



Miodrag Arsić¹, Vencislav Grabulov¹, Mladen Mladenović¹, Zoran Savić¹

ANALYSIS OF CURRENT STATE AND STRENGTH EVALUATION OF THE PIPELINE AT HYDRO POWER PLANT 'PIROT' ANALIZA TRENUTNOG STANJA I OCENA ČVRSTOĆE CEVOVODA NA HIDROELEKTRANI PIROT

Originalni naučni rad / Original scientific paper

Rad je u izvornom obliku objavljen u Zborniku sa savetovanja „ZAVARIVANJE 2016“ održanog na Srebrnom jezeru 14-17. Septembra 2016

Rad primljen / Paper received:

Januar 2018.

Adresa autora / Author's address:

¹Institut za ispitivanje materijala, Bulevar vojvode Mišića 43, Beograd, Srbija

E-mail: miodrag.arsic@institutims.rs

Ključne reči: hidroelektrana, prslina, tehnologija sanacije, čvrstoća cevovoda

Key words: hydroelectric generating plant, crack, repair technology, pipeline strength

Rezime

Hidroelektrana Pirot, koja je izgrađena 1990 godine, je akumulaciona elektrana derivacionog tipa, koja se sastoji od dva nadzemna vertikalna agregata sa Francis turbinama nominalne snage 41,5 MW, proizvedene u Češkoj Republici, tunela i ukopanog cevovoda ukupne dužine 2030 m i prečnika od Ø 3000 mm do Ø 3500 mm. Cevovod debljine lima 22 mm je izrađen od čelika kvaliteta S275J2G3 (stara oznaka Č.0462). Maksimalni pritisak u njemu ispred turbinskog zatvarača je 2,5 MP.

Na cevovodu se u kontinuitetu od završetka izgradnje i puštanja u rad sprovode geodetska merenja kada je cevovod prazan i neopterećen hidrostatičkim pritiskom i kada je cevovod pun. Pregledom i analizom dobijenih podataka o pomeranjima duž trase cevovoda utvrđeno je da od 2003-2004 godine postoje znatno veće razlike u pomeranjima za pun i prazan cevovod, nego u prethodnom periodu.

U radu je izvršena analiza trenutnog stanja i ocena čvrstoće cevovoda kao celine na osnovu rezultata ispitivanja sučeonih zavarenih spojeva i ukrasnih masti metodama bez razaranja u zoni preloma na stacionaži - dužini cevovoda 1+263m (vizuelno ispitivanje, ispitivanje magnetnim česticama, ispitivanje penetrantima, ispitivanje ultrazvukom, radiografsko ispitivanje, metalografsko ispitivanje metodom replika).

Abstract

Hydro power plant Pirot, which was built in 1990, is an accumulation-derivative power plant, which consists of 2 above-ground vertical hydroelectric generating sets that contain Francis turbines with nominal power of 41,5 MW, manufactured in Czech Republic, a tunnel and a sunken pipeline with overall length of 2.030 m and diameter that ranges from 3.000 to 3.500 m. Pipes have been made of S275J2G3 steel. Pipe wall is 22 mm thick. Maximum pressure of 2.5 MPa occurs in front of the turbine cover.

Geodetic measurements have been conducted permanently from the day the assembly was finished and pipeline was put into service, both when pipeline is empty and unloaded by hydrostatic pressure and when it is full. Analysis of obtained data regarding the movements along the pipeline route showed that from year 2003 there are significantly higher differences in movements comparing the situations when the pipeline is full and when it is empty in comparison with the previous period.

This paper contains the analysis of current state and strength evaluation of the pipeline as a whole on the basis of results of non-destructive tests performed on the vital butt - welded joint in the curvature area at chainage 1+263 m (visual testing, magnetic particle testing, penetrant testing, ultrasonic testing, radiographic testing, metallographic replication testing).



1. UVOD

Hidroelektrana Pirov je locirana neposredno u blizini grada Pirota i koristi vode Visocke reke na profilu brane Zavoj. Izgrađena je 1990 godine kao akumulaciona elektrana derivacionog tipa, koja se sastoji od dva nadzemna vertikalna agregata sa Francis turbinama nominalne snage 41,5 MW (sl. 1) proizvedene u Češkoj Republici [1], tunela i ukopanog cevovoda pod pritiskom ukupne dužine 2030 m i prečnika od \varnothing 3000 mm do \varnothing 3500 mm. Maksimalni pritisak u cevovodu je 2,5 MP. Cevovod debljine lima 22 mm je izrađen od čelika kvaliteta S275J2G3 (stara oznaka Č.0462) [2], za koji su hemijski sastav i mehaničke osobine date u tab. 1 i u tab. 2.

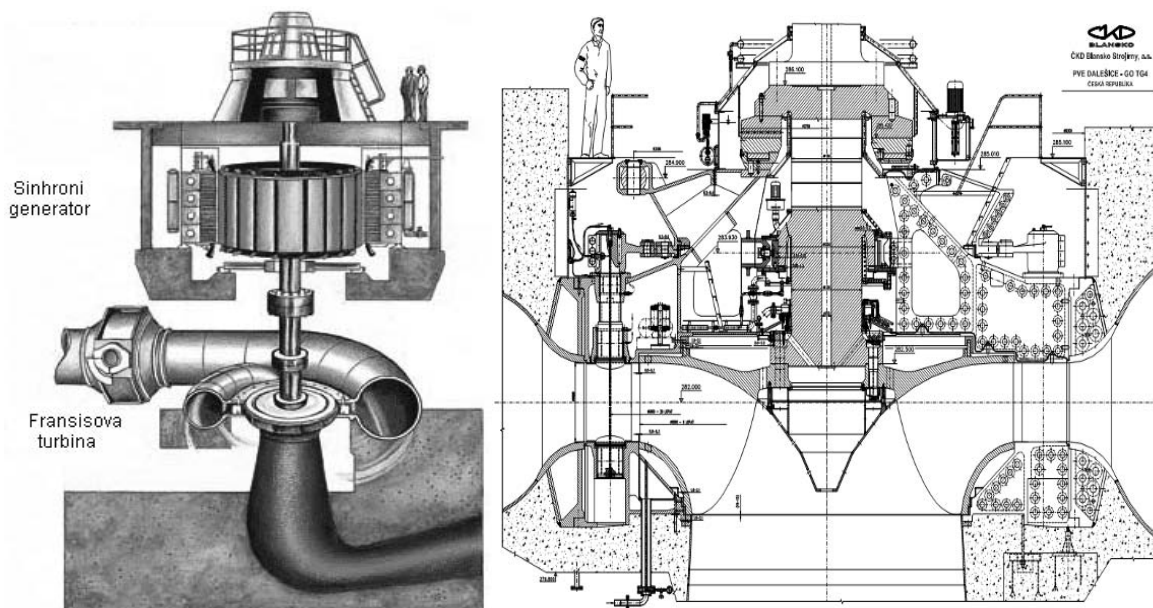
Cevovod je projektovan i izgrađen bez ankernih blokova na prelomima, što predstavlja retkost u svetu. U cilju analiza trenutnog stanja i ocene integriteta cevovoda kao celine izvršena su ispitivanja, metodama bez razaranja, vitalnih sučeonih zavarenih spojeva (ZS) i ukrasnih mesta u zoni preloma na stacionaži – dužini cevovoda 1+263 m, sl. 2. Na tom delu cevovoda, prema projektnoj dokumentaciji, vertikalni prelom cevovoda iznosi $7,18^\circ$, a horizontalni $9,82^\circ$ i prelaz cevi sa prečnika \varnothing 3500 mm na prečnik \varnothing 3340 mm. Na sl. 3 prikazana je priprema cevovoda za predviđena ispitivanja.

| Materijal | C | Si | Mn | Cu | S | P |
|-----------|-------|----|------|-------|-------|-------|
| S275J2G3 | 0.210 | – | 1.60 | 0.060 | 0.035 | 0.045 |

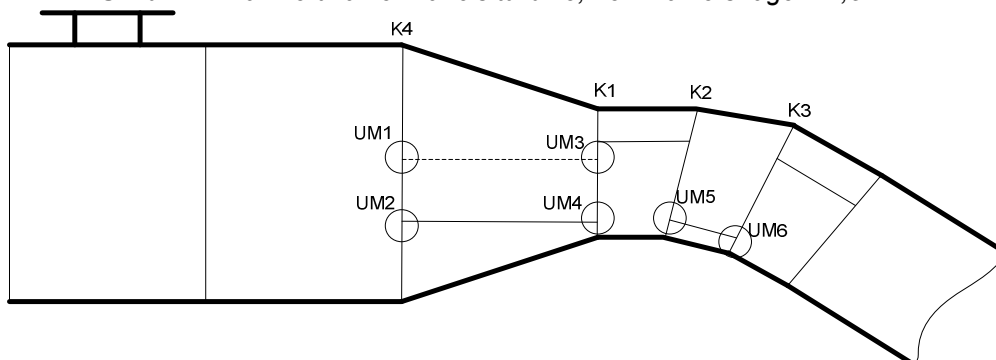
Tabela 1. Hemijski sastav, vrednosti u [%]

| Materijal | Napon tečenja $R_{0.2}$ [N/mm ²] | Zatezna čvrstoća R_m [N/mm ²] | Izduženje A5 [%] | Energija udara $KV_{300/2}$ [J/cm ²] |
|-----------|---|--|---------------------|---|
| S275J2G3 | min 275 | 430 – 560 | 21 - 23 | 27 (- 20 °C) |

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



Slika 1. Prikaz vertikalne Francis turbine, nominalne snage 41,5 MW



Slika 2. Skica ispitanih ZS i ukrasnih mesta na prelomu trase cevovoda na stacionaži 1+263 m



a) Brušenje spoljašnjeg dela cevovoda



b) Brušenje unutrašnjeg dela cevovoda

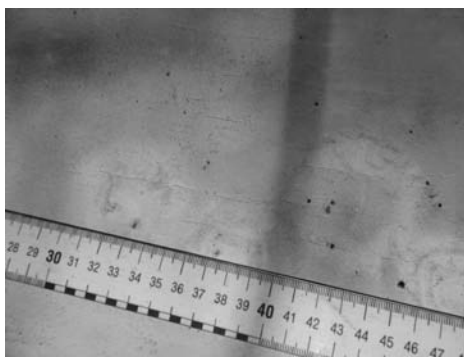
Slika 3. Prikaz pripreme brušenjem vitalnog zavarenog spoja na cevovodu radi ispitivanja

2. ISPITIVANJA METODAMA BEZ RAZARANJA VITALNOG ZAVARENOG SPOJA

Za potrebe analize trenutnog stanja i ocene integriteta cevovoda kao celine izvršena su sledeća ispitivanja metodama bez razaranja: vizuelno ispitivanje (VT), ispitivanje magnetnim česticama (MT), ispitivanje penetrantima (PT), ispitivanje ultrazvukom (UT), radiografsko ispitivanja (RT) i metalografsko ispitivanje metodom replika.

2.1 Vizuelno ispitivanje

Vizuelnim ispitivanjem [3] vitalnog sučeonog zavarenog spoja (ZS) u zoni najvećeg geometrijskog preloma cevovoda, u gornjoj zoni na spoljašnjoj strani cevovoda, utvrđene su površinske indikacije (prslina) u metalu šava (MŠ) na 5 mesta i veći broj prslina u zoni uticaja toplote (ZUT) i u osnovnom materijalu (OM). Međutim, u donjoj zoni sa unutrašnje strane cevovoda utvrđene su površinske indikacije (prslina) samo u OM. Najveća utvrđena dobina prslina je veličine 2,5mm, a njihove duzine variraju pri čemu je najduža utvrđena u OM po obimu ZS i iznosi 540 mm, sl. 4.



Slika 4. Prikaz ispitane površine OM po obimu sučeonog zavarenog spoja K2 (zona 800 mm x 250 mm)

2.2 Ispitivanje magnetnim česticama

Ispitivanja magnetnim česticama [4] ZS, sa spoljnje i unutrašnje strane cevovoda, izvršena su da bi se proverilo postojanje površinskih prslina, sl. 5.



a) Prikaz površinskih prslina u OM



b) Prikaz površinske prsline dužine 70 mm u MŠ

Slika 5. Prikaz ispitivanja magnetnim česticama zone zavarenog spoja K2 sa spoljašnje strane cevovoda



2.3 Ispitivanje penetrantima

Ispitivanja penetrantima ZS [5], sa spoljašnje i unutrašnje strane cevovoda, izvršena su da bi se proverilo postojanje površinskih prslina, sl. 6.



a) Prikaz površinske prsline u ZUT



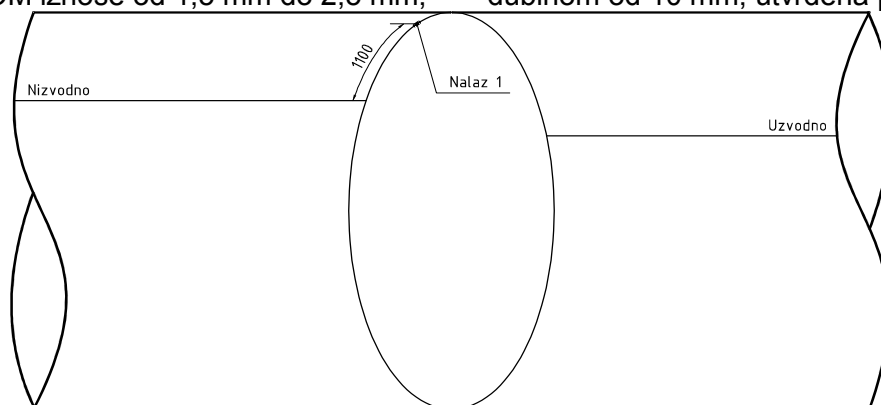
b) Prikaz površinskih prslina u OM

Slika 6. Prikaz ispitivanja penetrantima zone zavarenog spoja K2 sa spoljnje strane cevovoda

2.4 ispitivanje ultrazvukom

Ispitivanja ultrazvukom OM i ZS [6], sa spoljašnje i unutrašnje strane cevovoda, izvršena su da bi se utvrdile dubine površinskih prslina. Utvrđeno je da dubine prslina u OM iznose od 1,5 mm do 2,5 mm,

a dubine prslina u MŠ od 3,5 mm do 10,0 mm. Na sl. 7 prikazana je lokacija jedne od površinskih prslina u sučeono ZS cevovoda sa najvećom dubinom od 10 mm, utvrđena pri UT ispitivanju.



Slika 7. Ispitivanja UT dubina površinskih prslina u zoni ZS sa spoljašnje strane cevovoda

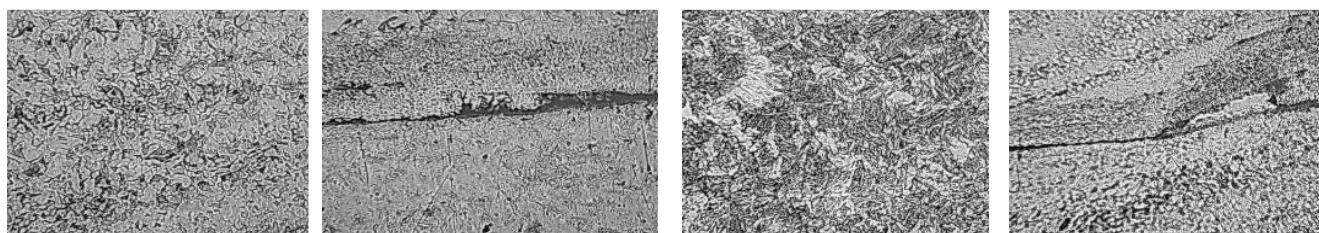
2.5 Radiografsko ispitivanja

Radiografskim ispitivanjem [7] utvrđene su mestimične greške tipa zajedaja u korenom delu sučeonog ZS, dužina: 30mm, 35 mm, 65 mm, 75 mm, 100 mm i 240 mm.

2.6 Metalografsko ispitivanje metodom replika

Metalografskim ispitivanjem metodom replika [8], utvrđeno je mikrostrukturno stanje OM cevovoda. Ispitivanje je izvršeno na metalografskom mikroskopu marke "METAVAL" proizvođača "Carl Zeiss" iz Jene (Nemačka) korišćenjem tehnike

svetlog polja, nakon priprema ispitanih površina (čišćenje, odmašćivanje, niz operacija finog brušenja, završno poliranje, ispiranje, nagrizanje 4%-nim nitalom). Rezultati ispitivanja su pokazali da je mikrostruktura površinskog sloja OM cevovoda feritno-perlitna sa prisutnim sitnim nemetalnim uključcima i produktima korozije, kao i makroprslinama dužina od 12 mm do 15 mm, a da je mikrostruktura MŠ krupnozrnasta feritno-perlitna sa prisutnim sitnim nemetalnim uključcima, produktima korozije i makroprslinama dužina od 30 mm do 35 mm. Karakteristični rezultati ispitivanja prikazani su na sl. 8.



b) Mikrostruktura OM

c) Jedna od prslina u OM

d) Mikrostruktura MŠ

e) Prslina u ZS

Slika 8. Karakteristični rezultati metalografskog ispitivanja mikrostruktura (metoda replika)

3. TEHNOLOGIJA SANACIJE PRSLINA U OSNOVNOM MATERIJALU I ZAVARENOM SPOJU

Analizom parametara od kojih zavisi izbor postupka reparaturnog zavarivanja/navarivanja (zavarljivost materijala, energetske mogućnosti postupaka zavarivanja, geometrijska složenost konstrukcije, ekonomski pokazatelji) utvrđena je celishodnost primene postupak 111. Zbog ograničenih mogućnosti izvođenja predgrevanja i termičke obrade nakon reparaturnog zavarivanja/navarivanja, optimalno rešenje je korišćenje elektroda sa bazičnom oblogom. Površinske prsline u OM sanirane su finim brušenjem, a

prsrline u zonama vitalnog ZS reparaturnim zavarivanjem/navarivanjem primenom postupak 111 sa elektrodom E42 4 B 32 H5, komercijalne oznake EVB 50 (Elektrode Jesenice), klasifikovan prema standardu [9]. Hemijski sastav čistog metala šava elektrode dat je u tab. 3, a mehaničke osobine u tab. 4. Na sl. 9 prikazana je priprema prsrline sa najvećom dužinom i dubinom za sanaciju. U toku i posle sanacija prsrline u OM i vitalnom ZS cevovoda sprovedena su ispitivanja metodama VT i MT/PT.

| Elektroda | C | Si | Mn | Mo |
|-----------|------|------|------|------|
| EVB Mo | 0.10 | 0.50 | 0.80 | 0.50 |

Tabela 3. Hemijski sastav, vrednosti u [%]

| Elektroda | Napon tečenja Rp0.2% [N/mm ²] | Zatezna čvrstoća R _m [N/mm ²] | Izduženje A5 [%] | Energija udara KV _{300/2} [J/cm ²] |
|-----------|--|---|---------------------|--|
| EVB Mo | > 450 | 530 – 630 | > 22 | 47 (- 20 °C) |

Tabela 4. Mehaničke osobine čistog metala šava



a) Priprema jedne od prsrline za sanaciju



b) Prsrline u zavarenom spoju K2 priprmljena za sanaciju

Slika 9. Sanacija prsrline u ZS sa spoljašnje strane cevovoda, utvrđene ispitivanjima PT i UT

4. PRORAČUN ČVRSTOĆE CEVOVODA

Prema direktivi za opremu pod pritiskom [10], za projektovanje i ocenu integriteta cevovoda u eksploataciji predviđene su proračunske metode zasnovane na empirijskim formulama, analitičkim postupcima i mehanici loma. Ocena integriteta cevovoda u eksploataciji na osnovu rezultata ispitivanja bez razaranja i nakon izvršene sanacije

finim brušenjem i zavarivanjem/navarivanjem izvršen je analitički proračun čvrstoće cevovoda. Proračun čvrstoće omotača i danca u odnosu na unutrašnji pritisak sproveden je u skladu sa standardom EN 13445-3 [11]. Prema dokumentaciji proizvođača, osnovne tehničke karakteristike cevovoda su sledeće:



- napon tečenja za materijal omotača i danca na sobnoj temperaturi $R_{p0,2} = 275$ [MPa]
- zatezna čvrstoća za materijal omotača i danca na sobnoj temperaturi $R_m = 430$ [MPa]
- spoljašnji prečnik omotača $D_o = 3340$ [mm]
- unutrašnji prečnik omotača $D_i = 3308$ [mm]
- nominalna debljina materijala omotača i danca $t_o = 22$ [mm]
- radni pritisak na stacionaži – dužini cevovoda 1+263 m $p = 1.26$ [MPa]
- koeficijent zavarenog spoja $z = 0.8$

$$\frac{D_o}{D_i} = \frac{3340}{3308} = 1.01 < 1.2 - \text{uslov koji dokazuje}$$

primenljivost standarda (1)

4.1 Proračun čvrstoće cevovoda u odnosu na unutrašnji pritisak

Proračunom čvrstoće u odnosu na unutrašnji pritisak (jednačina br. 2) dokazano je da je debljina cilindričnog dela omotača dovoljna, odnosno da izračunata vrednost debljine nije veća od izmerene koja je navedena u paragrafu 2.4.1. Zahtevana debljina loma cevovoda određuje se na sledeći način:

$$t = \frac{D_o \cdot p}{2 \cdot f \cdot z + p} + \delta_e + c = \frac{3340 \cdot 1.26}{2 \cdot 1.37,5 \cdot 0,8 + 1,26} + 0,8 + 1,0 = 20,8 \text{ mm} < 22 \text{ [mm]} \quad (2)$$

U jednačini (2) prema standardu [10], vrednost 0,8 predstavlja dodatak za dozvoljeno odstupanje debljine materijala, a vrednost 1,0 dodatak za korozijska oštećenja. Za koeficijent čvrstoće f se uzima manja vrednost izračunata jednačinom (3):

$$f = \min\left(\frac{YS_{0,2}}{1,5}; \frac{TS}{2,4}\right) = \min\left(\frac{275}{1,5}; \frac{430}{2,4}\right) = (137,5; 180)$$

(3)

S obzirom da površine prsline u OM nisu u potpunosti otklonjene finim brušenjem, da bi se bilo na strani sigurnosti, proračun čvrstoće cevovoda kao celine (proračun minimalno potrebne deljina lima) je izvršen za minimalne vrednosti granice tečenja i zatezne čvrstoće materijala S275J2G3, kao i za koeficijent valjanosti ZS (koeficijent oslabljenja ZS) predviđen za „C” klasu kvaliteta.

5. ZAKLJUČAK

Integritet konstrukcija je relativno nova naučna i inženjerska disciplina, koja u širem smislu obuhvata analizu stanja i dijagnostiku ponašanja i popuštanja, procenu veka i revitalizaciju konstrukcija. To znači da u situaciji kada se ispitivanjem bez razaranja otkrije greška, ova

disciplina obuhvata i proračun čvrstoće konstrukcije.

Analizom stanja vitalnog zavarenog spoja i proračunom čvrstoće, odnosno minimalno potrebne debljine lima, utvrđeno je da integritet konstrukcije cevovoda kao celine nije ugrožen.

ZAHVALNICA

Autori se zahvaljuju Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Srbije na podršci za realizaciju projekta TR 35002.

LITERATURA

- [1] Dokumentacija proizvođača za hidroagregate ČKD Blansko, Republika Češka, 1990.
- [2] SRPS EN 10025-1, Toplovaljani proizvodi od konstrukcionih čelika – Opšti tehnički zahtevi za isporuku, Institut za ctandardizaciju Srbije, 2014.
- [3] SRPS EN ISO 17637, Ispitivanje zavarenih spojeva metodama bez razaranja – Vizuelno ispitivanje zavarenih spojeva topljenjem, Institut za ctandardizaciju Srbije, 2012.
- [4] SRPS EN ISO 17638, Ispitivanje zavarenih spojeva metodama bez razaranja – Ispitivanje magnetskim česticama, Institut za ctandardizaciju Srbije, 2012.
- [5] SRPS EN ISO 3452-1, Ispitivanje bez razaranja – Penetrantsko ispitivanje – Deo 1: Opšti principi, Institut za ctandardizaciju Srbije, 2014.
- [6] SRPS EN 1714, Ispitivanje zavarenih spojeva metodama bez razaranja – Ispitivanje zavarenih spojeva ultrazvukom, Institut za ctandardizaciju Srbije, 2010.
- [7] EN 1435, Ispitivanje zavarenih spojeva metodama bez razaranja – Radiografsko ispitivanje zavarenih spojeva, Institut za ctandardizaciju Srbije, 2010
- [8] ISO 3057, Non-destructive testing - Metallographic replica techniques of surface examination, International Organization for Standardization, 1998.
- [9] EN 499, E 42 2 Mo B 42, Welding consumables. Covered electrodes for manual metal arc welding of non alloy and fine grain steels. Classification, 1995.
- [10] The Pressure Equipment Directive 97/23/EC, European Parliament, 1997.
- [11] SRPS EN 13445-3, Posude pod pritiskom koje nisu izložene plamenu – Deo 3: Projektovanje - Izmena 2, Institut za ctandardizaciju Srbije, 2008.