma vratila

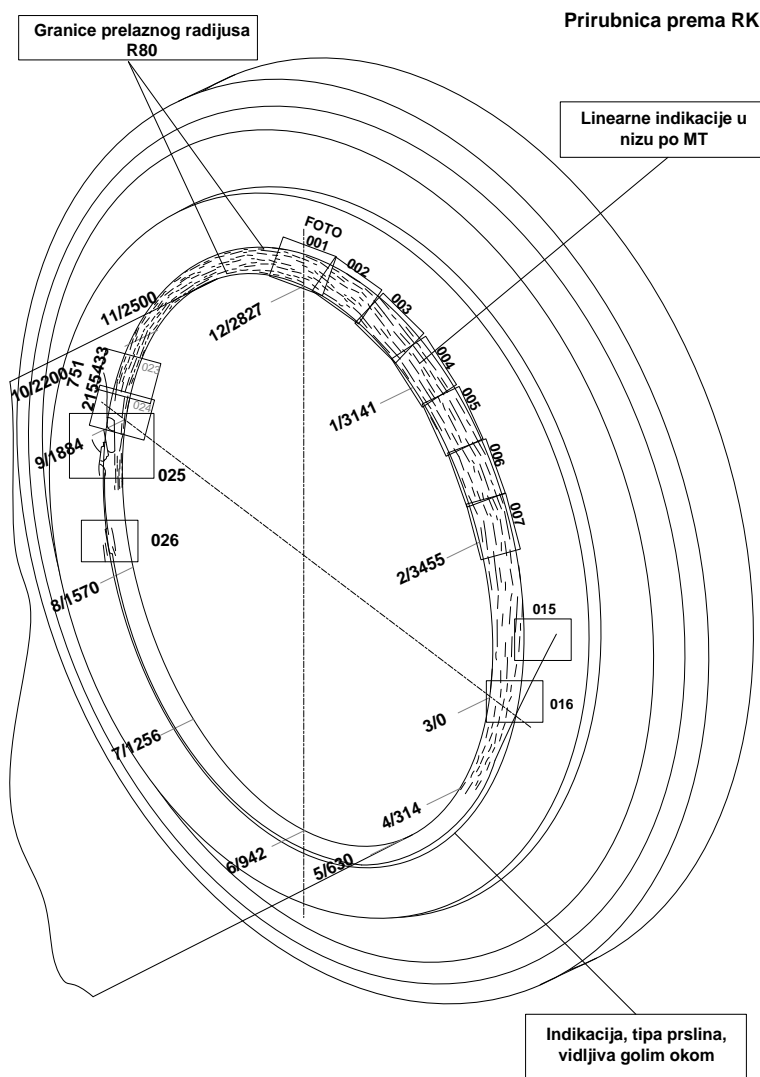


Tabela 1. *Hemijski sastav, vrednosti u (% mase)*

Materijal vratila		Hemijski sastav u % mase							
Standard GOST 977-75		C	Si	Mn	P <sub>max</sub>	S <sub>max</sub>	Cr	Ni	Cu
Čelik	20 GS	0.16-0.22	0.60-0.80	1.00-1.30	0.030	0.030	< 0.30	< 0.30	< 0.30
Čelični liv	20 GSL								

Tabela 2. *Mehaničke osobine, vrednosti za normalizovano i otpušteno stanje*

Materijal vratila		Mehaničke osobine u normalizovanom i otpuštenom stanju				
Standard GOST 977-75		Granica tečenja Re <sub>min</sub> , [N/mm <sup>2</sup> ]	Zatezna čvrstoća Rm <sub>min</sub> , [N/mm <sup>2</sup> ]	Izduženje Z <sub>min</sub> , [%]	Suženje A <sub>min</sub> , [%]	Žilavost KCU <sub>min</sub> , [J/cm <sup>2</sup> ]
Čelik	20 GS	275	470	16	-	39
Čelični liv	20 GSL					

## 2.2. Pripremni radovi za izvođenje reparaturnog zavarivanja

Obzirom da samo demontaža i ponovna montaža vratila višestruko nadmašuje cenu novog vratila metodologijom sanacije prslina bez demontaže je, zbog njihovog konstrukcionog rešenja i funkcije u eksploataciji, trebalo veliki broj detalja precizirati, pažljivo razmotriti i koordinisano izvršiti u cilju sigurnosti za njihovo ponovno korišćenje. Ukoliko bi se samo neki od ovih detalja prevideo, podcenio ili nepravilno sagledao, moglo bi doći do značajnih problema u radu kompletne turbine. Ograničavajući faktori pri izradi projekta popravke bili su blizina radijalnog ležaja, jako ograničen prostor i velika težina vratila.

U okviru pripremnih radovi za izvođenje reparaturnog zavarivanja treba uraditi sledeće:

- demontažu zaptivače,
- demontažu segmenata radijalnog ležaja R3,
- zatvaranje radijalnog ležaja i potpuno zaptivanje uljne kade silikonskim kitom,
- podizanje vratila hidrauličkom dizalicom,
- postavljanje metalnih platformi, u zoni ispod vratila, za lakši pristup prelaznom radijusu,
- delimično rasterećenje zone radijusa podmetanjem klinova ispod lopatica radnog kola.
- montažu užeta za okretanje radnog kola uz pomoć dizalice 2500+500 kN,
- uklanjanje svih zapaljivih predmeta i materija iz zone obavljanja posla,
- obezbeđenje mere protivpožarne zaštite u zoni rada,
- obezbeđenje sredstava zaštite na radu,
- obezbeđenje dovoda svežeg vazduha u zoni rada, min 20 izmena po času,
- obezbeđenje odvoda gasova iz zone iznad ležaja, min 200 m<sup>3</sup>/h,
- obeležavanje zona na prelaznom radijusu 0, 200, 400, 600, 800... 3768 mm,
- izradu šablona R80 i R90, od lima debljine 1 mm, za kontrolu geometrije prelaznog radijusa.

## 2.3 Redosled izvođenja reparaturnih radova

Potreban je sledeće redosled izvođenja reparaturnih radova:

- postavljanje repera za kontrolu deformacija vratila,
- čišćenje površine prelaznog radijusa, cilindričnog dela vratila i konusnog dela prirubnice od antikokorozione zaštite (AKZ) i produkata korozije, u zoni 1/3 dužine sa širinom od po 50 mm,
- ispitivanje očišćene zone prelaznog radijusa magnetnim česticama,
- obeležavanje deonica sa greškama,
- zaštita cilindrične površine vratila aluminijumskim limom debljine 1mm,
- brušenje mesta sa greškama do potpunog uklanjanja svih prslina,
- oblikovanje izbrusaka, u cilju uklanjanja oštih ivica i pripreme za zavarivanje,
- završno ispitivanje izbrušanih mesta magnetnim česticama,
- uzimanje podataka o izbrušanim mestima: položaj, širina, dužina, dubina, zapremina,
- zavarivanje izbrušanih mesta austenitnim dodatnim materijalom uz iskivanje svakog sloja pneumatskim čekićem sa zaobljenim vrhom R 5-R 8mm,
- oblikovanje navarenog materijala ravnim brusilicama uz korišćenje šablona,
- ispitivanje navara penetrantima,
- u slučaju zadovoljavajućih rezultata ispitivanje penetrantima, obrada šire zone radijusa uzduž vratila, grubim i finim lepezastim šmirglama,
- zaštita feropksom zone obrađene lepezastim šmirglama,
- oslobađanje radnog kola i vratila,
- okretanje vratila za 1/3 kruga,
- ponavljanje postupka do potpunog završetka sanacije grešaka, po čitavom obimu.

## 2.4. Ispitivanje zone prelaznog radijusa metodama bez razaranja pre reparaturnog zavarivanja

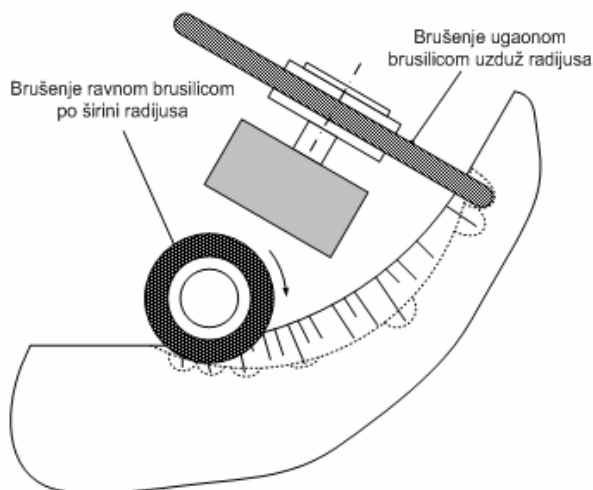
Površine prelaznog radijusa i okolne zone treba ispitati magnetnim česticama u obimu 100%, u saglasnosti sa standardom EN 10228-1:1999 - Deo 2, posle uklanjanja slojeva antikorozivne zaštite i nastalih produkata korozije mehaničkim putem i odmašćivanja. Prsline nisu dozvoljene.

## 2.5. Uklanjanje otkrivenih grešaka

Uklanjanje otkrivenih grešaka, kao i priprema površina za ispitivanje, zahteva zaštitu radijalnog ležaja turbinskog vratila od prodora čestica brusnog materijala i metala vratila. To se može ostvariti u uslovima zatvorenog ležaja uz potpuno zaptivanje uljne kade silikonskim kitom.

Površinske greške, otkrivene magnetnim česticama, neophodno je odstraniti brušenjem, Slika 6, na sledeći način:

- zone sa pojedinačnim izduženim greškama brusiti uzduž prelaznog radijusa, malom ugaonom brusilicom (600-1400W),
- zone sa greškama koji se prostiru paralelno, na bliskom rastojanju, brusiti upravno na osu grešaka (po širini prelaznog radijusa),
- za pojedinačne greške koje se prostiru na većoj dubini mogu se kombinovati postupci brušenja,
- izbrušena mesta ne smeju imati oštre ivice i moraju biti dostupna za ispitivanje i zavarivanje,
- zona izbruska mora biti odmašćena, suva i čista,
- izbrušena mesta površine prelaznog radijusa ispitati magnetnim česticama.



Sl. 6. Brušenje otkrivenih grešaka

## 2.6. Izbor postupka zavarivanja

Mogućnosti za izbor postupka zavarivanja i dodatnog materijala za sanaciju površinskih prsline na prelaznom radijusu prirubničkog dela vratila turbine bile su ograničene, zbog reparaturnog zavarivanja bez njegove demontaže i bez naknadne termičke obrade nakon zavarivanja.

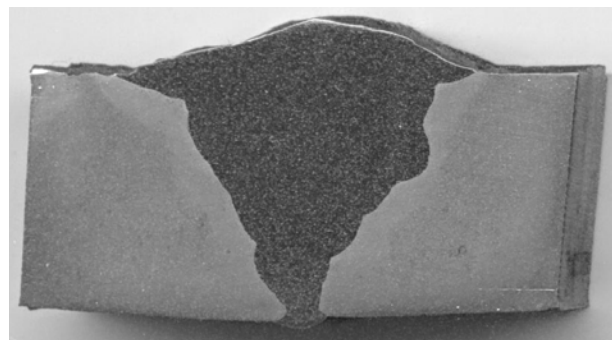
Analizom parametara od kojih zavisi izbor postupka zavarivanja (zavarljivost materijala, energetske mogućnosti postupaka zavarivanja, geometrijska složenost konstrukcije vratila, ekonomski pokazatelji) utvrđena je celishodnost primene postupak 111.

## 2.7. Izbor dodatnog materijala

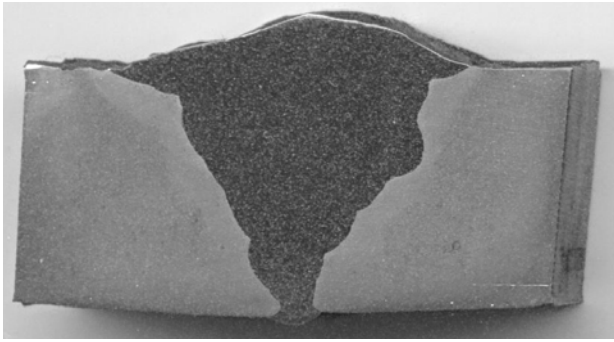
Zbog velike debljine osnovnog materijala, krajnje ograničenih mogućnosti izvođenja predgrevanja i naknadne termičke obrade, optimalno rešenje je korišćenje obloženih elektroda, koje daju šav austenitne strukture. Dobre osobine metala šava, pri izvođenju reparaturnih zavarivanja, na materijalima sa teže ili ograničenom zavarljivošću, utvrđena je da imaju ruska elektroda ЭА 395/9 i Castolin Xuper 2222. Potreba za predgrevanjem osnovnog materijala (100-150 °C), pri upotrebi elektroda ЭА 395/9, počinje pri dubinama izbrusaka većim od 40 mm, odnosno pri zapreminama izbrusaka većim od 500 cm<sup>3</sup>.

Pre upotrebe elektrode je potrebno sušiti u za to određenim pećima. Elektrode ЭА 395/9 sušiti na temperaturi 200 do 250 °C u trajanju od 2h, a Castolin Xuper 2222 na 350 °C u trajanju od 2h. Dozvoljeno je samo jedno sušenje elektroda, zbog mogućnosti pucanja obloge pri ponovnom sušenju. Do upotrebe, elektrode čuvati u individualnim grejačima (tobolcima) na temperaturi 100 do 120 °C.

Kvalifikacijama tehnologija zavarivanja utvrđeno je da zavareni spoj ima manju deformaciju primenom elektroda Castolin Xuper 2222 od elektroda ЭА 395/9, Slika 7 i Slika 8, od [4] do [6].



Sl. 7. Makrografske snimci zavarenih spojeva, ЭА 395/9



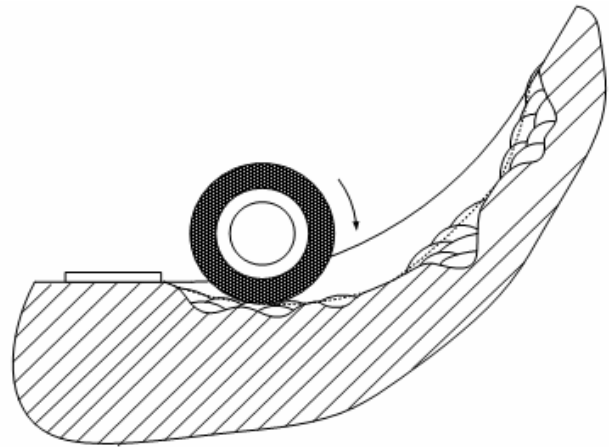
Sl. 8. Makrografski snimci zavarenih spojeva, Castolin Xuper 2222

## 2.8 Tehnologija reparaturnog zavarivanja

Reparaturnim zavarivanjem geometriju prelaznog radijusa vratila turbine uraditi sa radijusom R90mm, u cilju smanjenja koncentracije napona. Zavarivanje izbrusaka izvršiti po kvalifikovanoj tehnologiji zavarivanja [4], saglasno zahtevima EN 288/3. Zaostale napone, nastale pri zavarivanju, smanjiti iskivanjem svakog sloja zavara pneumatskim čekićem sa zaobljenim vrhom R 5-R 8 mm. Po preporuci proizvođača za zavarivanje koristiti izvor napajana jednosmernom strujom i elektrodu postaviti na + pol. Ostale preporuke su sledeće:

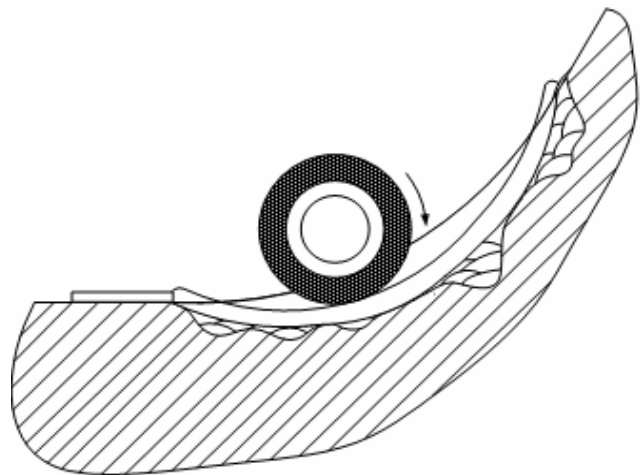
- širina zavara ne bi trebala biti veća od  $2,5 \times d$ , gde je  $d$  prečnik elektrode,
- zavarivanje izvoditi kratkim lukom sa permanentnim uklanjanjem šljake,
- posebnu pažnju posvetiti zapunjavanju kratera pri prekidu luka.

Za izbruske većeg poprečnog preseka, primenjivati poslojno zavarivanje dna i bokova sa obrtanjem smeru polaganja zavara za  $90^\circ$  u svakom sloju. Za uske a duge izbruske primenjivati zavarivanje "povratnim korakom". Za duge izbruske većeg poprečnog preseka, u slučaju da je neophodno predgrevanje, primenjivati polaganje zavara po sistemu "brdo" ili "kaskada". Zavarivanje izvoditi pri temperaturi okolnog vazduha većoj od  $5^\circ\text{C}$ , u uslovima bez značajnog strujanja vazduha. Za izbegavanje ivičnih zarezna na cilindričnom delu vratila celishodno je zaštititi prelaz, sa radijusa na cilindrični deo, čeličnom trkom  $20 \times 2$  mm od nerđajućeg austenitnog čelika. Traku pričvrstiti sa nekoliko pripoja (u zavisnosti od dužine izbruska). Zavarivanje početi popunjavanjem lokalnih udubljenja uzduž radijusa, Slika 9, elektrodom prečnika 3 mm i jačinom struje od 60 do 110A, za  $\text{ЭА 395/9}$ , a elektrodom prečnika 3,2 mm i jačinom struje 70-90 A, za Castolin Xuper 2222. Iskivati svaki sloj pneumatskim čekićem sa zaobljenim vrhom a potom brusiti lice navara, u cilju uklanjanja defekata.



Sl. 9 Popunjavanje lokalnih udubljenja i brušenje navarenog materijala

Kompletan prvi sloj navariti po širini radijusa elektrodama prečnika 4 mm. Jačina struje za elektrodu  $\text{ЭА 395/9}$  je 100-170 A, a za Castolin Xuper 2222, 90-110 A. Iskovati prvi kompletan sloj, pneumatskim čekićem sa zaobljenim vrhom a potom brusiti navar, u cilju uklanjanja grešaka na licu navarenog sloja, Slika 10.



Sl. 10 Postupak navarivanja i brušenja prvog kompletnog sloja

Završni sloj navariti po širini radijusa, elektrodama  $\text{Ø4}$  mm. Iskovati kompletan sloj pneumatskim čekićem sa zaobljenim vrhom, a zatim oblikovati navarene površine brušenjem ravnim brusilicama i polirati, uz kontrolu šablona R90, Slika 11 i Slika 12. Stepem kvaliteta obrade površine treba da bude  $Ra < 6,3 \mu\text{m}$ .

Posle kontrole šablonom sa radijusom R90, navariti mesta na kojima nedostaje materijal. Završnu obradu prelaznog radijusa izvršiti brusnom pločom prečnika  $\text{Ø160}$  mm. Brusilicu voditi po cilindričnom delu vratila. Nakon izvršenog reparaturnog zavarivanja turbinskog vratila potrebno je izvršiti ispitivanja zavarenih spojeva, metodama bez razaranja, na površinsku homogenost (vizuelno ispitivanje, ispitivanje penetrantima).



Zonu prelaznog radijusa polirati grubim i finim lepezastim šmirglama. Stepen veličine zrna odabrati prema zahtevima za mehaničku pripremu, pre nanošenja prvog osnovnog sloja antikorozivne zaštite (u slučaju da se ne vrši priprema površina peskarenjem).

Zaštititi širu zonu prelaznog radijusa sa dva osnovna sloja antikorozivne zaštite (AKZ) na bazi epoksi smola.. Po završetku reparaturnog zavarivanja prelaznog radijusa izvršiti popravku osnovnih slojeva AKZ, odmaščivanje i "aktiviranje", a zatim naneti dva pokriva sloja AKZ na bazi epoksi katrana.

### 3. REZULTATI I DISKUSIJA

Primenom prikazane metodologije reparaturnog zavarivanja prelazni radijus prirubničkog dela vratila turbine agregata A8 saniran je sa materijalom otpornom na zamor i koroziju i uneti su pritiski naponi na mestu dejstva promenljivog opterećenja (cikličnog savijanja) bez deformacije vratila.



Sl. 11 Radijus nakon obrade pneumatskim čekićem



Sl. 12 Kontrola radijusa nakon poliranja

Prvi pokazatelj uspešno izvršenog zavarivanja površinskih prslina na vratilu turbine dobijen je laganom montažom zaptivače, jer da je bilo značajnijih deformacija vratila turbine centriranje zaptivače bilo bi otežano. Uspešnost metodologije reparaturnog zavarivanja definitivno je potvrđena puštanjem agregata A8 u rad, jer su ispitivanja pokazala da nema promene u vibracijama turbine u odnosu na stanje pre izvedene popravke vratila.

Takođe, ispitivanja penetrantima šire zone saniranih površina prelaznog radijusa prirubničkog dela vratila turbine izvršena posle 14 dana i nakon 6 meseci rada agregata nisu pokazala nikakve promene u odnosu na njihovo stanje posle završetka sanacije..

### 4. ZAKLJUČAK

Reparaturno zavarivanje površinskih prslina na prelaznom radijusu prvog vratila horizontalne Kaplan turbine (agregat A8) završeno je novembra 2009. godine, za 24. dana. Od decembra 2009. godine do danas sanirane su površinske prsline još na pet vratila, a do kraja 2012. godine biće sanirana i poslednja dva vratila, tako da se može konstatovati da je razvijena uspešna metodologija reparaturnog zavarivanja vratila turbina na hidroelektrani „Đerdap 2“, bez njihove demontaže i bez naknadne termičke obrade nakon zavarivanja, jer je njenom primenom očuvan integritet i produžen vek trajanja vratila.

Posebno treba istaći i veliki finansijski efekat, koji po svakom saniranom vratilu turbine iznosi više od 3.000.000 \$. Do ove vrednosti se lako dolazi ako se ima u vidu da cena jednog vratila, u zavisnosti da li se izrađuje u Rumuniji ili Rusiji, iznosi od 800.000 do 1.400.000 \$ i da je za njegovu izradu potrebo od 6 do 9 meseci, što je u direktnoj vezi sa količinom hidroenergije koju bi jedan agregat proizveo u tom periodu.

Uspešne korektivne popravke oštećenih, naprslih ili pohabanih delova hidromehaničke ili turbine opreme za njihov pouzdan rad, primenom reparaturnog zavarivanja, moguće je uraditi samo kada se raspoložuje sveobuhvatnom bazom podataka. Važno je znati sve funkcionalne karakteristike opreme i delova, njihove radne zahteve, uslove eksploatacije, tačnu veličinu i položaj grešaka, mesta gde treba izvršiti popravke i sa kojom se opremom raspoložuje za reparaturno zavarivanje. Fotografije i skice su takođe dragocene u definisanje optimalnog postupka reparaturnog zavarivanja. Posebno je važno da se izvrši pažljiva analiza pohabanog područja ili područja loma radi donošenja odluke o metodologiji reparature.

### ZAHVALNICA

Autori se zahvaljuju Ministarstvu prosvete i nauke na podršci za projekat TR 35002.

### 5. LITERATURA

- [1] Manufacturer's Documentation for the Hydro-Electric Generating Set A6 and A8 Shaft, LMZ, Sankt Petersburg.
- [2] Arsić, M., B. Vistić, Z., Savić, Z. Odanović, M. Mladenović, "Turbine Shaft Failure Cause Analysis", *The Seventh International Triennial Conference Heavy Machinery - HM 2011*, June 29-July 2, 2011, Vrnjačka Banja, pp. 49-54.
- [3] ГОСТ 977-88, Отливки стальные. Общие технические условия, 1988.
- [4] Vistić, B., M. Arsić, V. Aleksić, "Technology of Performing Repair Works at the Transition Radius R80 of the Turbine Shaft", TZ 421114-949-2D, Institute for Materials Testing, Belgrade, 2009.

- [5] Report on Welding Technology Qualification, Nr. 421116-80406/1, Institute for Materials Testing, Belgrade, 2009.
- [6] Report on Welding Technology Qualification, Nr. 421116-80406/2, Institute for Materials Testing, Belgrade, 2009.
- [7] Miličić, D., Mijajlović, M. Anđelković, B., Đurić, S.(2011) Automatizacija proračuna zavarenih spojeva, *IMK -14- Istraživanje i razvoj*, vol.17, no.1, pp. 33-38.