

KONTROLNI PRORAČUN ČVRSTOĆE HORIZONTALNE POSUDE POD PRITISKOM STRENGTH DESIGN CALCULATION OF A HORIZONTAL PRESSURE VESSEL

Originalni naučni rad / Original scientific paper
UDK /UDC: 66-988
621.642.031-988
Rad primljen / Paper received: 29.04.2013.

Adresa autora / Author's address:

¹) Univerzitet u Beogradu, Inovacioni centar Tehnološko-metalurškog fakulteta, Beograd, Srbija

²) Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja, Beograd, Srbija

³) Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, Srbija

Ključne reči

- oprema pod pritiskom
- rezervoar za vodu
- standardi
- evropska norma

Izvod

Standardi SRPS M.E2.250-262 za proračun posuda pod pritiskom su zamenjeni standardom SRPS EN 13445-3. To podrazumeva da proračuni nove opreme, kao i kontrolni proračuni opreme u eksploataciji, podležu obaveznoj primeni Pravilnika o tehničkim zahtevima za projektovanje, izradu i ocenjivanje usaglašenosti jednostavnih posuda pod pritiskom. U radu je urađen kontrolni proračun čvrstoće cilindričnog horizontalnog rezervoara za vodu prema seriji standarda SRPS M.E2 i standardu SRPS EN 13445 i izvršena je uporedna analiza rezultata. Kontrolni proračun obuhvata cilindrični omotač i dva plitka torisferična danca izložena dejstvu unutrašnjeg pritiska od 8 bar, kao i procenu oslabljenja konstrukcije usled revizionog otvora DN400 na kaloti jednog od danaca.

UVOD

Pravilnik o tehničkim zahtevima za projektovanje, izradu i ocenjivanje usaglašenosti jednostavnih posuda pod pritiskom (u nastavku rada Pravilnik 87/2011) je dokument kojim se propisuju tehnički zahtevi koji se odnose na projektovanje, izradu i ocenjivanje usaglašenosti serijski proizvedenih jednostavnih posuda pod pritiskom, /1/. Za razliku od pravilnika, standard je prema definiciji dokument koji definiše karakteristike proizvoda i zahteve koje proizvod treba da ispuni, kao i postupke proizvodnje ili metode ispitivanja i ocenjivanja usaglašenosti proizvoda sa zahtevima. Standardi nastaju i razvijaju se kao rezultat dostignuća u nauci i tehnici, kao i na osnovu iskustva i dobre prakse u svim oblastima. Serija standarda za proračun posude pod pritiskom (SRPS M.E2.250-262) je nevažeća u Srbiji i zamenjena je standardom SRPS EN 13445-3. Veliki broj posuda pod pritiskom koje su dimenzionisane prema seriji standarda SRPS M.E2 i dalje se nalazi u eksploataciji, pa postoji potreba da se uradi proračun prema SRPS EN standardu u cilju utvrđivanja da li su zadovoljeni svi uslovi postavljeni važećim standardom i da li je posuda bezbedna za dalju upotrebu. Veliki broj radova je posvećen analizi standarda EU i njihovim poređenjem sa nacionalnim stan-

Keywords

- pressure equipment
- water tank
- standards
- European norm

Abstract

Standards SRPS M.E2.250-262 for calculation of pressure vessels have been replaced by SRPS EN 13445-3. This means that calculations of new equipment and check calculations of equipment in service are subjected to ordinance on the technical requirements for the design, development and conformity assessment of simple pressure vessels. The paper presents a strength design calculation of a horizontal cylindrical water tank according to a series of standards SRPS M.E2 and SRPS EN 13445, including a comparative analysis of results. The check calculation includes the cylindrical shell and two shallow torispherical dished ends under working pressure of 8 bar, and the assessment of decreased load-carrying capacity due to inspection opening DN400 at the spherical part of dished end.

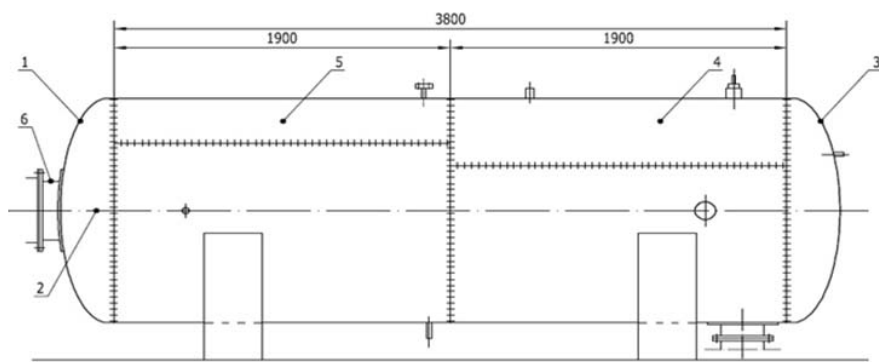
dardima pojedinih zemalja, /2-4/. U skladu sa tim, mnogi autori su se bavili analizom stanja u Srbiji i usaglašavanjem standarda sa Evropskom Normom, /5/.

U radu je urađen kontrolni proračun čvrstoće cilindričnog horizontalnog rezervoara za vodu, koji se sastoji od cilindričnog omotača i dva plitka torisferična danca. Rezervoar je sastavni deo sistema za protivpožarnu zaštitu u termoelektrani i radi pod pritiskom gasa CO₂ (8 bar) samo u slučaju požarnih situacija. Prema tome, rezervoar se pod pritiskom nalazi vrlo kratko vreme (požarne situacije), dok se ostali deo vremena nalazi samo pod stubom tečnosti.

TEHNIČKI OPIS POSUDE

Rezervoar, zapremine 7000 litara i spoljašnjeg prečnika 1500 mm, izrađen je zavarivanjem kao cilindrična, horizontalna posuda sa prednjim i zadnjim plitkim torisferičnim dancem.

Na prednjem delu rezervoara (centralno u odnosu na osu prednjeg danca) nalazi se otvor DN400. Otvor je izveden u obliku priključka i spoj priključka je na odgovarajući način ojačan prstenastom pločom koja je zavarena za dance. Poklopac priključka je takve konstrukcije da može lako da



| Merno mesto | Minimalna debljina |
|-------------|--------------------|
| 1 | 10,4 mm |
| 2 | 10,6 mm |
| 3 | 10,3 mm |
| 4 | 10,2 mm |
| 5 | 10,3 mm |
| 6 | 10,6 mm |

Slika 1. Rezultati radiografskog ispitivanja sa mernim mestima na rezervoaru

se skida u slučaju kontrole unutrašnjosti rezervoara i njegovog čišćenja.

Na zadnjem dancu, 160 mm ispod gornje ivice posude, nalazi se „preliv“ za vodu – priključak DN20. Prelivni otvor je zatvoren preko ventila i otvara se samo u slučaju dolivanja vode u posudu.

Oslanjanje posude na pod izvršeno je preko masivnih postolja („kolevki“) od armiranog betona MB 250 na koje omotač posude direktno naleže. Da bi se posuda zaštitila od korozije usled prisustva vode, unutrašnja površina posude je premazana slojem epoksi smole.

Namena rezervoara je da stalno bude napunjen vodom i u punoj pripravnosti za gašenje požara na izlaznom transformatoru snage 360 MW. U slučaju pregrevanja ili požara na transformatoru, automatski se jedna za drugom otvaraju boce sa ugljen-dioksidom (CO₂), koje su smeštene u blizini rezervoara. Najveći radni pritisak gasa u rezervoaru je 8 bar i on se zadržava za vreme pražnjenja rezervoara, /6/.

REZULTATI RADIOGRAFSKOG ISPITIVANJA

Debljine zida delova posude određene su radiografskim ispitivanjima i rezultati merenja sa mernim mestima na rezervoaru prikazani su na sl. 1.

ODREĐIVANJE KLASSE POSUDE POD PRITISKOM

Prema SRPS M.E2.151

Pri određivanju projektne klase posude razmatra se uticaj opštih (pritisak, zapremina, temperatura, radna materija i akumulirana energija) i lokacijskih faktora. Na osnovu broja bodova za opšte faktore (tab. 1) i procene uticaja lokacijskih faktora (ne ocenjuju se bodovima, već se uzimaju u obzir mogućim izborom više klase posude od one koju zahtevaju opšti faktori) određuje se klasa posude /7, 8/.

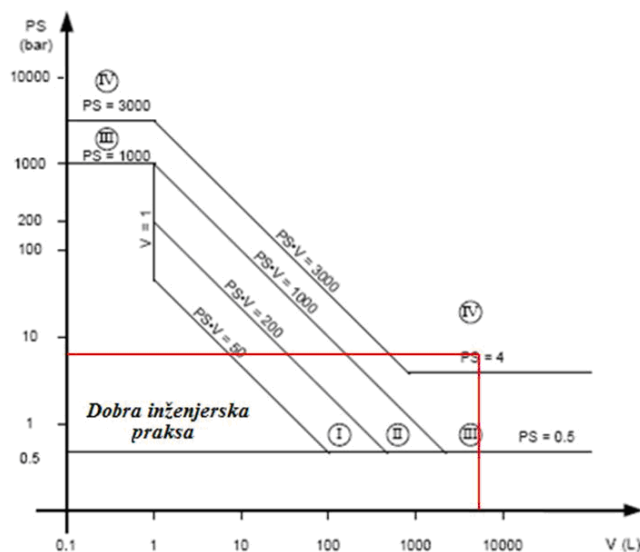
Tabela 1. Opšti faktori za određivanje projektne klase posude prema SRPS M.E2.151

| Opšti faktori | Vrednosti | Bodovi |
|----------------------|------------------------------|------------------|
| Pritisak | $p = 8,0 \text{ bar}$ | 1 |
| Zapremina | $V = 7 \text{ m}^3$ | 1 |
| Temperatura | $t = 20^\circ\text{C}$ | 0 |
| Radna materija | voda (komp.CO ₂) | 0 |
| Akumulirana energija | $pV_g = 56 \text{ bar m}^3$ | 2 |
| | | Ukupno bodova: 4 |

ODREĐIVANJE KATEGORIJE POSUDE POD PRITISKOM

Prema Pravilniku 87/2011

Pravilnik 87/2011 se primenjuje na projektovanje, proizvodnju i ocenjivanje usaglašenosti opreme i postrojenja pod pritiskom (za pritisak veći od 0,5 bar) /1/. Prema Pravilniku 87/2011 kategorija opreme se određuje na osnovu odgovarajućeg dijagrama, koji se primenjuje u zavisnosti od grupe radnog fluida (grupa 1 ili grupa 2), opreme (posuda ili cevovod) i proizvoda najvećeg dozvoljenog pritiska, PS, i zapremine, V (kod posuda), odnosno najvećeg dozvoljenog pritiska i nominalnog prečnika cevi, DN (kod cevovoda). Grupa 1 obuhvata eksplozivne, izuzetno zapaljive, veoma zapaljive, zapaljive (najveća dozvoljena temperatura iznad tačke paljenja), veoma otrovne, otrovne i oksidirajuće fluide, dok se u grupu 2 svrstavaju svi ostali fluidi. U zavisnosti od stepena opasnosti, razlikuju se četiri kategorije posuda pod pritiskom, pri čemu se kategorija I odnosi na najmanju, a kategorija IV na najveću opasnost po život ljudi i životnu sredinu. Oprema sa niskim nivoom rizika, odnosno, oprema koja ne može da se razvrsta ni u jednu od kategorija, svrstava se u posebnu kategoriju i sa njom se postupa po „dobra inženjerska praksa“ (SEP – Sound Engineering Practice), /9, 10/.



Slika 2. Određivanje kategorije posude za gasove grupe 2 prema Pravilniku 87/2011

Na sl. 2, prikazan je dijagram koji se koristi za određivanje kategorije posude pod pritiskom razmatrane u radu, za pritisak 8 bar, zapreminu 7000 lit. i CO₂ kao fluid grupe 2 prema Pravilniku 87/2011.

U radu su određene klasa posude prema SRPS M.E2.151 i kategorija prema Pravilniku 87/2011 i rezultati su prikazani u tab. 2.

Tabela 2. Projektna klasa i kategorija posude pod pritiskom

| Klasa/Kategorija posude | SRPS M.E2.151 | Pravilnik 87/2011 |
|-------------------------|---------------|-------------------|
| | | IV |

Prema SRPS M.E2.151 dobijena je klasa IV koja se odnosi na najmanji stepen opasnosti, dok je prema Pravilniku 87/2011 dobijena kategorija IV koja se odnosi na najveću opasnost po život ljudi i životnu sredinu. Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da je Pravilnik 87/2011 rigorozniji u proceni stepena opasnosti.

PRORAČUN CILINDRIČNOG OMOTAČA POSUDE

Podaci potrebni za proračun:

- materijal posude: Č 1208
- zapremina posude: 7000 l
- spoljašnji prečnik posude: 1500 mm
- najveći radni pritisak: 8 bar
- radna temperatura: 20°C

Proračun cilindričnog omotača posude je urađen prema standardima SRPS M.E2.253 i SRPS EN 13445-3.

SRPS M.E2.253 je standard za proračun čvrstoće glatkih cilindričnih i kuglastih omotača izloženih dejstvu unutrašnjeg pritiska i odnosi se na omotače kod kojih je odnos spoljašnjeg i unutrašnjeg prečnika jednak ili manji od 1,2/11/. Kod rezervoara za vodu, koji je predmet rada, ispunjen je navedeni uslov. Standard SRPS EN 13445-3 definiše kompletan proračun posuda pod pritiskom koje nisu izložene plamenu, /12/.

U tab. 3 dat je uporedni prikaz matematičkih formula koje se koriste za izračunavanje potrebne debljine zida cilindričnog omotača posude prema navedenim standardima.

Tabela 3. Matematičke formule za proračun potrebne debljine zida cilindričnog omotača

| Klasa/Kategorija posude | SRPS M.E2.253 | SRPS EN 13445-3 |
|---|---|---|
| Potrebna debljina zida cilindričnog omotača | $s = \frac{pD_s}{20\frac{K}{S}v + p} + c_1 + c_2$ | $e = \frac{PD_e}{2fz + P} + \delta_e + c$ |

Prema SRPS M.E2.253 standardu za izračunavanje debljine zida cilindričnog omotača posude potrebne su vrednosti proračunske čvrstoće za Č1208 na radnoj temperaturi od 20°C ($K = 210$ MPa) i stepena sigurnosti ($S = 1,5$), dok se prema SRPS EN 13445 standardu, maksimalni dozvoljeni proračunski napon (f) za čelik Č1208 određuje prema formuli:

$$f = \min\left(\frac{R_{p0,2/t}}{1,5}; \frac{R_{m/20}}{2,4}\right)$$

Za proračun cilindričnog omotača posude pod pritiskom se prema oba standarda koriste matematičke formule zasno-

vane na teoriji ljuski. Razlika u formulama prema SRPS M.E2.253 i SRPS EN 13445 je zapravo u prikazivanju i označavanju maksimalne dozvoljene vrednosti proračunskog napona. Osim toga postoji i razlika u načinu određivanja koeficijenta valjanosti zavarenog spoja¹, /13/.

PRORAČUN TORISFERIČNOG DANCA POSUDE

U radu je urađen uporedni proračun debljine zida plitkog torisferičnog danca prema SRPS M.E2.252 i SRPS EN 13445-3.

SRPS M.E2.252 je standard za proračun čvrstoće danaca kao delova posuda pod pritiskom, /14/. U tab. 4, dat je uporedni prikaz matematičkih formula koje se koriste za izračunavanje potrebne debljine zida danca prema navedenim standardima.

Prema standardu SRPS M.E2.252 izračunava se debljina zida cilindričnog, torusnog i sfernog dela danca, dok se prema SRPS EN 13445-3 izračunava debljina torusnog dela danca prema otpornosti na pojavu plastičnih deformacija i pojavu ulubljenja, kao i debljina zida sfernog (središnjeg) dela danca. Slično standardu SRPS EN 13445, u SRPS M.E2.252 postoji provera danca na elastična ulubljenja pod unutrašnjim pritiskom (pojava nabora na prelazu), prema kojoj je danca dovoljno dimenzionisano u odnosu na elastična ulubljenja kada je pritisak ulubljenja p_b veći ili jednak $1,5p$, gde je p – najveći radni pritisak. Konačna debljina je maksimalno dobijena vrednost debljine zida danca prema oba standarda.

PRORAČUN PRIKLJUČKA DN400 NA DANCU

Na prednjem plitkom torisferičnom dancu posude, centralno u odnosu na osu danca, nalazi se cevni priključak DN400, čiji spoljašnji prečnik (d) i debljina zida (s) iznose 406,4 mm i 10 mm, respektivno.

SRPS M.E2.256 je standard kojim se utvrđuju uslovi i način proračuna čvrstoće izreza (otvora) u cilindričnim, konusnim i kuglastim omotačima posuda pod pritiskom, /15/. Prema ovom standardu, maksimalni prečnik otvora koji može da se nađe na dancu bez potrebe za ojačanjem (d_{imax}) se određuje preko koeficijenta oslabljenja izrezom (v_A). Proračun pokazuje da je vrednost ($d_{imax} = 463$ mm) veća od prečnika otvora za priključak DN400 ($d_u = 420,8$ mm), na osnovu čega se zaključuje da je cevni priključak dovoljno ojačanje otvora. Međutim, u uslovima eksploatacije, priključak DN400 je ojačan prstenastom pločom debljine 10 mm koja je zavarena za danca. Ojačanje je dovoljno ako je ispunjen uslov čvrstoće:

$$\left(\frac{K}{S} - \frac{p}{20}\right)A_{\sigma_0} + \left(\frac{K_1}{S} - \frac{p}{20}\right)A_{\sigma_1} + \left(\frac{K_2}{S} - \frac{p}{20}\right)A_{\sigma_2} \geq \frac{p}{10}A_p$$

Standard SRPS EN 13445, usled postojanja cevnog priključka na dancu, nalaže kao potrebno da odnos unutrašnjeg prečnika priključka (386,4 mm) i spoljašnjeg prečnika posude (1500 mm) bude manji od 0,6. Kada je uslov ispunjen (kao u ovom slučaju), primenjuje se opšta jednačina za ojačanje:

¹ Prema SRPS EN 13445 naziv ovog koeficijenta je koeficijent zavarenog spoja

Potrebna debljina zida danca posude je 7,94 mm prema standardu SRPS M.E2.252 i 7,71 mm prema standardu SRPS EN 13445-3. Obe proračunom dobijene vrednosti debljine zida danca, su manje od izmerene vrednosti, koja iznosi 10,3 mm. Treba primetiti da se prema SRPS EN 13445-3 u izrazu za izračunavanje debljine zida danca ne uzima u obzir dodatak za dozvoljeno odstupanje mera materijala (0,3 mm) i dodatak zbog smanjenja debljine lima korozijom (1,0 mm), kao što je slučaj kod SRPS M.E2.252. Prema tome, uzimajući u obzir navedene dodatke dobija se vrednost $9,01 \text{ mm} (e + \delta_e + c)$, koja je takođe manja od izmerene vrednosti.

Proračun priključka DN400 pokazuje da je ispunjen uslov čvrstoće prema nevažećem standardu, kao i opšta jednačina za ojačanje prema važećem standardu, na osnovu čega se zaključuje da je ploča debljine 10 mm dovoljno ojačanje.

ZAKLJUČAK

Kada se analizira proračun posude pod pritiskom prema nevažećoj seriji standarda SRPS M.E2. i važećem standardu SRPS EN 13445, može se primetiti da u oba standarda postoje slični uslovi koji moraju biti ispunjeni za njihovu primenu. Takođe, za proračun delova posude pod pritiskom koriste se matematičke formule zasnovane na teoriji ljuski.

U radu je urađen uporedni kontrolni proračun posude pod pritiskom (rezervoara za vodu) prema standardu SRPS EN 13445 i sada već nevažećoj seriji standarda SRPS M.E2., jer je posuda dimenzionisana prema seriji standarda SRPS M.E2., pa je bilo neophodno uraditi proračun prema standardu SRPS EN 13445. Proračunom je utvrđeno da su zadovoljeni svi uslovi postavljeni važećim standardom i da je posuda bezbedna za upotrebu.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je finansiran od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije u okviru projekta ON174004.

LITERATURA

1. Pravilnik o tehničkim zahtevima za projektovanje, izradu i ocenjivanje usaglašenosti opreme pod pritiskom, Službeni glasnik Republike Srbije, br. 87/2011.
2. Fernando, L., *Comparison between American and European Pressure Vessel Rules*, Convenor of WG' C'/CEN TC54 Sant' Ambrogio Servizi Industriali SRL – Milano (2007).
3. Uptis, E., Gold, M.P.E., *Comparison of ASME specifications and European Standards for mechanical testing of steels for pressure equipment*, ASME (2005)
4. Hasegawa, K., Isomura, T., Kajimura, Y., Asada Y., Karasawa, T., *Recent development of codes and standards of boiler and pressure vessel in Japan*, ASME, Ch50 (2009), pp.257-308.
5. Petrović, A., Banjac, M., Jović, N., *Tehnička regulativa u oblasti posuda pod pritiskom – paralela stanja u Srbiji – evropske norme*, Festival kvaliteta 2005, 32. Nacionalna konferencija o kvalitetu, Kragujevac (2005), str.125.
6. Blažić, Ž., Projekat "TENT-A"-R1, Grupa za procesnu tehniku, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet (1987).
7. SRPS M.E2.151:1982 – Posude pod pritiskom – određivanje klase posude
8. Putić, S., Milović, Lj., Rakin, M., Zrilić, M., *Elementi opreme u procesnoj industriji, priručnik za vežbe*, Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd (2005).
9. Pressure Equipment Directive PED 97/23/EC:1998
10. Bredan, A., Kurai, J., *Evropska direktiva za opremu pod pritiskom (PED) i integritet konstrukcija*, Integritet i vek konstrukcija (Structural Integrity and Life) Vol.3, No.1 (2003) pp.31-41.
11. SRPS M.E2.253:1991 – Posude pod pritiskom – Cilindrični i kuglasti omotači izloženi unutrašnjem pritisku – Proračun.
12. SRPS EN 13445-3:2010 – Posude pod pritiskom koje nisu izložene plamenu – Deo 3: Projektovanje.
13. Đerić, A., Nikolić, J., Mitrović, N., Balać, M., Petrović, A., *Uporedni prikaz proračuna i analiza rezultata za posude pod pritiskom prema srpskim i evropskim standardima – cilindrični omotači*, Integritet i vek konstrukcija (Structural Integrity and Life) Vol.12, No.3 (2012), str.197-200.
14. SRPS M.E2.252:1991 Posude pod pritiskom – Danca izložena unutrašnjem ili spoljašnjem pritisku – Proračun.
15. SRPS M.E2.256:1991 Posude pod pritiskom – Izrezi u cilindrima, konusima i kuglama izloženim unutrašnjem pritisku – Proračun.