

OCENA PREOSTALE ČVRSTOĆE ZAVARENOG SFERNOG REZERVOARA SA PRSLINOM

RESIDUAL STRENGTH ASSESSMENT OF CRACKED WELDED SPHERICAL STORAGE TANK

Originalni naučni rad / Original scientific paper

UDK /UDC: 620.178.7:669.14

Rad primljen / Paper received: 1.12.2001.

Adresa autora / Author's address:

⁽¹⁾ Mašinski fakultet Univerziteta u Skoju, Makedonija

⁽²⁾ Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Jugoslavija

⁽³⁾ GOŠA Institut. Beograd, Jugoslavija

Ključne reči

- instrumentirano Šarpi ispitivanje
- sferni rezervoar
- preostala čvrstoća

Keywords

- instrumented Charpy testing
- spherical storage tank
- residual strength

IZVOD

Dva sferna rezervoara za amonijak (zapremine 1000 m³) su ispitana 1998. i 1999. tehnikama bez razaranja (NDT) u skladu sa Propisima za periodičnu kontrolu. Ovi rezervoari su izrađeni 1979. od čelika StE 460 prema DIN, mikrolegiranog Cr-Ni-Ti, debljine 30 mm. Uočen je veliki broj poprečnih prslina u metalu šava i uzdužnih prslina u zoni uticaja-toplote (ZUT) i po liniji stapanja unutrašnjih zavarenih spojeva. Da bi se procenila zaostala čvrstoća oba rezervoara, ploče 500 x 500 mm, su isečene radi hemijskog, metalurškog i mehaničkog ispitivanja. Ova ispitivanja su obuhvatala detaljno određivanje žilavosti standardnih Šarpi epruveta na instrumentiranom klatnu i ispitivanja mehanike loma na standardnim SEN(B) epruvetama za ocenu žilavosti loma. Na osnovu rezultata Šarpi ispitivanja i ispitivanja mehanike loma ocenjena je preostala čvrstoća sfernih rezervoara sa prslinama.

ABSTRACT

Two spherical storage tanks for ammonia (volume 1000 m³) have been tested in 1998 and 1999 by Non-Destructive Techniques (NDT) in accordance with the Periodic Inspection Regulations. These storage tanks have been constructed in 1979 of St.E460 steel according to DIN, Cr-Ni-Ti microalloyed, 30 mm thick. The large number of transverse cracks in weld metal and longitudinal cracks in heat-affected-zone (HAZ) and along fusion line of inner welded joints have been detected. In order to assess the residual strength, of both storage tanks, plates 500 x 500 mm were cut for chemical, metallurgical and mechanical testing. These testing included detailed toughness testing of standard Charpy specimens on instrumented pendulum, and fracture mechanics testing on standard SEN(B) specimens for fracture toughness evaluation. Based on results of Charpy and fracture mechanics testing residual strength of cracked storage tanks has been assessed.

UVOD

Dva sferna rezervoara za skladištenje amonijaka (zapremina 1000 m³) su ispatana 1998. i 1999. tehnikama bez razaranja (IBR) u skladu sa Propisima za periodičnu kontrolu. Ovi rezervoari su projektovani i izrađeni 1979. od mikrolegiranog čelika (StE 460 prema DIN), nazivnih mehaničkih osobinama: zatezna čvrstoća $R_m = 600$ MPa, napon tečenja popuštanja $R_{p0.2} = 460$ MPa, izduženje pri lomu $A_5 = 28\%$. Hemijska analiza i izmerene zatezne osobine su date u tab. 1. i 2, respektivno, kao prosečna vrednost više ispitivanja.

Tabela 1. Hemijska analiza

C	S	P	Mn	Si	Cr	Ni	Ti
0.18	0.013	0.017	1.35	0.46	0.11	0.10	0.13

Tabela 2. Zatezne osobine

Napon tečenja, $R_{p0.2}$ (MPa)	Zatezna čvrstoća, R_m (MPa)	Izduženje pri lomu, A_5 (%)	Žilavost loma, J_{IC} (kJ/m)
458	602	28	205

Zavarivanje je izvedeno elektrolučnim postupcima, sa bazičnom elektrodom. Prečnik sfere je $D=12\ 400$ mm, a debljina ploča $t = 30$ mm. Za maksimalni radni pritisak, koji iznosi $p = 16,5$ bar predviđen je probni pritisak za

periodična ispitivanja $p = 25$ bar. Za IBR korišćene su tehnika ultrazvuka, penetranta i magnetnih čestica. Poslednja, u kombinaciji sa fluorescentnim svetlom, se pokazala kao najefikasnija za otkrivanje malih potpovršinskih prslina. Otkriven je veliki broj poprečnih prslina u metalu šava i uzdužnih prslina u unutrašnjim zavarenim spojevima. Uzdužne prslina su ocenjene kao opasnije zbog svoje veličine (dužine do 500 mm, dubine do 10 mm). Ispitivanja su pokazala da postoji više faktora koji prouzrokuju stvaranje otkrivenih prslina, čime je potvrđeno i opšte iskustvo. Faktori su osnovni metal, proces zavarivanja, zaostali naponi i naponska korozija u agresivnoj sredini.

Da bi se procenila preostala čvrstoća isečene su ploče (500 x 500 mm) iz oba rezervoara radi hemijskog, metalurškog i mehaničkog ispitivanja. Ova ispitivanja su obuhvatala detaljno ispitivanje žilavosti, uključujući standardne Šarpi epruvete sa V-zarezom, ispitane na instrumentiranom Šarpi klatnu, i ispitivanja mehanike loma na standardnim SEN(B) epruvetama radi ocene žilavosti loma. Instrumentirano Šarpi ispitivanje omogućilo je razdvajanje energije loma na energiju nastanka prslina i energiju širenja prslina, dok su ispitivanja mehanike loma obezbedila dalji uvid u otpornost materijala prema prslinama preko dobijene J-R krive. Ova ispitivanja su izvedena na sobnoj temperaturi, i na 0°C, -20°C, -40°C i -60°C, da bi se simulirali radni uslo-

vi i ocenila prelazna temperatura nulte plastičnosti (NDTT). Korišćenjem rezultata Šarpi ispitivanja i ispitivanja mehanike loma, može da se proceni preostala čvrstoća rezervoara sa prslinama.

ISPITIVANJE BEZ RAZARANJA SFERNIH REZERVOARA

Ispitivanja bez razaranja su izvedena na sfernim rezervoarima za skladištenje tečnog amonijaka (sl. 1), zapremine $V=1000\text{ m}^3$.

Tokom primarnog ispitivanja spolja korišćenjem ultrazvučne metode otkrivene su prsline sa unutrašnje strane zavarenog spoja, posle čega je rezervoar ispražnjen i detaljno ispitan iznutra. Najbolje rezultate u otkrivanju površinskih prsline dala je metoda magnetnog fluksa, ali ultrazvučna metoda je i dalje bila najbolja za tačno određivanje dubine prsline.

Unutar površine sfernih rezervoara, u zoni šava, otkriven je veliki broj površinskih prsline, dugih od nekoliko milimetara do nekoliko stotina milimetara i najveće dubine 11 mm. Ove prsline su se pojavile usled naponske korozije izazvane tečnim amonijakom [1]. Prsline su bile uzdužne (sl. 2), nalazile se u zoni uticaja toplote (ZUT), tj. po liniji stapanja. Takođe je otkriven veliki broj prsline razvijenih poprečno na metal šava (u obliku eksera), dužine 10 mm i male dubine od oko 1 - 2 mm. Sferni rezervoari su popravljani i sada su u normalnoj eksploataciji.



Slika 1. Sferni rezervoar za tečni amonijak



Slika 2. Prsline na liniji stapanja

REZULTATI ISPITIVANJA MEHANIKE LOMA

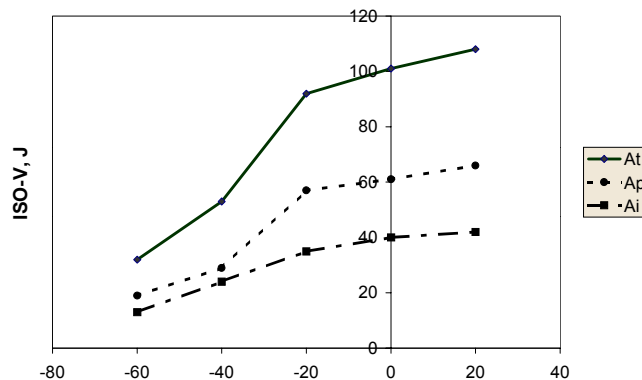
Ispitivanja žilavosti su izvedena na standardnim Šarpi epruvetama sa V-zarezom (ISO-V) na temperaturama od $+20^{\circ}\text{C}$, 0°C , -20°C , -40°C i -60°C . Uzorci iz zavarenih spojeva su isečeni poprečno na pravac šava. Vrh V zareza je postavljen u ZUT i po liniji stapanja zavarenih spojeva sa unutrašnje strane rezervoara. Ispitivanja su izvedena na instrumentiranom Šarpi klatnu, što omogućava razdvajanje ukupne energije na energiju nastanka i energiju širenja prsline. Rezultati ovih ispitivanja kao proseki ispitivanja tri epruvete su dati u tab.3 i na sl. 3.

Tabela 3. Rezultati ispitivanja udarne žilavosti

Udarne žilavost ISO-V (J)														
$+20^{\circ}\text{C}$			0°C			-20°C			-40°C			-60°C		
A_t	A_i	A_p	A_t	A_i	A_p	A_t	A_i	A_p	A_t	A_i	A_p	A_t	A_i	A_p
108	42	66	101	40	61	92	35	57	53	24	29	32	13	19

A_t – ukupna energija; A_i – energija nastanka prsline; A_p – energija širenja prsline

Kao što se vidi iz dobijenih rezultata, u svim slučajevima je energija širenja prsline veća od enerije nastanka prsline. Takođe se može zaključiti da kritično područje ZUT ima dovoljno visoku žilavost, ne samo na radnim temperaturama (od -20°C do $+20^{\circ}\text{C}$), nego i na nižim temperaturama (-40°C i -60°C). Stoga je očigledno sa zavareni spojevi poseduju zadovoljavajuću otpornost prema prslinama.



Slika 3. Žilavost u zavisnosti od temeprature (A_t – ukupna energija; A_i – energija nastanka prsline; A_p – energija širenja prsline)

Ispitivanje mehanike loma za utvrđivanje J_R krive i mere žilavosti loma, J_{IC} , je izvedeno na standardnim SEN(B) epruvetama [2,3]. Eksperimentalno ispitivanje za određivanje J_R krive, potrebne za ocenu preostale čvrstoće, je izvršeno na tri epruvete, prema standardu ASTM E 813. Prsline je razvijena u ZUT, i prolazila je blizu linije stapanja. Prosečna vrednost J_{IC} za tri epruvete je 221 kN/m. U ovom ispitivanju dobijena J_R kriva ove tri epruvete je korišćena radi utvrđivanja tačke nestabilnosti u dijagramu sile razvoja prsline (CDF), a u zavisnsoti od dužine prsline .

PROCENA PREOSTALE ČVRSTOĆE SFERNOG REZERVOARA

Za određivanje preostale čvrstoće konstrukcije sa prslinom potrebno je uporediti CDF krivu sa krivom otpornosti

materijala prema rastu prsline (J - Δa krive). Tangenta ove dve krive daje kritičnu vrednost sile razvoja prsline, koja rezultira iz kriterijuma za stabilni rast prsline:

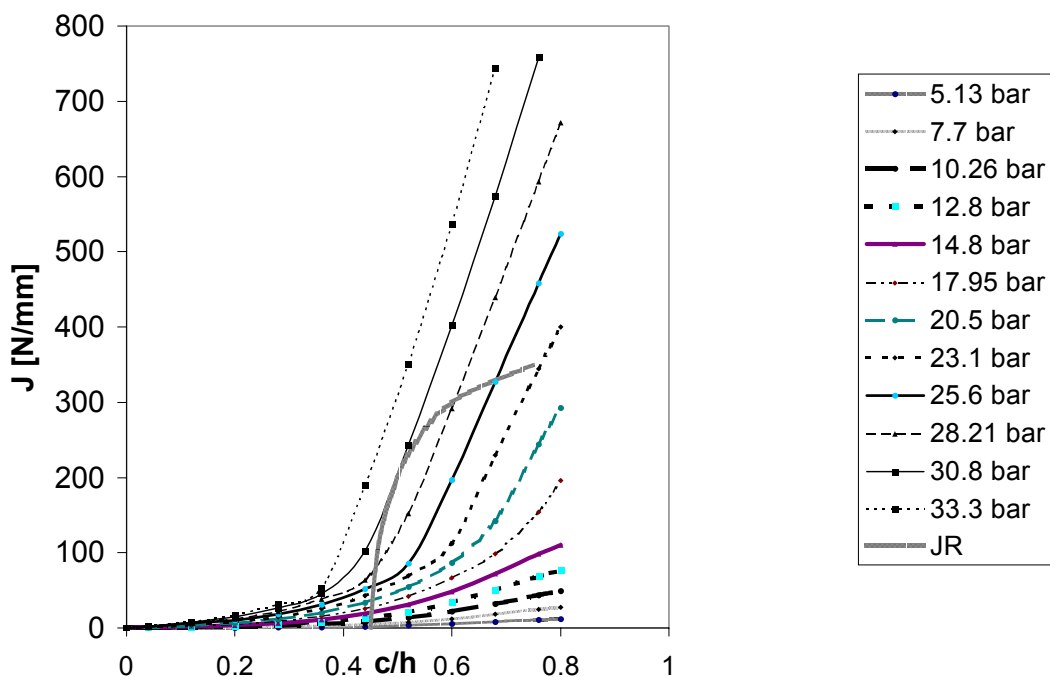
$$J_{appl}(\sigma, a) = J_c$$

gde J_{appl} predstavlja CDF, a J_c je kritična vrednost za koju nastaje lom u datim uslovima.

Ovde je primenjen Kingov model [4] za procenu preostale čvrstoće, u kome se površinska prsline zamenjuje prolaznom prsline, a ligament se zamenjuje nizom opruga koje zatvaraju prsline. Preciznije, trodimenzionalni problem je apro-

ksimiran u kombinaciju dvodimenzionalnih problema: u slučaju kada je prolazna prsline u ploči u uslovima ravnog stanja napona, i u slučaju kada je površinska prsline duž cele širine ploče u uslovima ravno stanje deformacije.

Za analizu je usvojena najveća prsline, dužine 300 mm i dubine 13,5 mm. Za određivanje kritičnog pritiska korišćena je J_R kriva otpornosti, određena uz pomoć tri SENB ($c/h = 0,45$ gde je c - dubina, h - debljina) epruvete sa uzdužnom prsline po liniji stapanja. Dijagrami CDF, dobijen Kingovim modelom, i J_R kriva, su prikazani na sl. 4.



Slika 4. Dijagrami sile razvoja prsline upoređeni sa J_R krivom

Kao što se vidi sa sl. 4, kritični pritisak, p_{cr} , pri kojem će se javiti nestabilno širenje prsline, iznosi 30,8 bar, što je osetno veće od propisanog probnog pritiska.

ZAKLJUČAK

Vrednost kritičnog pritiska, dobijena iz ispitivanja mehanike loma, koja prouzrokuje nestabilnost u slučaju prsline dugačke 300 mm i duboke 13,5 mm, je $p_{cr} = 30,8$ bar. Ova vrednost je znatno veća od radnog pritiska, $p = 16,5$ bar, kao i od probnog pritiska, $p = 25$ bar.

Ispitivanje udarne žilavosti Šarpi epruvete sa V zarezom na instrumentiranom klatnu potvrdilo je ispitivanja mehanike loma. Ovaj zaključak proizilazi iz činjenice da prsline, nastala kao posledica naponske korozije u tečnoj amonijaknoj sredini, nije prešla kritičnu veličinu, zbog visoke žilavosti i otpornosti prema rastu prsline mikrolegiranog čelika.

LITERATURA

1. Gnriss G., Hrivnjak I., Lukačević Z. (1993), Recommendations for reliable operation of pressure vessels exposed to aggressive media like ammonia and sour gas, IIS/IIW-doc. IX-1711-93/XI-609-93.
2. Sedmak S., Adžiev T., Sedmak S. (1996) Experimental and numerical analysis of cracked welded joints, 11. European Conference on Fracture, ENSMA, pp. 1-2.
3. Adžiev T. (1994), Zaostali naponi od zavarivanja – uticaja naponasanje posuda pod pritiskom sa prsline, Monografija Eksploatacijske prsline u posudama pod pritiskom i rezeervoarima, TMF- GOŠA, Beograd
4. King, R. B., (1983), Elastic-plastic analysis of surface flaws using simplified line-spring model, Engineering Fracture Mechanics, 18, No. 1, 217-231.