

## ZAOSTALA NAPREZANJA NA RAČVI U ZAVARENOME STANJU

### RESIDUAL STRESSES AT WELDED BRANCH

Tomaž VUHERER<sup>1)</sup>, Viljem ŠPRAH<sup>2)</sup>, Sašo BELŠAK<sup>1)</sup>, Vladimir GLIHA<sup>1)</sup>

**Ključne riječi:** tlačni cjevovod, račva, zaostala naprezanja, metoda bušenja rupice, rozeta, mjerne trake, relaksacija naprezanja

**Key words:** pressurized pipeline, branch, residual stresses, hole-drilling method, rosette, strain gages, stress relaxation

**Sažetak:** Na račvi, koja je izrađena za jednu hidroelektranu u austrijskim Alpama, eksperimentalno je određena razina zaostalih naprezanja na četiri kritična mjesta. Račva je bila u to vrijeme u zavarenome stanju. Upotrijebljena je metoda bušenja rupice, kojom se lokalno relaksiraju zaostala naprezanja i na taj način izmjere pripadajuće deformacije. Izmjerene su tako velike deformacije, da se može slobodno tvrditi kako su zaostala naprezanja u nekim pravcima na razini granice tečenja ugrađenoga čelika.

**Abstract:** The level of residual stresses on four critical points on the branch, made for the hydroelectric power station in Austrian Alps, was experimentally obtained. At that point, the branch was already welded. The hole-drilling method was used, so the residual stresses are locally relaxed and the deformations caused by that process are measured. The measured deformations were so high that one can say that residual stresses in some directions are on the level of used steel yield strength.

---

<sup>1)</sup> Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, Slovenija

<sup>2)</sup> Gopla d.o.o., Maribor, Slovenija

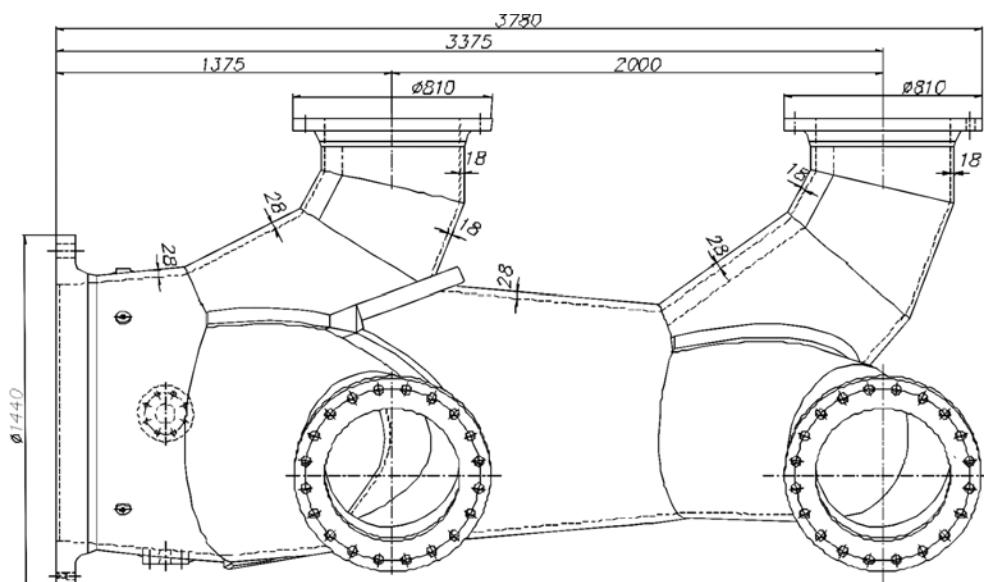
## 1. UVOD

Račva je najzahtjevniji dio tlačnoga cjevovoda, pomoću kojeg se tok vode, koji se dovodi cjevovodom od akumulacije do agregata, razdvoji i uvede u turbinski sistem. Oblak račve je specifičan zbog njezine funkcije i mehaničkih opterećenja. Položaj te račve u tlačnom cjevovodu vidi se na slici 1.



Slika 1. Položaj račve u tlačnom cjevovodu

Voda pod pritiskom uvodi se u kućište Peltonov sustav turbina, gdje su paralelno namještene dvije jednake turbine. Visinska razlika od razine vode je 390 m, zapreminski protok vode  $7,2 \text{ m}^3/\text{s}$ , broj okretaja rotora  $500 \text{ min}^{-1}$ , a nazivna snaga 24,7 MW. Geometrija račve sa najbitnijim dimenzijama prikazana je na slici 2.



Slika 2. Nacrt račve

## 2. MATERIJAL, KORIŠTENI POSTUPCI ZAVARIVANJA I SVOJSTVA ZAVARA

Sastavni elementi takve zavarene konstrukcije su u većini nepravilnih geometrijskih oblika kao što su dijelovi cilindara i dijelovi kosih konusa. Bitni sastavni dijelovi račve su dva srpasta ojačanja, ugrađena na mjestu razdvajanja vodenog toka. Za izradu račve upotrijebljen je materijal P355 NL1 debljina 18, 28 i 70 mm, deklariran kao sitnozrnat čelični lim, pogodan za rad na niskim temperaturama. Kemski sastav s izračunatim vrijednostima C-ekvivalenta te svojstva upotrijebljenog čelika su po pojedinim debljinama lima prikazani u tabelama 1 i 2.

Tabela 1. Zahtjevani sastav čelika i stvarni sastav čelika po različitim debljinama lima

	C	Si	Mn	P	S	N	Al	Cu	Cr	Ni	Mo	V	Ti	Nb	C <sub>E</sub>
tež. %															
	max	max	max	max	max	max	min	max	max	max	max	max	max	max	
	.18	.5	.9/1.7	.03	.02	.02	.02	.3	.3	.5	.08	.1	.03	.05	0.43
<i>t</i>															
18	.17	.37	1.17	.009	.001	.006	.035	.14	.25	.035	.01	.001	.003	.02	0.43
28	.18	.35	1.18	.013	.003	.003	.031	.21	.24	.030	.01	.000	.000	.02	0.41
70	.18	.34	1.15	.015	.002	.004	.024	.20	.20	.020	.00	.000	.000	.01	0.40

Tabela 2. Zahtijevana mehanička svojstva čelika te stvarna svojstva čelika po različitim debljinama lima

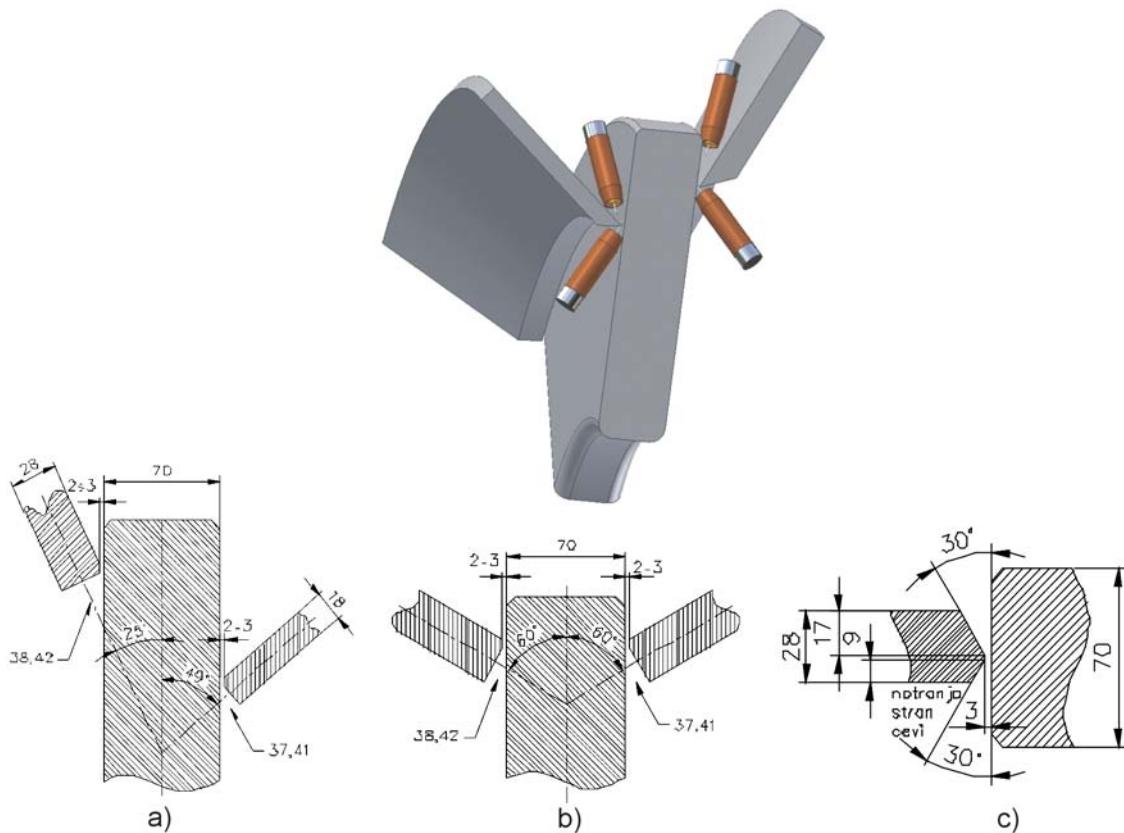
	T, °C	R <sub>eH</sub> , MPa	R <sub>m</sub> , MPa	A <sub>5</sub> , %	CVN, J
min	+ 20	355	490/630	22	
	- 50				20
<i>t, mm</i>					
18	+ 20	378	531	32	
	- 50				158
28	+ 20	431	571	29	
	- 50				95
70	+ 20	339	514	29	
	- 50				48

Zbog kompleksnog oblika račve njezino je zavarivanje puno složenije od zavarivanja običnih tlačnih posuda. Za tu račvu potrebno je zavariti kombinacije debljina 18/28 mm, 18/70 mm i 28/70 mm. Na pojedinim mjestima, gdje treba spojiti srp s konusnim dijelom ljske tlačnog cjevovoda, dostupnost za zavarivanje je veoma otežana. To je dobro uočljivo na slici 3. Na nekim mjestima zavarivanje MAG postupkom nije bilo moguće, te se koristio REL postupak zavarivanja.

Propisana je bila izrada over-matching zavarenih spojeva u zavarenome stanju. Zato se kod MAG zavarivanja koristila punjena žica Megafil 710 M, a kod REL zavarivanja elektroda EVB 50. Podaci o kemiskom sastavu tih dodatnih materijala mogu se naći u literaturi. Mehanička svojstva čistog zavara izrađenog pomoću oba postupka uz korištenje tih dvaju dodatnih materijala prikazana su u tabeli 3.

Tabela 3. Mehanička svojstva čistih zavara

vrsta dodatnog materijala	T, °C	R <sub>eH</sub> , MPa	R <sub>m</sub> , MPa	A <sub>5</sub> , %	CVN, J
elektroda Ø=3,25 mm	+ 20	520	604	26	
	- 40				108
žica Ø=1,2 mm	+ 20	514	602	28	
	- 40				93



Slika 3. Primjer triju teško dostupnih mesta: prva dva (a i b) zavareni su REL postupkom, a treći (c) MAG postupkom

Predviđeno je bilo, da se račva nakon zavarivanja kao cjelina naponski odžari u peći na temperaturi  $540 \pm 10$  °C. Verifikacijom postupka zavarivanja bilo je potrebno dokazati kako svojstva izrađenih zavara odgovaraju zahtjevima također i u naponsko odžarenom stanju račve. Tim toplinskim postupkom se naime osim djelomične relaksacije zaostalih naprezanja smanjuje i tvrdoća zone utjecaja topline (ZUT) i materijala vara (MV). Tako je ispitivanjem čvrstoće materijala zavara i Charpy žilavosti zavara na debljini lima od 18 mm, prije i poslije odžarivanja, dokazano da zavari odgovaraju zahtjevima. Rezultati su prikazani u tabeli 4.

Tabela 4. Čvrstoća i žilavost materijala vara u zavisnosti od stanja zavara

postupak zavarivanja	stanje zavara	R <sub>m</sub> (+ 20 °C), MPa	CVN (0 °C), J
REL	zavareno	556	54
	naponsko odžareno	519	62
MAG	zavareno	545	54
	naponsko odžareno	505	62

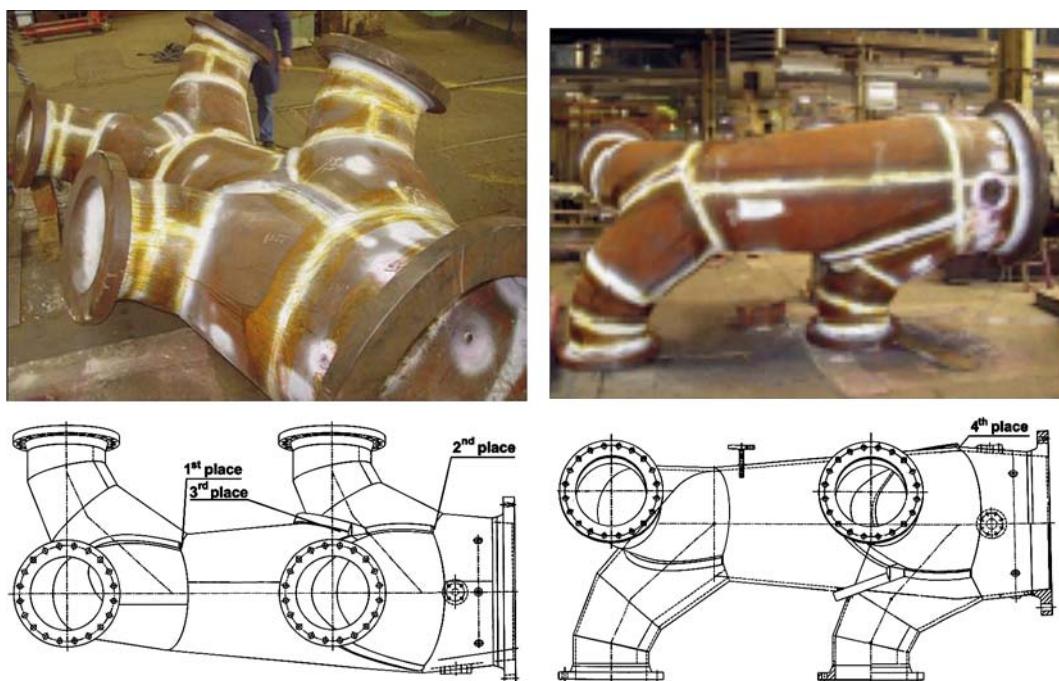
Tehnolozi zavarivanja su definirali pripremu dodatnog i osnovnog materijala, te same parametre zavarivanja za analiziranu račvu. Elektrode su sušene 2 sata na 350 °C. Predgrijavanje se izvodilo na 90-120 °C. Temperatura između pojedinih prolaza (interpass temperature) je održavana ispod 220 °C. Unos topline za REL zavarivanje bio je 1,22-2,7 a za MAG 1,27-2,05 kJ/mm. Račva je na kraju podvrgnuta detaljnoj kontroli kakvoće zavara korištenjem različitih metoda ispitivanja materijala bez razaranja.

### 3. NA KOJIM MJESTIMA I KAD SMO ODREDILI RAZINU ZAOSTALIH NAREZANJA?

Polje zaostalih naprezanja eksperimentalno je određeno na vanjskoj površini račve na četiri mesta P1, P2, P3 i P4. To su pozicije, gdje se očekivalo slabljenje konstrukcijskih svojstava materijala zbog hladnog oblikovanja pojedinih elemenata račve, njihovog sastavljanja i prilagodavanja, samog zavarivanja i konačnog kalibriranja. Na mogućnost krhkog loma račve za vrijeme tlačne probe ili u eksploataciji utječu visina i vrsta mehaničkih opterećenja, postojanje grešaka u zavarima, te razina zaostalih naprezanja zbog zavarivanja i dakako sama temperatura materijala kad je opterećenje račve najveće.

Za prihvativost razine naprezanja kod najvećih opterećenja odgovorni su projektanti opreme, koji moraju poštivati standarde. Kakvoću materijala i dimenzije konstrukcijskih elemenata potrebno je prilagoditi zahtjevima u standardima, pri čemu se koriste različite metode simulacije radnih opterećenja (statički proračun). Kakvoća materijala zavarenih spojeva zajamčena je poštivanjem propisane i prihvaćene tehnologije zavarivanja, koja se dokazuje za izrađeno stanje račve metodama ispitivanja bez razaranja. Osim toga je za najzahtjevnije zavarene konstrukcije, u koje se ubrajaju i tlačne posude, smanjiti razinu zaostalih naprezanja prije izvođenja tlačne probe, a da se pri tome ne mijenja njihov konačni oblik.

Zaostala naprezanja u zavarenom stanju račve određena su prije naponskoga žarenja. Fotografije i sheme račve, pripremljene za eksperimentalno određivanje zaostalih naprezanja na mjernim mjestima P1, P2 i P3 prikazane su na slici 4a, a na mjeru mjestu P4 na slici 4b.

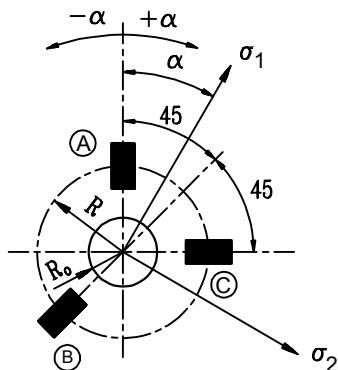


Slika 4. Fotografije zavarene račve u zavarenome stanju prije naponskog odžarivanja i pozicije četiri merna mesta

### 4. METODA ODREĐIVANJA ZAOSTALIH NAPREZANJA

Korištena je standardizirana metoda bušenja rupice, kojom se postiže velika lokalna relaksacija zaostalih naprezanja [1, 2]. Na slici 5 prikazana je specijalna rozeta sa tri mjerne

trake koja omogućuje izračun dvije međusobno okomite komponente glavnih naprezanja i njihov smjer. Rozeta ima promjer manji od 10 mm. Svaku rozetu treba čvrsto zaličiti na odabranou mjesto i definirati njezin smjer.



Slika 5. Usmjerenost pojedinačnih mjernih traka označena je sa A, B i C. Usmjerenost najveće komponente glavnih naprezanja definirana je kutom  $\alpha$ .

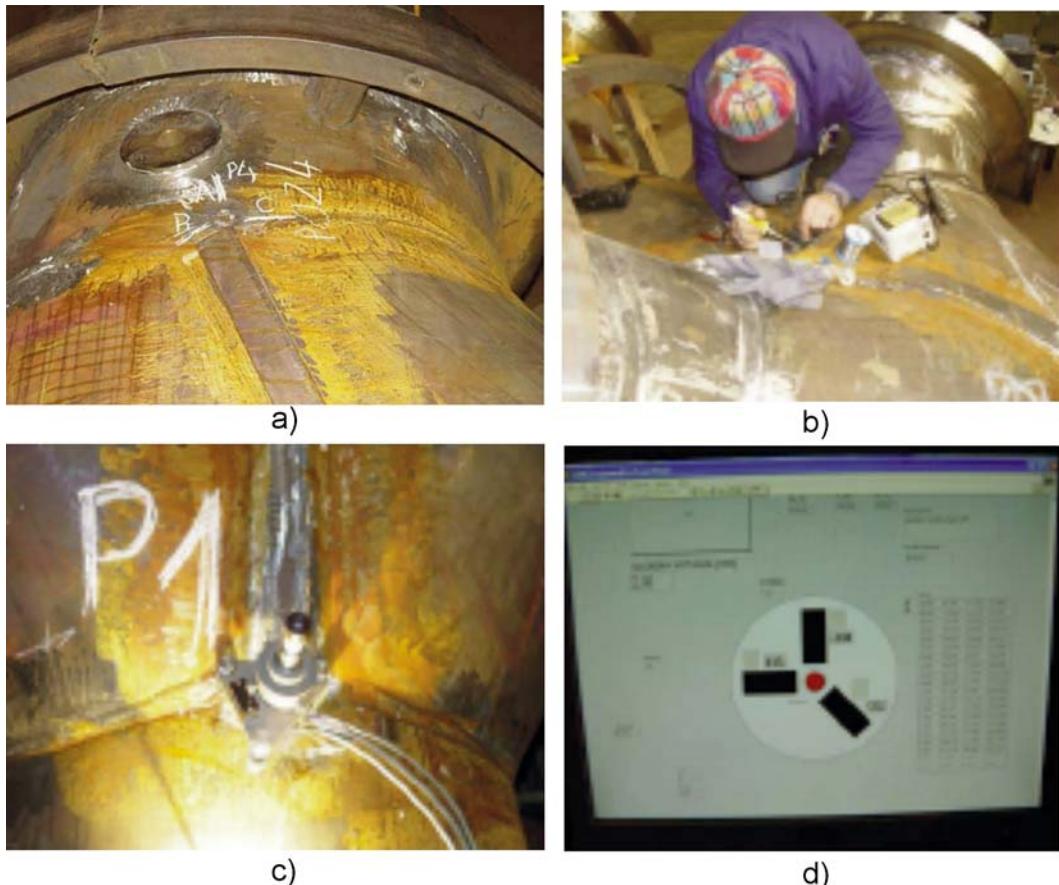
Rozete imaju otvor na sredini. Kroz taj otvor materijal se postupno buši specijalnim svrdlom do konačne dubine 2 mm. Rupica ima promjer 1,72 mm. Postojeća zaostala naprezanja se na mjestu, gdje je zaličena rozeta, zbog postupnog odstranjuvanja materijala malo po malo relaksiraju. To se rezultira na deformaciju materijala u okolini rupice. Deformacija materijala zbog djelomične relaksacije zaostalih napona odrazi se na električnom otporu mjernih traka. Signali s triju mjernih traka i dubina rupice se cijelo vrijeme bušenja registriraju pogodnim sistemom za bilježenje.

## 5. POSTUPAK MJERENJA ZAOSTALIH NAPREZANJA

Ako se na mjernom mjestu nalazilo nadvišenje vara ili neke druge prepreke za lijepljenje rozeta one su bile mehanički odstranjene brušenjem. Za lijepljenje mjernih traka potrebna je čista i ravna površina metala pogodne kakvoće. Na kraju je odstranjuvanje viška materijala bilo obavljen ručno i to polako, nježno i brižno kako se ne bi unijela dodatna zaostala naprezanja. Korišten je brusni papir sa granulacijom 180 to 400  $\text{cm}^{-2}$  i neutralizator Vishay. Na zaličenim rozetama definirali smo smjer mjernih traka obzirom na osi pojedinačnih cijevnih segmenata.

Posle lijepljenja potrebno je priključiti električne kablove. Neki od njih služe za snabdijevanje mjernih traka konstantnom električnom strujom, a nekima se detektiraju signali. Aktivni elementi (mjerne trake) povežu se sa pasivnim elementima tako da nastaje pola Wheatstoneovog mosta. Prije bušenja rupice mostove treba električno izbalansirati.

Najprije smo na prvom mjernom mjestu montirali specijalni alat s turbo pogonom velikog broja okretaja. Optički smo ga pozicionirali u centar rozete. Za sprječavanje bilo kakvog pomaka za vrijeme izrade rupice alat smo lijepljenjem pričvrstili na površinu račve pomoću specijalnih adaptera. Slijedilo je postupno bušenje rupice i skupljanje rezultata mjerenja. Zatim smo alat s tog mesta demontirali i upotrijebili na sljedećoj poziciji.



Slika 6. Lijepljenje (a), montaža kablova (b), montaža alata za bušenje rupice (c), skupljanje i obrađivanje mjernih signala računalom za vrijeme bušenja (d)

## 6. BILJEŽENJE SIGNALA

Ponašanje prenapregnutog materijala za vrijeme bušenja rupice u ovisnosti od dubine rupice na sva četiri mjerna mesta prikazano je na slici 7.

Deformacije na mjernome mjestu P1 se zbog bušenja rupice u sva tri pravca smanjuju (sabijanje materijala), ali je smanjenje u jednom pravcu puno izraženije. Deformacija zbog bušenja se na mjernom mjestu P2 u jednom pravcu malo povećava (razvlačenje materijala), u drugom smanjuje, a u jednom je konstantna. Deformacija zbog bušenja se na mjernome mjestu P3 u jednom pravcu jako smanjuje, na drugom malo manje, dok se na trećem malo povećava. Deformacije se za vrijeme bušenja na mjernom mjestu P4 u dva pravca malo povećavaju, a u trećem pravcu smanjuju.

## 7. VREDNOVANJE SIGNALA I DISKUSIJA REZULTATA

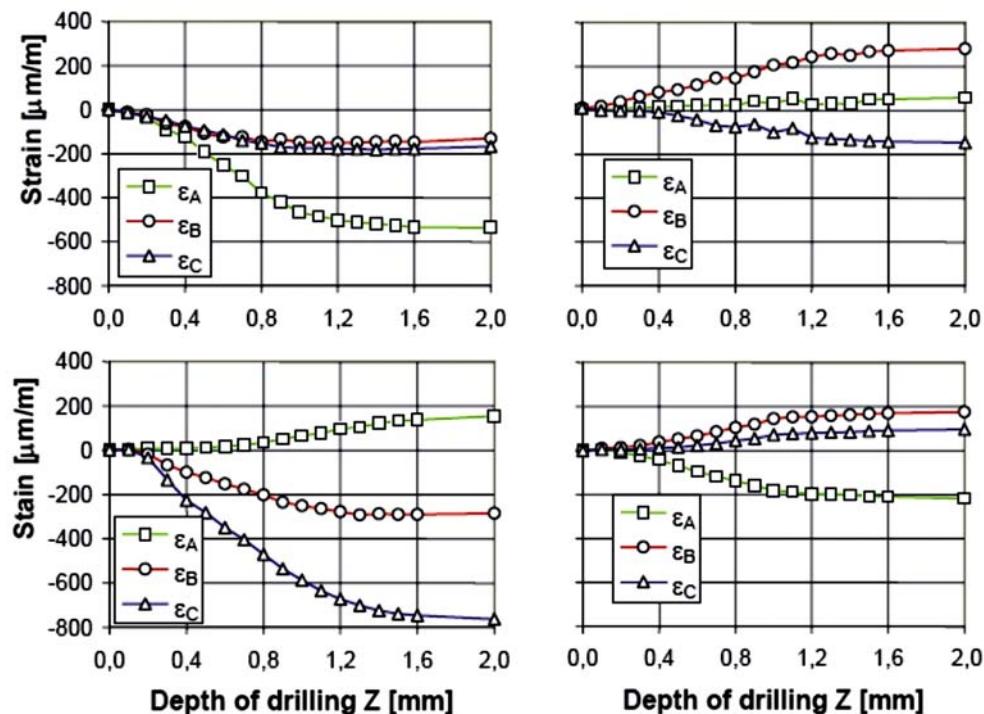
Postojeće komponente glavnih zaostalih naprezanja i njihove smjerove se računa iz veličine zabilježenih signala s mjernih traka, znači iz deformacije materijala u okolini rupice kad je rupica duboka 2 mm. To su deformacije  $\varepsilon_A$ ,  $\varepsilon_B$  i  $\varepsilon_C$  sa slike 7. Koriste se sljedeće transformacijske formule:

$$\sigma_1 = \frac{\varepsilon_A + \varepsilon_C}{4 \cdot A^*} + \frac{1}{4 \cdot B^*} \cdot \sqrt{(\varepsilon_C - \varepsilon_A)^2 + (\varepsilon_C + \varepsilon_A - 2 \cdot \varepsilon_B)^2}$$

$$\sigma_2 = \frac{\varepsilon_A + \varepsilon_C}{4 \cdot A^*} - \frac{1}{4 \cdot B^*} \cdot \sqrt{(\varepsilon_C - \varepsilon_A)^2 + (\varepsilon_C + \varepsilon_A - 2 \cdot \varepsilon_B)^2}$$

$$\tan\alpha = \frac{\varepsilon_A - 2 \cdot \varepsilon_B + \varepsilon_C}{\varepsilon_A - \varepsilon_C}$$

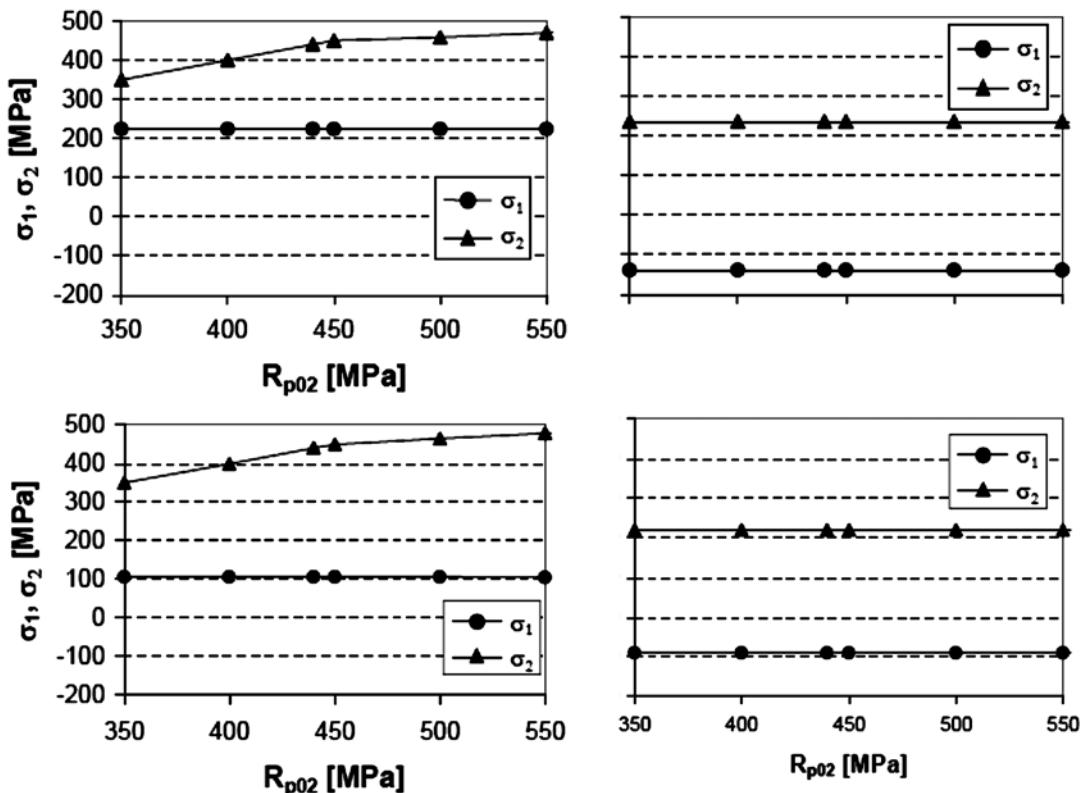
$\sigma_1$  i  $\sigma_2$  su komponente glavnih naprezanja. Smjer veće od tih dviju komponenti naprezanja definiran je kutom  $\alpha$ , a druga komponenta je okomita na prvu. Kut  $\alpha$  mjeri se u suprotnom pravcu od okretanja kazaljke na satu od smjera mjerne trake sa oznakom A.  $A^*$  i  $B^*$  su koeficijent kalibracije.



Slika 7. Komponente izmjerene deformacije zbog relaksacije zaostalih naprezanja na četiri mjerna mesta; P1 (gore-ljevo), P2 (gore-desno), P3 (dole-ljevo) i P4 (dole-desno) u smjerovima mjernih traka A, B i C sve do zasićenja.

Taj način je korektan sve dok komponente izračunatih zaostalih naprezanja ne prijeđu naprezanje tečenja materijala. Tada je potrebno i to uzeti u obzir.

Zajamčeno naprezanje tečenja upotrijebljenog osnovnog materijala je najmanje 355 MPa (tabela 2). Svakako je bolje uzeti u obzir stvarno naprezanje tečenja ugradenog materijala. To je za debljinu od 18 mm oko 380 MPa, a za oba deblja lima između 430 i 440 MPa, što se vidi u istoj tabeli. Sva četiri mjerna mesta nalaze se na limovima, koji su deblji od 18 mm. Naprezanje tečenja čistih varova je bitno veće od naprezanja tečenja osnovnog materijala (tabela 3). Tako je dosta realno kod vrednovanja zabilježenih deformacija uzeti u obzir više naprezanje tečenja od onog garantiranog za osnovni materijal. Na slici 8 prikazana je za sva četiri mjerna mesta ovisnost izračunatih vrijednosti komponenti glavnih zaostalih naprezanja od hipotetske vrijednosti naprezanja tečenja materijala, koja se mijenja od 350 do 550 MPa.



Slika 8. Ovisnost komponenata glavnih zaostalih naprezanja od naprezanja tečenja materijala u kojem je bušenjem rupice relaksiran dio zaostalih naprezanja (P1- gore-ljivo, P2 - gore-desno, P3 - dole- ljivo, P4 - dole-desno).

U tabeli 5 prikazane su izračunate vrijednosti zaostalih naprezanja pod prepostavkom da se radi o materijalu s granicom tečenja od 440 MPa, što je obzirom na ugrađeni materijal još uvijek dosta konzervativna procjena.

Tabela 5. Mjerna mjesto i komponente glavnih zaostalih naprezanja te smjer najveće od tih komponenti

Mjerno mjesto	σ <sub>1</sub> , MPa	σ <sub>2</sub> , MPa	α, °
P1	+ 440	+ 224	- 25
P2	+ 236	- 139	- 54
P3	+ 440	+ 114	- 89
P4	+ 221	- 90	- 28

Vidi se da su na mjernim mjestima P1 i P3 zaostala vlačna naprezanja na razini granice tečenja, a na mjestima P2 i P4 su oko 50 % te vrijednosti.

Na mjestima s visokim zaostalim naprezanjima zavarene konstrukcijske komponente mogu se kod probnog opterećenja ili za vrijeme eksploracije lokalno plastično deformirati što može utjecati na njihov oblik. Zato je izračunata vrijednost ekvivalentnog naprezanja po von Misesu. Korištena je poznata relacija:

$$\sigma_{eq} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

jer se radi o naprezanjima na površini, dok je treća komponenta naprezanja, koja je normalna na površinu, uvijek jednaka nuli.

Materijal se počne plastično deformirati kad je ispunjeni uvjet da je:

$$\sigma_{eq} = \sigma_0 = R_{p0.2}$$

U tabeli 6 izračunati su postotci lokalnog iskorištenja materijala na sva četiri mjesta.

Tabela 6. Ocjena naprezanja za plastično deformiranje materijala na četiri mjerna mesta

Mjerno mjesto	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	$\sigma_{eq}$	$\sigma_{eq}/R_{p0.2}$
	MPa			%	
P1	+ 440	+ 224	0	381	87
P2	+ 236	0	- 139	328	75
P3	+ 440	+ 114	0	396	90
P4	+ 221	0	- 90	277	63

Kako je osnovni materijal te račve konstrukcijski čelik sa istezanjem od 22 %, a zavarima se optimalnom tehnologijom zavarivanja također jamče konstrukcijska svojstva, iskorištenje materijala od čak 90 % nema velike uloge za mogućnost pojave krhkog loma, ako se ne radi o prisustvu većih pukotina. Za mogućnost promjene oblika zavarene konstrukcije pak toliko iskorištenje materijala nije zanemarivo. Zbog jednog i drugog primjerno je takvu zavarenu komponentu naponski odžariti i time postojeća zaostala naprezanja smanjiti na što je moguće veću mjeru. Iz reference [3] je vidljivo da su se zaostala naprezanja na toj račvi na najiskorištenijem mjernome mjestu odžarivanjem smanjila za više od 50 %.

## 8. ZAKLJUČAK

Račve su često veoma komplikirane komponente tlačnih cjevovoda i nije ih jednostavno izraditi. Zbog toga zaostala naprezanja na njima mogu biti vrlo visoka.

U radu je pokazano da je zaostala naprezanja na zavarenim konstrukcijama zaista moguće eksperimentalno odrediti i kad su na razini granice razvlačenja materijala. Pritom treba samo uzeti u obzir stvarna mehanička svojstva materijala u najužoj okolini određivanja tih naprezanja.

Metoda bušenja rupice je takoreći nerazarajući postupak određivanja zaostalih napona. Relativno je jednostavna za izvođenje, potrebna oprema je sa stajališta investicije dostupna, ali je nažalost korisna samo za određivanje zaostalih naprezanja na površini.

Druge metode kao korištenje rendgenskih zraka, ultrazvučnih valova, te različite magnetne metode puno su komplikiranije od metode bušenja rupice, a neke od njih za određivanje zaostalih naprezanja na realnim zavarima uopće nisu ni pogodne.

## 9. REFERENCE

- [1] ASTM E 837: Standard Test Method for Determination Residual Stress by the Hole-Drilling Strain-Gauge Method
- [2] T. Vuherer: Acceptance Level for Planar Flaws in Fusion Welds Depends on the Conditions of Welds due to Residual Stresses, International Conference MATEST '99, Cavtat 1999, 95-102
- [3] V. Gliha, T. Vuherer, Z. Burzić: Safety of a post-weld heat treated and repaired bifurcation, International conference "Welding 2006", Zlatibor 2006.