

**ISPITIVANJA TURBINSKIH VRATILA U FUNKCIJI DONOŠENJA
ODLUKE O SANACIJI**

**TESTING OF TURBINE SHAFT TO MAKE DECISION ON
RECOVERY**

**Vujadin Aleksić, mr, dipl.inž.rud., IWE, Brane Visticać, dipl.inž.maš.
Institut za ispitivanje materijala IMS
Beograd, Srbija**

**Ljubica Milović, dr, docent
Univerzitet u Beogradu,
Tehnološko metalurški fakultet
Beograd, Srbija**

REZIME

Nakon preko 20 godina rada agregata na HE Đerdap II, u cilju utvrđivanja stanja turbinskih vratila izvršena su detaljna ispitivanja metodama IBR. Na svim vratilima utvrđene su površinske prsline različitih dužina i dubina, po čitavom obimu vratila, u zoni prelaznog radijusa, između cilindričnog dela vratila i velike prirubnice. Na jednom vratilu je utvrđena i prolazna prslina kroz koju je curilo ulje iz sistema regulacije. Materijal velike prirubnice sa mesta procurivanja je iskorišćen za izradu epruveta i mehanička ispitivanja radi utvrđivanja uzroka nastanka prolazne prsline na turbinskom vratilu.

Na osnovu dobijenih rezultata i analiza pristupilo se izradi tehnologije sanacije vratila bez njihove demontaže. Do sada je uspešno sanirano 5, a u narednom periodu planira se sanacija još 3 vratila, dok su 2 zamenjena novim.

Ključne riječi: ispitivanja, IBR, turbinsko vratilo, sanacija

ABSTRACT

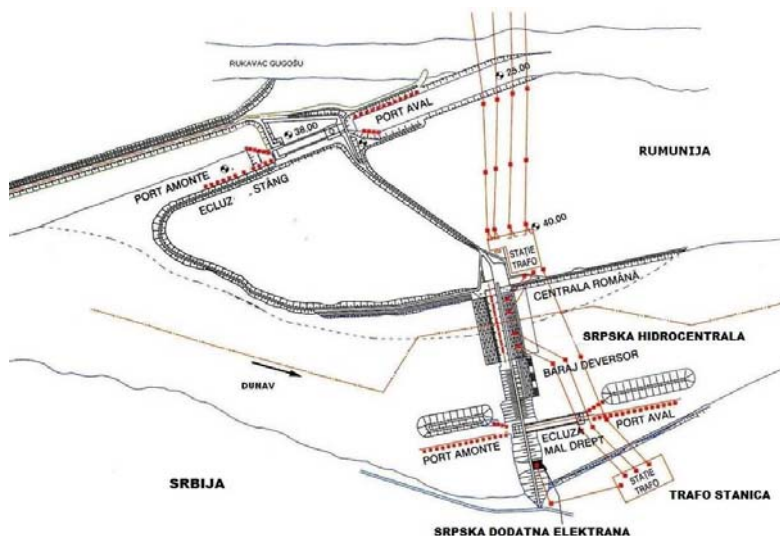
After more than 20 years of exploitation of the aggregate at HE DJERDAP II, in order to establish the state of the turbine shafts, thorough testing was conducted using the NDT method. An all shafts, surface cracks of various lengths and depths were detected on whole periphery of the shaft, in the zone of transition radius between cylindrical part of the shaft and large flange. On one shaft, a through-crack was detected through which the oil from the regulating system had leaked. The material of the flange from the spot of leakage was used to make a specimen and mechanical testing in order to establish the cause of initiation of the through-crack on the turbine shaft.

Based on the results obtained and analyses conducted, preparation of a technology for recovery of the shafts without their disassembling was initiated. So far, 5 of them have been successfully recovered, another 3 shafts are planned to be recovered in the period to follow, while 2 of them were replaced by the new ones.

Key words: testing, NDT, turbine shaft, recovery

1. UVOD

Izgradnja HE “Đerdap II” započela je 1977. godine, a završena je (ne računajući dodatnu elektranu, koja je izgrađena kasnije) 1987. godine. Srpski deo sistema smešten je na glavnom toku Dunava između ostrva Mare i srpske obale. U glavnom toku Dunava, pored srpske hidroelektrane prema rumunskoj obali smeštena je i rumunska hidroelektrana, sl.1.



Slika 1. Situacioni plan HE Đerdap II

U periodu od 1985 do 1987 godine, pušteno je u rad 8 kapsulnih agregata PL-15/826-G-750 proizvodnje LMZ, SSSR sa parametrima dostupnim na <http://www.djerdap.rs> [1]:

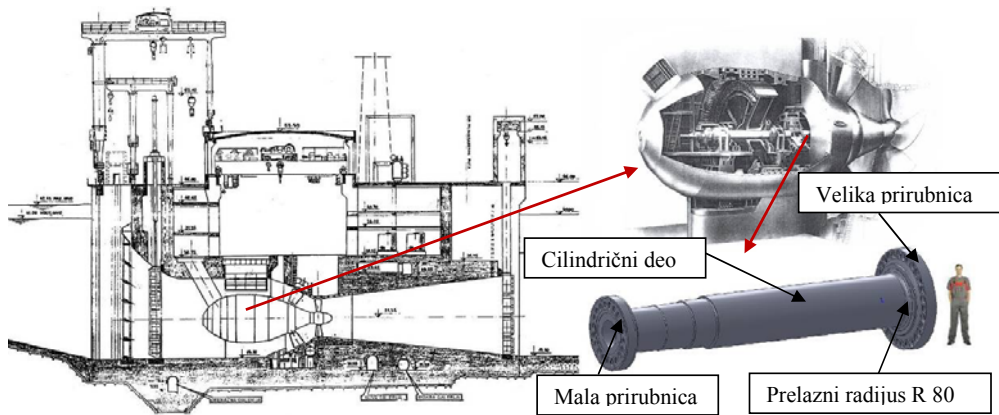
- Neto padovi:
 - ⊕ maksimalni statički $H_{max} = 12,75$ m
 - ⊕ računski po snazi $H_r = 7,45$ m
 - ⊕ minimalni eksploatacioni $H_{min} = 2,50$ m
- Nominalna snaga na neto padu 7,45 m $P = 28$ MW
- Max. protok kroz turbinu pri proizvodnji el. energije $Q = 425$ m³/s
- Nominalni broj obrtaja $n = 62,50$ min⁻¹
- Prečnik radnog kola turbine $D = 7,50$ m
- Broj lopatica radnog kola 4 kom
- Stepen iskorišćenja u nominalnoj pogonskoj tački $\eta = 91,0$ %
($H=7,45$ m; $P=28$ MW)

U kasnijem periodu, od 1998 do 2000 godine, na dodatnoj elektrani, puštena su u rad još dva agregata istog tipa proizvedenih, po licenci LMZ, od strane UCM Rešica, Rumunija.

2. O VRATILIMA

Šuplja vratila agregata na hidroelektranama, predstavljaju vitalne delove koji spajaju turbinu i generator omogućavajući pretvaranje hidro u električnu energiju. Na sl.2 prikazan je poprečni presek elektrane sa agregatom i vratilom koji je predmet ovog rada.

Vratila turbina agregata na hidroelektrani Đerdap II, izrađena su iz tri dela, sl. 2, zavarivanjem prirubnica i cilindričnog dela vratila ili kovanjem iz jednog dela prema DOKUMENTACIJI proizvođača (1984) [2].



Slika 2. Poprečni presek elektrane, turbina PL – 15/826-G-750 i šuplje vratilo

U tab.1 dat je pregled nekih karakterističnih podataka za turbinsaka vratila HE Đerdap II.

Tabela 1. Pregled karakterističnih podataka turbinskih vratila na HE Đerdap II

Agregat		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
Fabrički broj vratila		754	755	748	749	750	751	752	753	Dodatna elektrana	
Materijal delova vratila	Mala prirubnica	-	20GS							20GS	
	Cilindrični deo	-	20GS								
	Velika prirubnica	-	20GS	08GDNFL		20GSL		20GSL	08GD NFL	20GS	
God puštanja u rad		-	-	IV 1985	VIII 1985	-	XII 1985	-	VI 1987	1998 do 2000	
Razlog zaustavljanja	I	/	/	/	/	/	I 2007 procurivanja	/	/	/	/
	II	Ispitivanja metodama IBR, 2007									
	III	-	-	Sanacija prema tehnologiji IMS-a	Sanacija prema tehnologiji IMS-a	-	Procurivanje ulja zbog prolazne prisline	-	Sanacija prema tehnologiji IMS-a	Sanacija prema tehnologiji IMS-a	Sanacija prema tehnologiji IMS-a
Br sati provedenih u radu pre sanacije		-	-	197414	196139	-	163411	-	177066	-	-
Početak sanacije		/	/	VIII 2010	V 2010	/	Vratila zamenjena novim		IX 2009	IX 2011	I 2012
Trajanje sanacije		/	/	Oko 24 dana		/	/	/	Oko 24 dana		
Pregled posle 6 meseci eksploatacije	VT			BN	BN				BN	/	/
	VT-D			Z	Z				Z	/	/
	PT			BN	BN				BN	/	/

VT-vizuelna kontrola, VT-D-Vizuelna dimenziona kontrola, BN-bez nalaza, Z-zadovoljava tražene zahteve

Zona prirubnica prema glavčini RK i prelaznog radijusa R80, pošto se nalaze pod uticajem procurne vode kroz zaptivaču vratila, pre početka eksploatacije, zaštićene su sistemom SOV -

Sistem otporan na vodu, po TU AKZS-200, ukupne debljine 400 μ m. Priprema površina za nanošenje prvog osnovnog premaza sastojala se samo od odmaščivanja pošto se radilo o mašinski fino obrađenim površinama, privremeno zaštićenim mineralnom mašću, bez tragova korozije, iako je po TU predviđeno peskarenje do stepena Sa 2,5 po SIS 05 59 00/1967. Vratila su zahvaćena procesom nastanka i razvoja prslina i samo od kvaliteta početno izvedene AKZ zavisi u kojoj su fazi.

3. ISPITIVANJA VRATILA IBR METODAMA

Sva vratila su, pre montaže, prošla ispitivanja metodama bez razaranja na gradilištu, bez obzira na izveštaje iz fabrike i kao podobna, bez reparature, ugrađena su pod nadzorom stručnjaka proizvođača opreme.

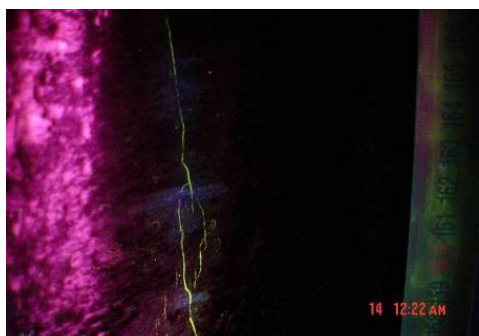
Tokom eksploatacije, zone prelaznog radijusa nisu ispitivane, čak ni vizuelno, niti je obnavljana AKZ.

Zbog curenja ulja iz sistema regulacije na vratilu agregata A6, agregat je zaustavljen i na vratilu je utvrđena prolazna prslina, dužine 2100 mm, kroz koju je curilo.

Nakon 20-tak godina rada agregata, u cilju utvrđivanja stanja turbinskih vratila izvršena su detaljna ispitivanja zavarenih spojeva i osnovnog materijala i ostalih vratila, metodama bez razaranja: vizuelno ispitivanje (VT), ispitivanje penetrantima (PT), ispitivanje magnetnim česticama (MT) i ultrazvučno ispitivanje (UT).

Na svim vratilima su utvrđene površinske prsline različitih dužina i dubina, od inicijalnih pa do prslina dubine do 20 mm, po čitavom obimu vratila, u širini do 200 mm u zoni prelaznog radijusa, R80, između cilindričnog dela i velike prirubnice vratila.

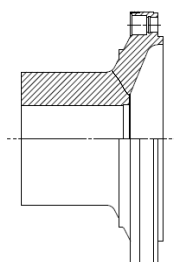
Na slikama 3a do 3c, prikazani su karakteristični nalazi ispitivanja po metodi VT, MT, PT i UT kao što je prikazano u IZVEŠTAJIMA IBR (2007) [3].



3a. MT



3b. VT i PT



3c. UT

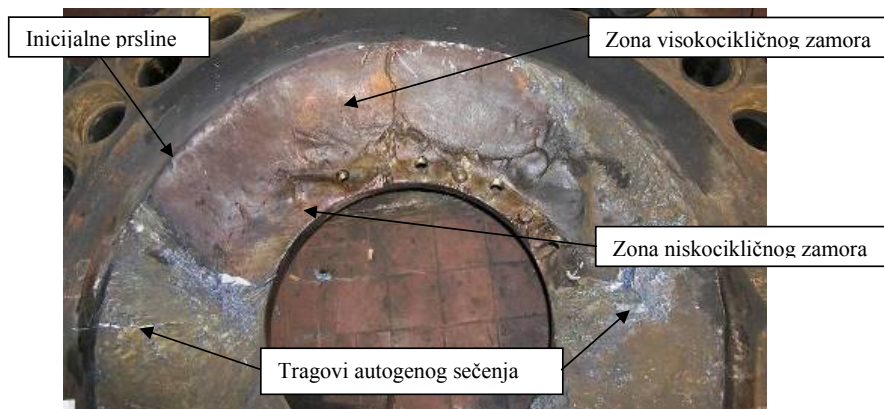
Slika 3. Karakteristični nalazi ispitivanja metodama IBR na radijusu R80

Nakon toga, dva vratila, A6 i A7, su zamenjena novim, a na ostalim je predviđena sanacija prslina na osnovu izvršenih ispitivanja i analiza, a po TEHNOLOGIJI (2009) [7] Instituta IMS iz Beograda.

4. SEČENJE PRIRUBNICE I ISPITIVANJA METODAMA SA RAZARANJEM

Posle demontaže vratila A6 odsečena je velika prirubnica i materijal sa mesta procurivanja je iskorišćen za izradu epruveta za ispitivanja metodama sa razaranjem (IR) radi utvrđivanja uzroka nastanka prolazne prslina na turbinskom vratilu.

Na površini prolazne prslina vratila A6, slika 4, uočena su karakteristična mesta, koja ukazuju na zamorni karakter nastanka prslina u uslovima delovanja koroziione sredine.



Slika 4. Velika prirubnica vratila turbine A6 sa HE Djerdap II nakon sečenja

Rezultati ispitivanja metodama IR prikazani su u tabeli 2.

Tabela 2. Pregled rezultata ispitivanja prema IZVEŠTAJU IR (2008) [4]

Ispitivanje	Standard/Zahtev	Rezultat	Primedba
Hemijski sastav	/ Vrednosti iz tab. 2 i 3 GOST 977/88	Ispitani uzorak odgovara zahtevima GOST 977/88 u pogledu hemijskog sastava, za čelični liv 20GSL.	XRF uređaj, OES metoda
Zatezna svojstva	SRPS EN 10002-1 GOST 1497/84 radi dobijanja uporedljivih podataka sa GOST 977/88 / GOST 977/88	Ispitivani uzorak čeličnog liva ne zadovoljava zahteve za zatezne osobine navedene standardom GOST 977/88 obzirom da su vrednosti zatezne čvrstoće i izduženja nešto niže od propisanih.	Ispitivanje je izvršeno prema standardu SRPS i GOST, u različitim pravcima u odnosu na osu vratila
Energija udara	SRPS EN 10045-1 GOST 9454-78 / GOST 977/88	Veliko rasipanje rezultata, a rezultati dobijeni ispitivanjem prema zahtevu GOST 9454-78, na temperaturama od -10. 0, +10 i +20°C, viši od minimalno propisane vrednosti energije udara, na sobnoj temperaturi, za čelični odlivak 20GSL prema GOST 977-88.	
Mikrostruktura	/Dokumentacija naručioca	Prisustvo dendritne strukture ukazuje na mogućnost nepotpune ili nepravilno izvedene termičke obrade prirubnice vratila, kao i mogući razlog velikog rasipanja rezultata svih mehaničkih ispitivanja.	
Trajna dinamička čvrstoća	GOST 25.502/79/ Dokumentacija naručioca	Veliko rasipanje rezultata usled nehomogene mikrostrukture, sa trajnom dinamičkom čvrstoćom R_{din} materijala prirubnice vratila od 137MPa.	
Parametri mehanike loma	ASTM E.../	Brzina rasta prslina kod oba ispitivana uzorka bila je nestabilna, što potvrđuje da zbog nehomogene mikrostrukture nije moguće precizno odrediti brzinu rasta zamorne prslina.	Ispitivanje je izvršeno u različitim pravcima u odnosu na osu vratila

Uočljivo je rasipanje rezultata u odnosu na srednje vrednosti kod svih izvršenih ispitivanja. Rezultati mikrostrukturnih ispitivanja, ukazuju da metalurški kvalitet odlivaka od čelika 20GSL nije na nivou zahteva za dugotrajni, višegodišnji rad u uslovima rada vratila turbine hidrogeneratora.

Na osnovu rezultata ispitivanja i pored nižih vrednosti izduženja i zatezne čvrstoće, uzrok loma vratila nije tražen u kvalitetu materijala vratila.

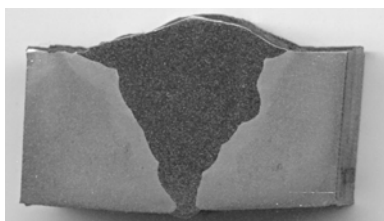
Analize opterećenja i PRORAČUNI (1984) [5] su pokazali da su ciklični zatežući naponi, kojim je opterećeno vratilo zajedno sa korozionom sredinom (procurna voda kroz zaptivaču, slabo izvedena i neobnavljana AKZ) doveli do pojave korozionog zamora i stvaranja prolazne prsline na prelaznom radijusu.

5. DONOŠENJE ODLUKE - TEHNO EKONOMSKA ANALIZA

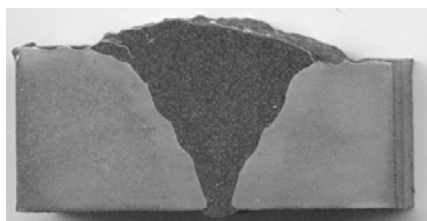
Otkrivanje prsline na vratilima, je dovelo do toga da se razmatra pitanje izbora: zameniti sva vratila novim ili revitalizovati postojeća. Zamena vratila novim, čija je cena u zavisnosti da li se pravi u Rumunije ili Rusiji, 800.000, odnosno 1.400.000 \$, povezana je sa velikim izdacima za demontažu, izradu i montažu (9 do 14 meseci), kao i gubicima u proizvodnji električne energije, koji, na bazi cene od 0,02 USD/kWh, na pragu elektrane, godišnje (7000h) iznosi oko 3.800.000 USD, po agregatu.

Saznanje da je pojava prsline vezana za dejstvo korozije i zamora, a ne za kvalitet materijala, olakšalo je donošenje odluke o popravci i produženju veka eksploatacije vratila do planske revitalizacije agregata. Uklanjanjem prsline bez zavarivanja i sprečavanjem dejstva korozije postigli bi se dobri izgledi za siguran rad agregata do pomenute revitalizacije, ali je odlučeno da se posle brušenja deonica sa defektima izvrši i njihovo zavarivanje kako bi se izbegli koncentratori napona i smanjenje preseka.

Za sanaciju prsline na vratilu odabran je postupak reparature obloženom elektrodom, koja daje šav austenitnog tipa. Iz IZVEŠTAJA o (kvalifikacijama tehnologija zavarivanja) KTZ (2009) [6], na sl.5 i 6 prikazani su makrografski snimci zavarenih spojeva urađenih elektrodama ЭА 395/9 i Castolin Xuper 2222.



Slika 5. Zavareni spoj, ЭА 395/9



Slika 6. Zavareni spoj, Castolin Xuper 2222

Na osnovu teorijskih razmatranja, rezultata ispitivanja, izvršenih analiza nastanka prolazne prsline i proračuna, izveštaja o KTZ, urađena je TEHNOLOGIJA (2009) [7] sanacije defekata sa pripremom i redosledom izvođenja radova na vratilima agregata HE Đerdap II. Sanacija, kontrole i ispitivanja IBR u toku sanacije su izvršena bez demontaže vratila, slika 7a do 7d.



7a. Vratilo spremno za sanaciju



7b. Merenje dubine izbrusaka



7c. izvođenje zavarivanja u ograničenom prostoru kapsule



7d. iskivanje zavora pneumatskim čekićem sa ciljem relaksacije zaostalih napona od zavarivanja

Slika 7. Priprema i izvođenje sanacije

Nakon sanacije i zadovoljavajućih rezultata po PT, slika 8, obrađena je šira zona radijusa duž vratila, lepezastim šmirglama, grubim, a potom i finim, slika 9. Na zahtev Investitora prelazni radijus je povećan tako da je umesto R80, prelaz između velike prirubnice i cilindričnog dela urađen sa radijusom R90, a na nekim vratilima i R100.



Slika 8. Ispitivanje penetrantima i kontrola prelaznog radijusa nakon sanacije



Slika 9. Izgled ispolirane površine pre AKZ

Od septembra 2009. do januara 2012. god. izvršena je sanacija na vratilima A3, A4, A8, A9 i A10.

6. PROVERE I PERIODIČNA ISPITIVANJA

Prva provera uspešnosti sanacija bila je mogućnost montaže zaptivače. Da je bilo značajnijih deformacija izazvanih zavarivanjem centriranje zaptivače bilo bi otežano.

Druga provera je bila registrovanje vibracija pri pokretanju i radu agregata. Nisu primećene promene u odnosu na stanje pre izvedene sanacije vratila.

Nakon 14 dana provedenih u radu i zaustavljanju agregata, na prvom saniranom vratilu izvršeno je ispitivanje penetrantima šire zone prelaznog radijusa . Rezultat je bio zadovoljavajući.

Sanirana vratila se ispituju na svakih 6 meseci i rezultat je takav da do sada nije bilo nikakvih promena u odnosu na stanje posle završetka sanacije.

7. ZAKLJUČAK

Neprekidna eksploatacija u vrlo teškim radnim uslovima može dovesti do otkaza vratila. Visoko mesto među uzročnicima pomenutih otkaza zauzimaju propusti projektanata – greške u analizi opterećenja, modeliranju, analizi odziva, kao i neadekvatnoj eksploataciji i održavanju.

Metodološki pristup ispitivanju vratila i odabrani postupak sanacije vratila u ovom slučaju pokazao se u potpunosti ispravan, kako sa tehničkog i kvalitativnog, tako i sa ekonomskog stanovišta. Sam proces sanacije sa međufaznim i završnim ispitivnjajima metodama IBR, poštujući sve korake i sigurnosne mere izvodi se za oko 24 dana bez demontaže vratila.

Postupkom sanacije odstranjeni su defekti iz zone pralaznog radijusa, izvršeno je zavarivanje materijalom otpornim na zamor i koroziju, uneti su pritiski naponi na mestu dejstva cikličnog savijanja a sve to bez primetnih deformacija vratila.

8. REFERENCE

- [1] <http://www.djerdap.rs>
- [2] DOKUMENTACIJA (1984) proizvođača turbinskih vratila, LMZ Sankt Peterburg.
- [3] IZVEŠTAJI IBR (2007) o ispitivanjima prelaznog radijusa, R80, turbinskih vratila sa HE Djerdap II, Institut za ispitivanje materijala, Beograd.
- [4] IZVEŠTAJ IR (2008) o ispitivanjima uzoraka velike prirubnice vratila turbine A6 sa HE Djerdap II, Institut za ispitivanje materijala, Beograd.
- [5] PRORAČUN (1984) turbinskog vratila, LMZ, Sankt Peterburg.
- [6] IZVEŠTAJI o KTZ (2009), Institut za ispitivanje materijala, Beograd.
- [7] TEHNOLOGIJA (2009) izvođenja reparaturnih radova na prelaznom radijusu, R80, vratila turbine na HE Djerdap II, Institut za ispitivanje materijala, Beograd.

Zahvalnica

Rad je urađen u okviru realizacije projekta TR 35011, „Integritet opreme pod pritiskom pri istovremenom delovanju zamarajućeg opterećenja i temperature“, finansiranog od strane Ministarstva prosvete i nauke Republike Srbije.