

## PRAĆENJE NAPREZANJA NA RAČVI KOD TLAČNE PROBE ZA RELAKSACIJU ZAOSTALIH NAPREZANJA

### MONITORING OF STRESSES ON THE BRANCH DURING PRESSURE TEST FOR RESIDUAL STRESSES RELAXATION

Tomaž VUHERER<sup>1)</sup>, Viljem ŠPRAH<sup>1)</sup>, Anton VAVPOTIČ<sup>2)</sup>, Vladimir GLIHA<sup>1)</sup>

**Ključne riječi:** tlačni cjevovod, račva, mjerne trake, deformacije, glavna naprezanja, tlačna proba, relaksacija zaostalih naprezanja

**Key words:** pressurized pipeline, branch, strain gages, deformations, principal stresses, pressure test, residual stress relaxation

**Sažetak:** Na račvi za jednu obnovljenu hidroelektranu u švicarskim Alpama na šest kritičkih mjestu mjerili smo prilikom tlačne probe deformacije te pomoću njih izračunali naprezanja. Upotrijebili smo biaksijalne mjerne trake za dva međusobno okomita pravca, koje smo zalijepili na račvu u predviđenim pravcima glavnih naprezanja. Račva je bila za vrijeme tlačne probe u zavarenome stanju. Naponsko odžarivanje za tu račvu nije bilo predviđeno. Izmjerena naprezanja odgovaraju predviđenim rezultatima dobivenim simulacijom opterećenja upotreboom metode konačnih elemenata. Kod rasterećenja je na najopterećenijem mjestu registrirana dosta velika plastična deformacija što ukazuje na znatnu relaksaciju zaostalih naprezanja. Mjerenjem deformacija za vrijeme tlačne probe račve a posebno poslije rasterećenja dokazana je korisnost postupka preopterećivanja račve za 50 % iznad najvećeg radnog tlaka za smanjenje zaostalih naprezanja.

**Abstract:** On the branch, made for the hydroelectric power station in Austrian Alps, during pressure test, the deformations on six critical points were measured and by the results, stresses were calculated. The biaxial strain gages for two perpendicular directions, bonded on the branch in predicted directions of principal stresses were used. During pressure test, the branch was already welded. The annealing for reduction of stresses was not predicted for this branch. Measured stresses match to predicted results obtained by load simulation with finite element method. During relaxation, on most loaded point, the rather large value of plastic deformation was recorded, what points out significant relaxation of residual stresses. By measuring of deformations during branch pressure test and particularly after the relaxation, the efficiency of branch overload process on the value of 50 % above maximal working pressure is validated in order to reduce residual stresses.

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

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

## 1. UVOD

Račva je najzahtjevni dio svakog tlačnoga cjevovoda. Pomoću nje razdvaja se tok vode koji se dovodi cjevovodom od akumulacije. Oblik račve je specifičan zbog njezine funkcije i mehaničkih opterećenja. Naš zadatak bio je eksperimentalno odrediti polje naprezanja na šest mjernih mesta za vrijeme izvođenja tlačne probe u zavisnosti od tlaka vode. To su bila ili najopterećenija ili najreprezentativnija mjesta na toj račvi. Tlačna proba izvodila se do tlaka 180 bar. To je preopterećenje u iznosu od 50 %. Svrha tog preopterećenja nije bila samo određivanje kakvoće zavara, već i relaksacija zaostalih naprezanja, jer za tu račvu nije bilo planirano naponsko žarenje. Slika 1 prikazuje fotografiju račve prije tlačne probe.



Slika 1. Račva na mjestu za izvođenje tlačne probe

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

Sastavni elementi takve zavarene konstrukcije su dijelovi konusa i cilindara. Bitni sastavni dio je srpasto ojačanje, ugrađeno na mjestu razdvajanja vodnog toka. Za ljsku račve upotrebljen je materijal S 460 ML (TStE 460 TM) debljina 70, 75, 80 i 94 mm. Deklariran je kao finozrnat termomehanički valjani čelični lim. Za srpasti dio račve upotrebljen je materijal S 690 QL debljine 210 mm. Kemijski sastav sa vrijednostima C-ekvivalenta te svojstva čelika prikazani su u tablicama 1 i 2 te 3 i 4. Za čelik S 690 QL propisana su bila mehanička svojstva i u smjeru debljine.

Tablica 1. Zahtijevani i stvarni sastav čelika S 460 ML

C	Si	Mn	P	S	N	Al	Ni	V	Mo	C <sub>E</sub>
tež. %										
≤ 0.16	≤ 0.6	≤ 1.7	≤ 0.025	≤ 0.02	≤ 0.025	≥ 0.02	≤ 0.8	≤ 0.12	≤ 0.20	≤ 0.45
.06/.09	.29/.40	1.5/1.6	.008/.013	.0003/.001	.003/.006	.03/.04	.40/.45	.00/.002	.01/.015	.24/.27

Tablica 2. Zahtjevan i stvarni sastav čelika S 690 QL

C	Si	Mn	P	S	N	Al	Cu
tež. %							
≤ 0.20	≤ 0.80	≤ 1.70	≤ 0.02	≤ 0.01	≤ 0.015	≥ 0.018	≤ 0.50
0.13	0.25	1.00	0.005	0.001	0.0024	0.062	0.19

Cr	Ni	Mo	V	Ti	Nb	Zr	B
tež. %							
≤ 1.5	≤ 2.00	≤ 0.70	≤ 0.12	≤ 0.05	≤ 0.08	≤ 0.15	≤ 0.005
0.51	1.50	0.47	0.011	0.003	0.002	0.002	0.002

Tablica 3. Zahtijevana i stvarna mehanička svojstva čelika S 460 ML

T, °C	R <sub>p0,2</sub> , MPa	R <sub>m</sub> , MPa	A <sub>5</sub> , %	CVN, J
+ 20	≥ 440 678	540 – 720 771	≥ 17 20	
- 50				≥ 27 uzdužno ≥ 16 poprečno

Tablica 4. Zahtijevana i stvarna mehanička svojstva čelika S 690 QL

T, °C	R <sub>p0,2</sub> , MPa	R <sub>m</sub> , MPa	A <sub>5</sub> , %	CVN, J
+ 20	≥ 630 678	710 – 900 771	≥ 14 20	
- 40				≥ 27 144

Zbog kompleksnog oblika račve i velikih debljina limova zavarivanje je veoma složeno. Za tu račvu trebali su zavariti kombinacije limova debljina 70/80 mm, 75/80 mm, 70/80 mm, 80/94 mm, 75/210 mm, 80/210 i 94/210 mm. Na mjestima, gdje treba spojiti srp sa koničnim ili cilindričnim dijelovima ljske tlačnog cjevovoda, dostupnost za zavarivanje je veoma slaba. Svi zvari su X i K oblika.

Korijen izrađen je poluautomatskim MAG postupkom žicom Böhler 2,5Ni.IG  $\phi 1,2$ , a popuna zvara je obavljena automatskim EPP postupkom žicom Böhler Ni2-UP+BB24  $\phi 3$ . Kako je sam korijenski dio odstranjen brušenjem, važna su svojstva materijala zavara izrađenog EPP postupkom.

Svojstva zavara su prikazana u tablici 5.

Tablica 5. Svojstva EPP zavara

Poprečna proba sa paralelnim bokovima		Uzdužna okrugla proba $\phi 10$ iz sredine vara			Charpy proba na - 40°C	
R <sub>m</sub> , MPa	Mjesto loma	R <sub>p</sub> , MPa	R <sub>m</sub> , MPa	A <sub>5</sub> , %	var, J	ZUT, J
522 - 571	osnovni materijal	529 - 548	569 - 593	26 - 28	52 - 256	32 - 120

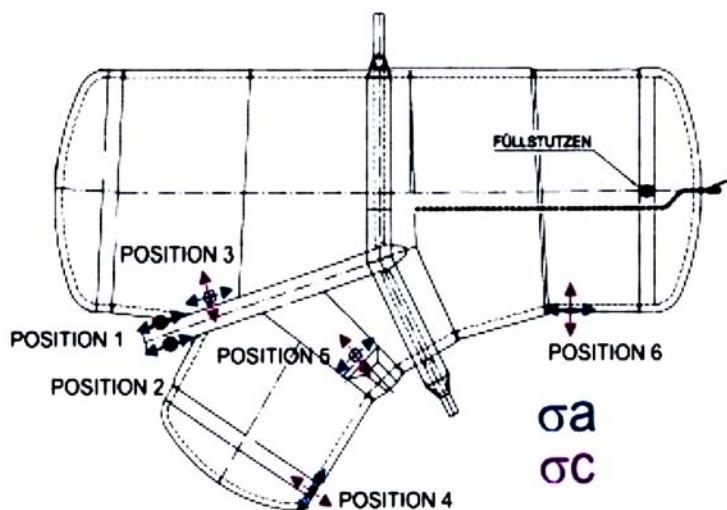
Srpasti dio račve bilo je potrebno naponsko odžariti na temperaturi  $560 \pm 10$  °C nakon oblikovanja rezanjem i prije zavarivanja.

Predgrijavanje se izvodilo na temperaturu najmanje 80 °C. Međuslojna temperatura medju držana je ispod 220 °C.

Unos topline bio je 1,5-2,5 kJ/mm. Izradena račva je na kraju podvrgnuta detaljnoj kontroli kakvoće zavara korištenjem MT, UZ in RT metoda ispitivanja materijala bez razaranja.

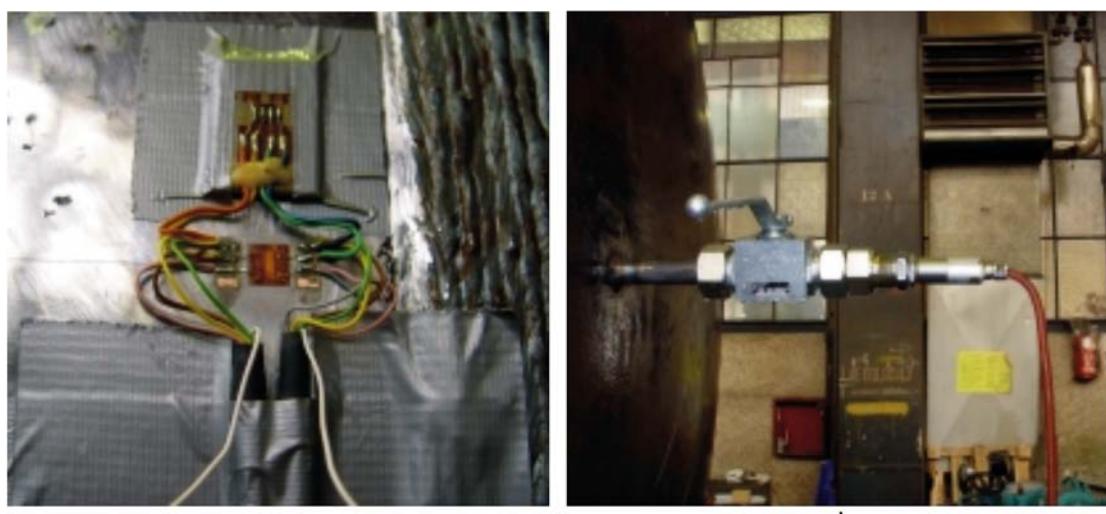
### 3. PRINCIP ODREĐIVANJA NAPREZANJA

Zadatak je bio, da se za vrijeme izvođenja tlačne probe na šest odabralih mjernih mesta eksperimentalno odredi polje naprezanja u zavisnosti od tlaka. Crtež račve sa mjernim mjestima označenima sa POSITION 1, 2, 3, 4, 5 i 6 vidimo na slici 2.



Slika 2. Račva sa mjernim mjestima (POSITION 1- 6), sa mjestom za punjenje vodom (FÜLLSTUTZEN) i mjerjenjem tlaka (sasvim desno), te oznakom aksijalnoga (indeks a) i cirkularnoga smjera (indeks c)

Deformacije zbog promjene naprezanja su posljedica povećanja ili smanjenja tlaka u račvi. Bilježili smo ih pomoću biaksialnih mjernih traka. To su po dvije međusobno okomito postavljene mjerne trake u jednom kućištu (slika 3a). Na račvu smo ih zalijepili na način, da je jedna traka bila usmjerena u aksijalnom a druga u cirkularnom smjeru cjevovoda. Tlak vode u račvi mjerili smo na cijevi koja izlazi kroz dance i završava u sredini račve (slika 2 i slika 3b).



Slika 3. Biaksijalna merna traka priljepljena na sud na mjernome mjestu 4 (a) i cijev koji prolazi kroz dance i služila je za mjerjenje tlaka (b)

Komponente deformacija i naprezanja u aksijalnome smjeru cjevovoda označili smo sa simbolima  $\varepsilon_a$  i  $\sigma_a$ , a na taj smjer okomite komponente, to je u cirkularnom smjeru, sa simbolima  $\varepsilon_c$  i  $\sigma_c$  (slika 1). Komponente biaksijalnog naponskog stanja  $\sigma_a$  i  $\sigma_c$  u predviđenim prvcima glavnih napona izračunali smo iz izmjerениh deformacija u tim smjerovima  $\varepsilon_a$  i  $\varepsilon_c$ , koristeći sljedeće relacije:

$$\sigma_a = E \frac{\varepsilon_a + \mu \varepsilon_c}{1 - \mu^2} ; \quad \sigma_c = E \frac{\varepsilon_c + \mu \varepsilon_a}{1 - \mu^2} \quad (1)$$

$E$  je Youngov modul i  $\mu$  Poissonov broj.

Za  $E$  smo koristili vrijednost 210 000 MPa, a za  $\mu$  vrijednost 0,3. Iste vrijednosti za  $E$  i  $\mu$  korištene su i kod simulacije opterećenja račve probnim tlakom sa metodom konačnih elemenata.

#### 4. POSTUPAK

##### **Kalibracija uređaja**

Kalibracijski test napravljen je u Laboratoriji za zavarivanje na Fakultetu za strojništvo v Mariboru prije izvođenja tlačne probe. Prisutne su bile odgovorne osobe za presudivanja kakvoće zavarene konstrukcije za vrijeme preuzimanja objekta. Taj test prikazan je na slici 4. Koristili smo kidalicu i kalibriran cilindrični komad iz ugljičnog čelika. Na njega smo zalijepili mjerne trake. Zbog poznatog opterećenja kidalice mogli smo izračunati napone i deformacije na tom komadu. Mjerenjem deformacija i izračunom napona dokazali smo ispravnost i izbaždarenost opreme, koju smo kasnije koristili kod tlačne probe.



Slika 4. Kalibracijski test na kidalici

##### **Priprema objekta za tlačno testiranje**

Obzirom na zahtjev naručioца mjerjenja (slika 2) odredili smo šest mjerna mesta na račvi i označili ih sa P1 – P6. Područja za lijepljenje mernih traka bila su brižno izbrušena, uglačana i očišćena. Zaključna obrada izvedena je ručno, koristeći brusni papir sa granulacijom 180 do  $400 \text{ cm}^{-2}$  i adekvatno kemijsko sredstvo kao neutralizator. Mjerne trake HBM tip 6/120XY91 pričvršćene su na površinu upotrebom specijalnoga ljepila. Zatim smo priključili na njih električke kablove. Jednima od njih, mjerne trake su snabdijevane konstantnom električkom strujom, a drugima se detektiraju signali. Aktivne mjerne trake povezali smo sa pasivnim i tako oblikovali polovinu Wheatstonovih mostova. Brinuli smo o tome, da ne bi bilo električkih smetnji ili smetnji na signalima zbog promjene temperature materijala. Prije testa Wheatstonove mostove smo električki izbalansirali. Fotografije na slici 5 prikazuju pripremu mernoga mesta 1.



Slika 5. Lijepljenje mjernih traka i montaža kablova

Za mjerjenje i pohranu mjernih rezultata koristili smo sistem:

National Instruments SCXI-1000 i SCXI-1520/SCXI-1314 te data acquisition card PCI-6035 E, 16 bit.

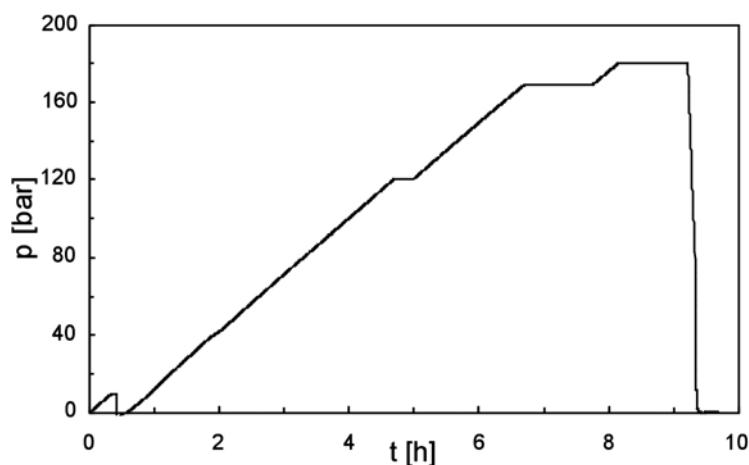
#### Izvedba tlačne probe

Najprije su račvu zavarivanjem zatvorili sa tri pripremljena danca i napunili je vodom. Zatim smo opremili mjerna mjesta sa mjernim trakama, te priključili senzor tlaka. Za opterećivanje tlakom sa unutrašnje strane tlačnoga suda koristili smo električnu pumpu. Vodu pod tlakom dovodili smo kroz priključak, koji je na slici 2 označen sa FÜLLSTUTZEN.

Nulto stanje naprezanja odredili smo pre početka testiranja kad je bila račva napunjena vodom. Signale sa mjernih traka smo u tom momentu ponovno izbalansirali na nulu, pošto je zbog težine vode i reakcija podnožja na nekim mjestima ipak račva bila donekle opterećena.

Izvedba tlačne probe od početka pa do konačnoga tlaka 180 bar prikazana je na slici 6.

Čitavo vrijeme bilježili smo tlak i deformacije na svim mjernim mjestima. Na osnovu podataka o tim deformacijama istovremeno izračunavali veličinu obje komponente naprezanja. Koristili smo jednadžbe 1. Na slici 6 vidimo, da smo račvu najprije opteretili sa tlakom 10 bara. Na tom tlaku pričekali smo nekoliko minuta i zatim račvu rasteretili. S obzirom da se tlak na 10 bar vremenom nije smanjivao, znali smo, da račva zaptiva. U isto vrijeme time ponovno smo kontrolirali mjerni sistem i ispravnost pumpe.



Slika 6. Promjena tlaka u račvi u zavisnosti od vremena

Zatim smo račvu opteretili do tlaka 120 bar. Tlak 120 bar je radni tlak račve. Posle toga bilo je predviđeno tlak podići na 180 bar. To je ispitni tlak račve. Na oko 170 bar sigurnosni ventil počeo je da propušta. Popravka ventila trajala je oko sat. Na 180 bar opterećivanje račve bilo je završeno. Tlak smo držali konstantan 50 minuta. Interesirali smo se za bilo kakvo smanjenje tlaka ili promjenu napona. To bi mogla biti posljedica plastične deformacije zbog puzanja materijala.

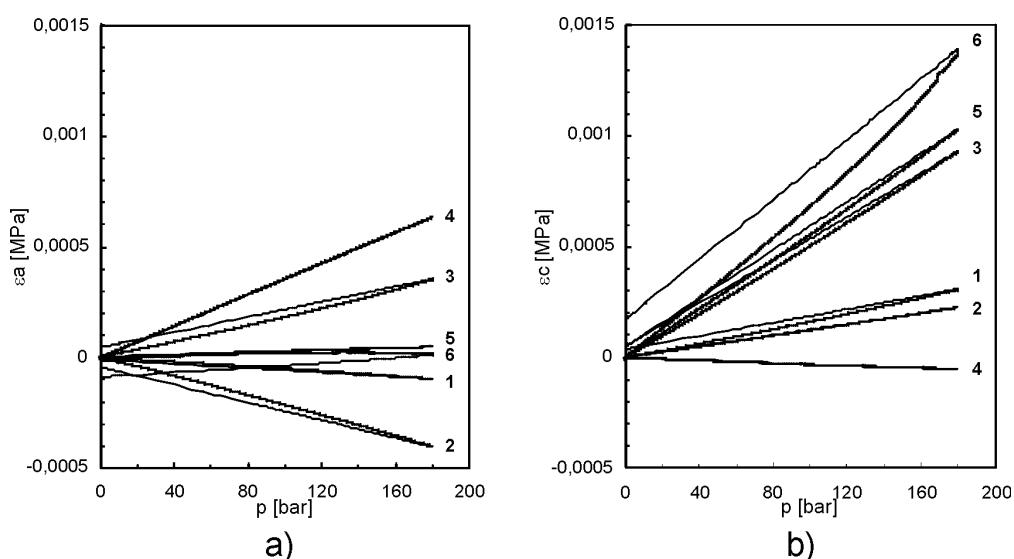
Na kraju smo račvu rasteretili i zabilježili deformacije u rasterećenome stanju. Time smo ustanovili da li je došlo zbog izvršene tlačne probe do relaksacije zaostalih napona. Tu relaksaciju pokušali smo zabilježiti također i običnom tračnim metrom (slika 7). To mjerjenje izvršeno je sasvim blizu mjernoga mjesta 6.



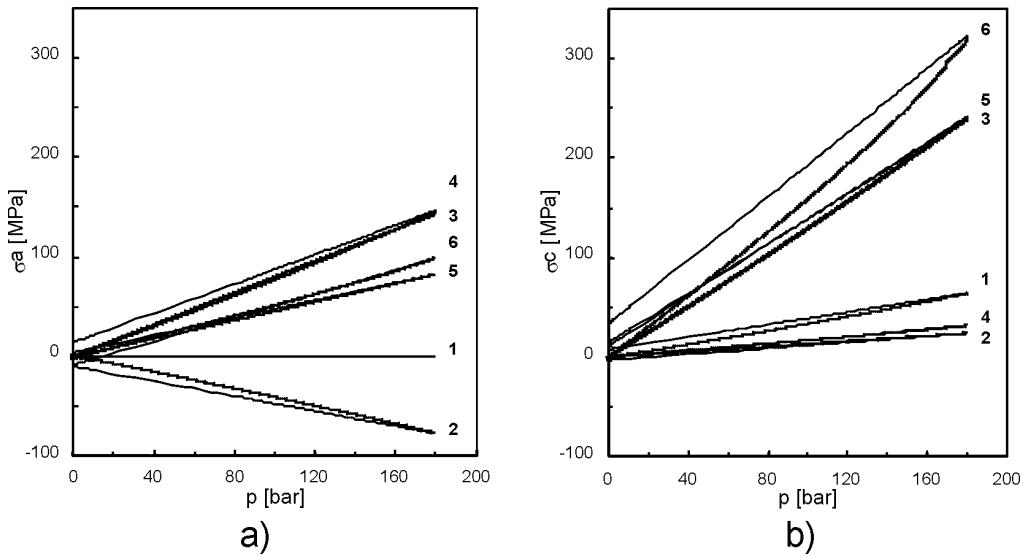
Slika 7. Mjerne trake na najopterećenijem dijelu račve - POSITION 6 (a) i pojednostavljen način ocjenjivanja cijelokupne deformacije cilindričnoga dijela račve (b).

## 5. REZULTATI I KOMENTAR

Rezultati izmjerениh deformacija tokom izvođenja tlačne probe tako u aksijalnom kako i u cirkularnom smjeru prikazani su na slici 8. Izračunata naprezanja u ista ta dva smjera prikazani su na slici 9.



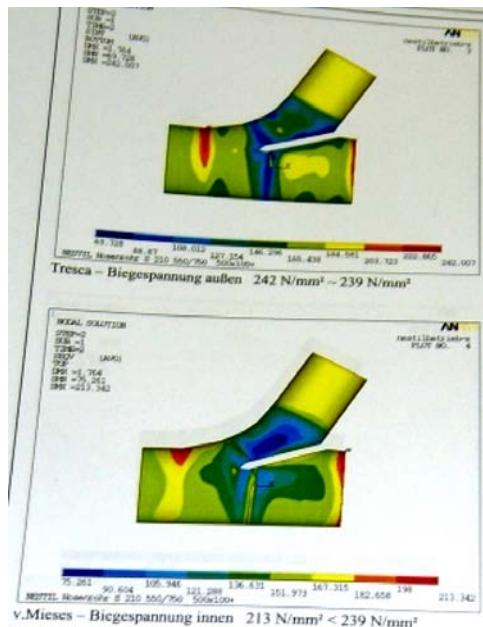
Slika 8. Izmjerene deformacije u aksijalnome (a) i cirkularnome smjeru (b) u zavisnosti od tlaka



Slika 9. Izračunati naponi u aksijalnome (a) i cirkularnome smjeru (b) u zavisnosti od tlaka

Po očekivanju naručioca mjerena najveća naprezanja u cirkularnome smjeru izmjerena su na mjernome mjestu 6, a slede oni na mjernim mjestima 5 i 3 (slika 9b). To su oni dijelovi račeve, koji su cilindričnog oblika. U aksijalnome smjeru su na istim mjestima izračunata manja naprezanja.

Naprezanja prikazana na slici 9 možemo usporediti sa rezultatima statičke analize račeve metodom konačnih elemenata, koji su prikazani na slici 10. Na gornjoj slici naprezanja su predstavljena po Trescinom kriteriju a na donjoj po kriteriju von Misesa. Položaji mjernih mesta za mjerjenje deformacija u vrijeme izvođenja tlačne probe bili su određeni baš na osnovu te analize naprezanja. Zbog toga što su se kod tog statičkog izračuna koristili isti podatci za svojstva čelika kao u relacijama 1, jedni i drugi rezultati gotovo su isti.



Slika 10. Rezultati analize naponu metodom konačnih elemenata

Na slikama 8 i 9 vidi se, da je za vrijeme popravke sigurnosnog ventila kod tlaka oko 170 bara došlo do određene relaksacije materijala. Još nešto veću relaksaciju od te zabilježili smo kod tlaka 180 bara. Te dvije relaksacije a možda i druge, koje zbog nekonstantnoga tlaka nisu uočljive, doprinijele su, da je na mjernome mjestu 6 zabilježene trajna deformacija u cirkularnome smjeru za skoro 0,0002 a u aksijalnome smjeru pola manje.

Tom relaksacijom donekle su se smanjila zaostala naprezanja od izrade račve zavarivanjem. Zabilježeni obim povećanja deformacije zbog relaksacije materijala odgovara u ugljičnom konstrukcijskom čeliku naprezanju od 40 Pa. U grubo bi mogli reći, da su se na tom mjestu za najmanje tu vrijednost smanjila i zaostala naprezanja. Usporedivu veličinu trajnog povećanja obima cijevi zabilježili smo naime i tračnim metrom (slika 7b).

Tračnim metrom smo kod najvećeg tlaka izmjerili za više od 10 mm povećanja opsega cijevi na mjestu u blizini mjernoga mjesta 6, što iznosi kod vanjskog promjera 2230 mm deformaciju od 0,0015. Baš toliko izmjerili smo i pomoću mjernih traka, što se vidi u tablici 8b. Kod skupljanja cijevi za vrijeme rasterećivanja nešto više od 1 mm nije vraćeno. To odgovara vrijednosti deformacije od 0,0002, koliko smo izmjerili upotrebom mjernih traka.

## 6. ZAKLJUČAK

Mjerenjem deformacija za vrijeme tlačne probe račve dokazali smo, da je bio statički proračun obavljen veoma korektno. Eksperiment i proračun su se na najopterećenijem dijelu račve razilazili za svega 5 MPa.

Također možemo zaključiti, da smo mjerenjem deformacija na opterećenoj račvi i poslije na rasterećenoj dokazali korisnost postupka preopterećivanja račve 50% iznad najvećeg radnog tlaka. Time su se naime donekle smanjila zaostala naprezanja na račvi, koja nije bila termički obrađena, pa je tako njeno korištenje zbog smanjenih zaostalih naprezanja puno sigurnije.

## 7. REFERENCE

- [1] 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
- [2] V. Gliha, T. Vuherer, Z. Burzić: Safety of a post-weld heat treated and repaired bifurcation, International conference "Welding 2006", Zlatibor