

**ISPITIVANJE PRITISKOM KAO UZROČNIK POJAVE PRSLINA
KOD OPREME POD PRITISKOM U EKSPLOATACIJI**
**PROOF PRESSURE TEST AS A CAUSE OF CRACK OCCURRENCE
IN PRESSURIZED EQUIPMENT IN SERVICE**

Originalni naučni rad / Original scientific paper

UDK /UDC: 620.169.1:669.15-194.2

Rad primljen / Paper received: 27.10.2003.

Adresa autora / Author's address:

(1) CertLab.Co, Pančevo, Srbija i Crna Gora

(2) HIP Azotara KKOM, Pančevo, Srbija i Crna Gora

Ključne reči

- Oprema pod pritiskom
- Evropska direktiva
- Probno ispitivanje pritiskom
- Integritet konstrukcije

IZVOD

U radu su analizirani rezultati višegodišnjih ispitivanja posuda pod pritiskom, a naročito sfernih rezervoara izrađenih od sitnozrnih - mikrolegiranih čelika. Posebna pažnja je posvećena nalazima koji potvrđuju da višekratno ispitivanje hladnim vodenim pritiskom opreme u eksploataciji može biti uzročnik pojave prslina, a naročito ako je ispitni pritisak jednak onom koji je propisan za novu opremu.

Posebni zaključci nisu izvedeni, jer je namena rada da Komisiji DIVK za ispitivanje probnim pritiskom pruži podatke, koji će omogućiti izradu preporuka za kontrolu i prijem opreme u toku eksploatacije i posle popravke.

UVOD

Sferni rezervoari su namenjeni za skladištenje tečnog naftnog gasa (TNG), vinilhloridmonomera (VCM), etilena, amonijaka, C₄-frakcije i drugih materija. Po pravilu, sferni rezervoari su izrađeni od plašta, segmenata i dva danca (na dnu i vrhu), koji su spojeni zavarivanjem, a oslonjeni su na određeni broj metalnih stubova, za sferu zavarenih direktno ili preko odgovarajućih ploča (sl. 1). Sa spoljne strane zaštićeni su antikorozijskim premazima, a za skladištenje amonijaka se dodatno postavlja izolacija. Zapremine rezervoara su različite, najčešće između 150 i 5000 m³.

U periodu od 1970. do 1987. godine većina sfernih rezervoara je izrađivana od fino-zrnih mikrolegiranih čelika.

Radi ilustracije u ovom radu su dati osnovni podaci za neke sferne rezervoare, koje je ispitivao Sektor KKOM "HIP-AZOTARA", Pančevo, do 1993. godine /1/.

ANALIZA IZVRŠENIH ISPITIVANJA

Analiza ispitivanja posuda pod pritiskom za utečnjene gasove je pokazala sledeće:

- Ispitivanjem u toku eksploatacije kod ovih posuda otkrivene su prsline u zavarenim spojevima, različitog usmerenja, dužine i dubine (sl. 2). Pojava prslina je naročito izražena kod sitnozrnih mikrolegiranih čelika povišene čvrstoće, ali je uočena i kod rezervoara od ugljeničnog čelika nakon dugotrajne eksploatacije, kao i kod sitnozrnih konstrukcijskih čelika (za amonijak).

Keywords

- Pressurized equipment
- European Directives
- Pressure proof test
- Structural integrity

ABSTRACT

In this paper, the results of long-range testing of pressure vessels, and especially the spherical storage tanks made of fine-grain micro-alloyed steels have been analysed. Special attention has been paid to the results confirming that multiple cold-water pressure testing of the equipment in service can be a cause of crack occurrence, especially so if the proof pressure equals to that prescribed for new equipment.

Final conclusions are not derived, since the aim of the paper is to give data to DIVK Commission for proof pressure test, which can enable to elaborate the recommendations for equipment inspection and acceptance in service and after repair.

INTRODUCTION

Spherical storage tanks are intended for storage of liquefied petrol gas (LPG), vinilchloridmonomer (VCM), ethylen, ammonia, C₄-fractions and other substances. Generally, they consist of the mantle, segments and two lids (upper and lower), which are joined by welding, and supported by several metallic columns, welded to the sphere directly or through corresponding plates (Fig. 1). The outer side is protected by anticorrosive layers, and for the storage of ammonia additional insulation is applied. The capacity of tanks is different, typically between 150 and 5000 m³.

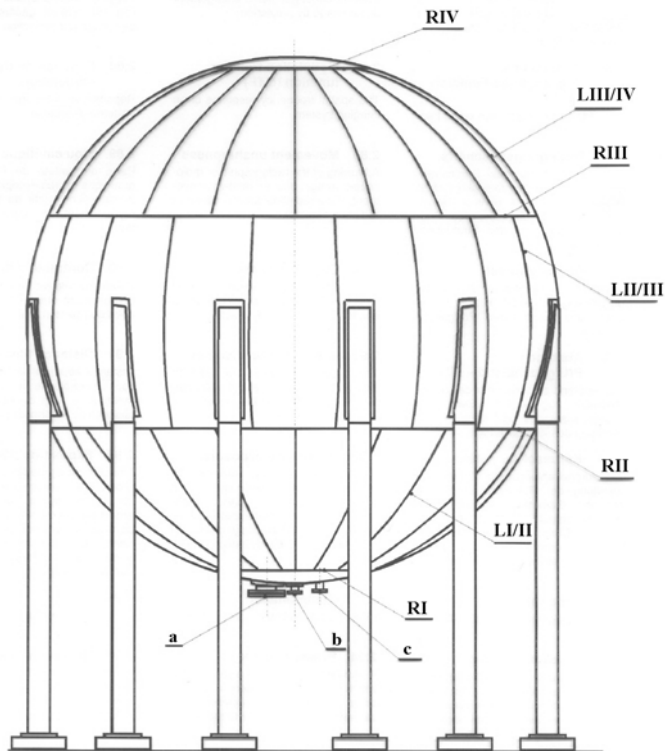
Between 1970 and 1987 years, most spherical storage tanks had been produced of microalloyed steels.

In this paper the basic data for some spherical storage tanks, tested up to 1993 by the Sector KKOM "HIP-AZOTARA", Pančevo, are presented as an illustration /1/.

THE ANALYSIS OF PERFORMED TESTS

The analysis of performed tests of pressure vessels for liquefied gases revealed the following:

- By in-service testing of these vessels the cracks in welded joints have been detected, of different direction, length and depth (Fig. 2). The occurrence of cracks is particularly expressed in fine-grain microalloyed high strength steels, but the cracks were also detected in tanks of carbon steels after long-term service, as well as in fine-grain structural steels (for ammonia).

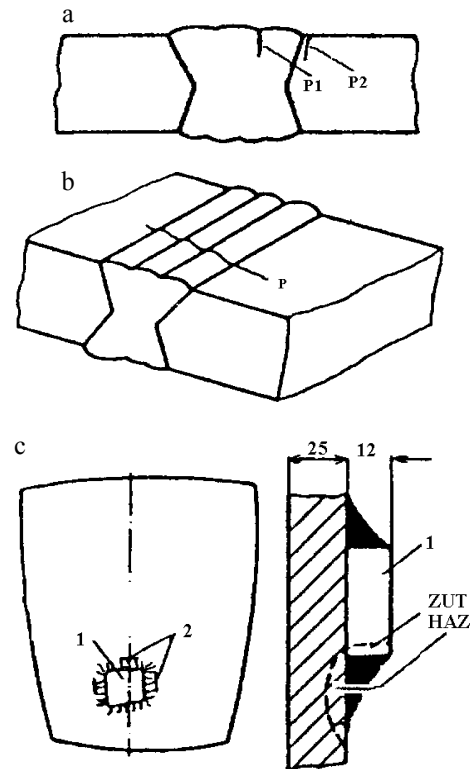


Slika 1. Sferni rezervoar

Figure 1. Spherical storage tank

Poznati su mogući uzročnici pojave prslina:

- Hladne prsline nastale prilikom zavarivanja, zbog povišenog sadržaja vodonika u dodatnom materijalu.
- Odstupanje od propisane tehnologije zavarivanja ili neadekvatna tehnologija zavarivanja.
- Naponska korozija i oštećenja tokom eksploatacije.
- Štetan uticaj ponavljanja hidro-testa (probe hladnim vodenim pritiskom) tokom eksploatacije.
- Na primerima jednog sfernog rezervoara i jedne autocisterne sa sigurnošću je potvrđeno da su prsline nastale u toku eksploatacije posuda, s obzirom da prethodnim periodičnim ispitivanjima nisu konstatovani nedozvoljeni defekti. Ovi podaci su potvrdili literaturne navode o postojanju inkubacionog perioda pri pojavi naponskih prslina usled korozije.
- Prsline su po pravilu locirane sa unutrašnje strane posude (sl. 2), kao uzdužne prsline (a) u metalu šava ili zoni uticaja toplote (ZUT), i kao prsline popreko na šav (b). Od svih ispitanih posuda samo na jednoj su nađene prsline na vezi plašta i danca sa spoljnje strane, i na jednoj sferi prsline na vezi ojačanja stubova sa plaštom. Samo na jednoj sferi otkrivene su greške u izradi stubova. Na tri sfere su nađene prsline na osnovnom materijalu (sl. 2c), a njihovo poreklo je verovatno od privarivanja privremenih nosača tokom izrade sfere. Kod nekoliko sfera prilikom izbrušivanja prslina utvrđeno je da se prslina završava na pori ili uključku nastalim u vreme proizvodnje. Najveća učestalost prslina je na radijalnim zavarenim spojevima (R, sl. 1) kod svih ispitanih



Slika 2. Karakteristične prsline u sfernom rezervoaru

Figure 2. Typical cracks in spherical storage tank

Possible causes of crack initiation are known:

- Cold cracks induced by welding, due to high hydrogen content in consumables.
- Deviation from prescribed welding technology, or inadequate welding technology.
- Stress corrosion and damages in exploitation.
- Detrimental effect of hydro test (cold-water pressure test) in exploitation.
- In the case of one spherical storage tanks and of one road trailer tank it is definitely confirmed that the cracks initiated during exploitation of the vessel, since in the previous periodic inspections non-allowable defects had not been detected. These data confirm the reference data on the existence of incubation period for stress corrosion cracks nucleation.
- The cracks are typically located on the inner vessel side (Fig. 2), as longitudinal cracks (a) in weld metal or in heat-affected zone (HAZ), Of all tested vessels, only on one vessel the cracks were detected in the joint between the mantle and lid on the outer side, and on one vessel in the joint between support reinforcement and mantle. Only on one sphere the defects in columns are detected. In three cases the cracks were detected in parent metal (Fig. 2c), and their origin is probably the tack welding of temporary holders during sphere manufacturing. In some cases during grinding operation it had been confirmed that the crack ends in the pore or inclusion, involved during manufacturing. In all tested spheres cracks most frequently occurred in radial welded joints (R, Fig. 1), in

sfernih rezervoara i to obično u središnjem (gornjem) delu rezervoara, na granici tečne i gasne faze.

- Ispitivanja rezervoara pre i posle hidro-testa su jasno pokazala da hidro-test u eksploataciji može izazvati nove prslina i to na mestima "starih" (a nesaniranih) zavarenih spojeva. Zbog toga je u više navrata dat predlog nadležnoj Inspekciji parnih kotlova /2/, /3/ za smanjenje ispitnog pritiska, naročito za ispitivanja u eksploataciji.
- Iskustvo je pokazalo da nakon sanacije zavarivanjem posuda pod pritiskom nije savetno izvesti hidro-test, već samo periodično ispitivati ultrazvukom tipična sanirana mesta sa spoljne strane, i to:
- Odmah nakon sanacije (tzv. "nulto" stanje).
- Nakon postizanja radnih parametara. Ukoliko se ovim ispitivanjima ne otkriju nove prslina, ispitivanje treba ponoviti svakih 6 do 12 meseci, do redovnog hidro-testa.
- Na osnovu ispitivanja nekoliko cilindričnih rezervoara i vagon cisterni za TNG, koje su nakon izrade otpuštene od zaostalih napona, konstatovano je da hidrottest nije izazvao pojavu novih prslina.

Zbog znatnih finansijskih izdataka nametnutih vlasnicima rezervoara (ponavljanje ciklusa: ispitivanje- sanacija sa ispitivanjem- ispitivanje posle sanacije- hidro test- ispitivanje posle hidrottesta- periodična kontrola), prevladao je selektivni pristup ispitivanju i sanaciji posuda /4/ tako da se samo nadvišenja na kritičnim mestima (radijalni zavareni spojevi i ukrasna mesta) prebruse i ispitaju ultrazvukom. Ako se na ovim mestima otkriju greške, brušenje nadvišenja i ultrazvučna kontrola se povećavaju i do 100%.

Ovim prilazom nije smanjena pouzdanost ispitivanja. Takođe treba napomenuti da ultrazvučnu kontrolu nema smisla izvesti ukoliko je magnetnim česticama otkriven veliki broj plitkih prslina, što je čest slučaj. U ovim slučajevima je celishodnije izvršiti prvo izbrušavanje prslina, a zatim ultrazvučno ispitivanje.

Osam godina nakon donošenja "Uputstva za vanredni pregled posuda pod pritiskom izrađenih od mikrolegiranih čelika", predložena je, radi jedinstvenog pristupa izmena postojećeg ili donošenje novog Uputstva, što nije naišlo na odgovarajući odziv do današnjih dana.

SPHERNI REZERVOARI ZA VCM

Tokom redovnog pregleda 1991. i 1996. godine ispitivanjima bez razaranja sfernih rezervoara za vinilhlid monomer (VCM), zapremine 2000 m³, sa unutrašnje strane, u zoni zavarenih spojeva, otkriven je veliki broj prslina različitog usmerenja i dubine.

Osnovni tehnički podaci: Sfere nisu izolovane, pritisak u sferi zavisi od temperature okoline (npr. pri +10°C pritisak je 1,51 bar, a pri +35°C on je 4,23 bara).

Sferni rezervoari (sl. 1) su sastavljeni od 24 segmenta i dva danca (na dnu i vrhu), debljine zida 20 mm. Oni su zavareni podužnim spojevima (ukupno 483 m), 50% izvedenim zavarivanjem pod praškom (EPP) i 50% ručno elektroručno (REL), i radijalnim spojevima (ukupno 120 m) izvedenim REL postupkom. Sfere su oslonjene na 12 oslonaca.

Sferni rezervoari su izvedeni od čelika NIOVAL 47. Hemijski sastav je:

all tested spheres, typically in its middle (upper) part, at the border between liquid and gaseous phase.

- The testing of the tanks before and after the proof test has clearly shown that proof test in service can cause new cracks in the positions of "old" (but not repaired) welded joints. For that reason the authorised Boiler Inspection Office has been advise several times /2/,/3/ to reduce test pressure, especially for tests in service.
- The experience has shown that the pressure vessel repaired by welding should not be subjected to pressure testing, but only to test periodically by ultrasonic the typical repaired positions from the outer side, e.g.:
- Immediately after repair (so-called "initial" state).
- After operating parameters are reached. If in these tests no crack has been detected, the tests should be repeated every 6 to 12 months, until the term of regular proof test.
- Based on testing of several car cylindrical tanks and tank wagons for LOG, with residual stress relieved after manufacturing, it has been found that proof test has not caused the occurrence of new cracks.

Due to significant financial expenses imposed to the tank owners (repeated cycles: testing- repair with testing- testing after the repair-proof test- testing after proof test- periodical inspection), selective approach to testing and repair of vessels prevailed /4/ so that only the overfills on critical locations (radial welded joints and crossings) should be ground and subjected to ultrasonic testing. If defects are detected in this locations, overfills grinding and ultrasonic testing should be increased up to 100%.

By this approach the reliability of testing is not reduced. It should be mentioned that there is no reason to perform ultrasonic test when a significant number of shallow cracks has been detected by magnetic particle testing, which is a frequent case. In this situation it is better to grind cracks first, and then to perform ultrasonic test.

Eight years after introduction of "Directives for special inspection of pressure vessels, produced of microalloyed steels", in order to assure uniform approach, the innovation of existing or introduction of new Directives have been proposed, but without corresponding respond up to now.

SPHERICAL STORAGE TANKS FOR VCM

During regular inspection in the years 1991 and 1996, by non-destructive testing of spherical storage tanks for vinylchloride monomer (VCM), capacity 2000 m³, on the inner side, in welded joints region, a great number of cracks of different direction and depth has been detected.

Basic technical data: The spheres are not insulated, the inner pressure depends on ambient temperature (e.g. at +10°C pressure is 1,51 bar, at +35°C it is 4,23 bar).

Spherical storage tanks (Fig. 1) are composed of 24 segments and two lids (bottom and top), with wall thickness of 20 mm. They are welded by longitudinal joints (total 483 m), performed 50% by submerged arc welding (SAW) and 50% by metal manual arc welding (MMA), and radial joints (total 120 m), performed by MMA procedure. The spheres are supported by 12 legs.

Spherical storage tanks are produced of NIOVAL 47 steel. Chemical composition is:

0,18-0,19%C; 0,44-0,45% Si; 1,42-1,43% Mn; 0,08% V; 0,048-0,055% Nb; 0,012-0,015% P; 0,009-0,014% S.

Zatezna čvrstoća je $R_m=639-660$ MPa, napon tečenja $R_{p0,2}=470-506$ MPa, izduženje pri lomu $\delta_5=25-27\%$ i žilavost na 0°C je 120-166 J/cm².

Za zavarivanje su korišćene elektrode Željezarne Jesenice EVB-60 (AWS E8018=G).

Sferni rezervoari su u eksploataciji od 1977. godine.

Počev od montaže sfernog rezervoara zabeleženi su sledeći događaji:

- Novembar 1976 - I hidrottest (12 bar) - nema podataka.
- Septembar 1977- Sferni rezervoar pušten u eksploataciju.
- Septembar 1983 - II hidrottest –propuštanje nije uočeno.
- April 1987 - III hidrottest –propuštanje nije uočeno.

Nakon puštanja u eksploataciju sa spoljnje strane je izvršena ultrazvučna kontrola (kosim sondama) dva radialna spoja (RI i RII).

- Oktobar 1989 – IV hidrottest (vanredni pregled po nalogu nadležnog inspektora parnih kotlova) - nije uočeno curenje.

Po zahtevu inspektora, izvedeno je brušenje nadvišenja šava sa unutrašnje strane za ispitivanje bez razaranja. Veliki broj prslina u podužnim i poprečnim šavovima, različitih dužina i dubina je otkriven ispitivanjem magnetnim česticama i ultrazvukom. Nakon sanacije brušenjem i zavarivanjem, ispitivanjem magnetnim česticama i ultrazvukom nisu nađene indikacija prslina.

- Mart 1990 - V hidrottest (vanredni pregled) – nije uočeno curenje.

Veliki broj prslina različitih dužina i dubina otkriven je ispitivanjem magnetnim česticama i ultrazvukom u podužnim i poprečnim šavovima. Nakon sanacije brušenjem i zavarivanjem, ispitivanjem magnetnim česticama i ultrazvukom nisu nađene indikacija prslina.

- Kontrolom i ispitivanjem marta 1991. utvrđene su podužne i poprečne prslinae na zavarenim spojevima na 331 mestu, na unutrašnjoj strani sfernog rezervoara.

U tab. 1 su dati položaj, broj i pravac prslina uočenih pre i posle hidrottesta, koje su sanirane brušenjem žljebova dubine veće od 5 mm i zavarivanjem. U tab. 2 je dat broj prslina po postupku sanacije.

0,18-0,19%C; 0,44-0,45% Si; 1,42-1,43% Mn; 0,08% V; 0,048-0,055% Nb; 0,012-0,015% P; 0,009-0,014% S.

Ultimate tensile strength is $R_m=639-660$ MPa, yield stress $R_{p0,2}=470-506$ MPa, elongation at fracture $\delta_5=25-27\%$ and impact toughness at 0°C is 120-166 J/cm².

Electrodes EVB-60 (AWS E8018=G) of Steelworks Jesenice are used.

Spherical storage tanks have been in service since 1977.

Starting from the spherical storage tank assembling, following events have been recorded:

- November 1976 – I proof test (12 bar) - no data.
- September 1977 - Spherical storage tank put in service.
- September 1983 – II proof test – no leakage recorded.
- April 1987 – III proof test – no leakage recorded.

After putting in service ultrasonic test (with declined sensors) has been performed on the outer side of two radial welded joints (RI i RII).

- October 1989 – IV proof test (special inspection required by authorised officer of Boiler Inspection Office) - no leakage recorded.

Following officer's request, the overfill on the inner side was grinded for non-destructive inspection. A great number of cracks in the longitudinal and transversal welds of different length and depth were revealed by magnetic particles and ultrasonic testing. After the repair by grinding and welding, no crack indication was found by magnetic particles and ultrasonic testing.

- March 1990 - V proof test (special inspection) – no leakage recorded.

A great number of cracks of different lengths and depths in longitudinal and transversal welds was revealed by magnetic particles and ultrasonic testing. After the repair by grinding and welding, no crack indication was found by magnetic particles and ultrasonic testing.

- By inspection and testing in March 1991 longitudinal and transversal cracks in welded joints were found in 331 locations, on the inner spherical storage tank side.

In Table 1 are given the location, number and direction of cracks, found before and after proof test, repaired by grinding of notch deeper than 5 mm and welding. Number of cracks after the repair procedure is given in Table 2.

Tabela 1. Položaj, broj i pravac prslina uočenih pre i posle hidrottesta na sfernom rezervoaru

Table 1. Location, number and direction of cracks, found before and after proof test on the spherical storage tank

Oznaka šava Weld designation	Broj prslina pre (posle) hidro probe Number of cracks before (after) proof test			Dužina žleba za zavarivanje, m Notch length for welding, m
	Podužne Longitudinal	Poprečne Transversal	Ukupno Total	
RI	2 (3)	9 (2)	11 (5)	0,53 (0,50)
RII	36 (2)	85 (-)	121 (2)	12,89 (0,25)
RIII	109 (35)	- (12)	109 (47)	19,56 (0,16)
RIV	6 (10)	5 (-)	6 (10)	0,52 (0,08)
LI/II	33 (106)	17 (8)	38 (106)	2,36 (0,74)
LII/III	29 (2)	- (-)	46 (10)	- (-)
LIII/IV	- (-)	116 (22)	- (-)	- (-)
Ukupno - Total	215 (158)	116 (22)	331 (180)	36,84 (1,73)

Tabela 2. Broj prslina po načinu sanacije
Table 2. Number of cracks after the repair procedure

Oznaka šava Weld designation	Sanacija prslina pre (posle) hidro probe Repair of cracks before (after) proof test		
	Samo brušenjem Grinding only	Jednostranim zavarivanjem One side welding	Dvostranim zavarivanjem both side welding
RI	5 (3)	6 (-)	- (1)
RII	15 (2)	87 (2)	19 (-)
RIII	36 (45)	58 (2)	15 (-)
RIV	- (-)	5 (1)	1 (-)
LI/II	12 (101)	25 (5)	1 (-)
LII/III	34 (10)	12 (-)	- (-)
LIII/IV	- (-)	- (-2)	- (-)
Ukupno - Total	102 (165)	193 (14)	36 (14)

Jasno je da hidrottest u toku eksploatacije, kada se izvodi sa probnim pritiskom istim kao i pri prvoj probi, pre puštanja u rad, utiče na pojavu novih prslina na zavarenim spojevima koji su bili izloženi uslovima eksploatacije, dok kod novih zavarenih spojeva (izvedenih pri sanaciji) nema indikacija prslina.

U tab. 3 je dat uporedni pregled prslina, otkrivenih pri ispitivanju 1989/90. i sedam godina kasnije, 1996.

It is clear that in service proof test, when performed with test pressure equal to the first proof test, before putting in service, affects the nucleation of new cracks in welded joints exposed to service conditions, whereas in new welded joints (performed during repairing) there are no cracks indication.

Table 3 presents comparative list of cracks, detected during testings in 1989/90 and seven years later, in 1996.

Tabela 3. Uporedni pregled prslina, otkrivenih pri ispitivanju 1989/90. i 1996.
Table 3 - Comparative list of cracks, detected during testing in 1989/90 and in 1996

Oznaka zavarenog spoja Welded joint designation	Broj prslina 1989/1990. Number of cracks 1989/1990			Broj prslina 1996. Number of cracks 1996		
	Podužne Longitudinal	Poprečne Transversal	Ukupno Total	Podužne Longitudinal	Poprečne Transversal	Ukupno Total
Donje dance - Bottom lid	7	5	12	0	0	0
R-I	20	5	25	0	0	0
L I/II	32	18	50	1+(*)	(*)	2
R-II	173	10	183	4	1	5
L II/III	157	116	273	1	0	1
R-III	389	10	399	1	0	1
L III/IV	294	67	361	1	0	1
R-IV	45	6	51	0	0	0
			1354			10

(*) Jedna prslina je kosa u odnosu na zavareni spoj.

(*) One crack is inclined toward welding joint.

Poređenjem rezultata ispitivanja iz 1989/90. i 1996. godine, mogu se izvesti sledeći zaključci:

- Broj prslina otkrivenih 1996. je bitno manji u odnosu na 1989/90 (10 prslina u odnosu na 1354, tj. 0,7%).
- Karakteristika prslina otkrivenih 1996. godine je da su znatno manje dubine i dužine u odnosu na prosečne dimenzije prslina nađenih 1989/90 godine.
- Ispitivanjem 1996. godine potvrđeno je iskustvo ranijih ispitivanja u pogledu učestalosti pojave prslina (najviše ih je na radialnim zavarenim spojevima u središnjem delu rezervoara), orijentacije prslina (većinom su prsline podužne) i, kao najvažnije, činjenice da ispitivanje hladnim vodenim pritiskom (čak i sa smanjenim ispitnim pritiskom) dovodi do pojave novih prslina, ali na mestima gde nije izvedena sanacija zavarivanjem posle prethodnog ispitivanja.

The comparison of test results obtained in the years 1989/90 and 1996 enables to draw the following conclusions:

- The number of cracks detected in 1996 is substantially lower than in 1989/90 (10 cracks against 1354, e.g. 0,7%).
- Typical for cracks detected in the year 1996 is that they are of significantly smaller depth and length compared to the average crack dimensions found in 1989/90.
- The experience from previous testing is confirmed by testing in the year 1996 regarding the frequency of crack occurrence (mostly they are on radial welded joints in the middle storage tank part), cracks direction (dominantly longitudinal cracks) and, as most important, in fact that proof test by cold water pressure (even with reduced test pressure) induces the occurrence of new cracks, but on the location where repair by welding was not performed after previous inspection.

Ovo je potvrđeno ispitivanjem magnetnim česticama pre i posle ispitivanja hladnim vodenim pritiskom na spojevima R-I i R-III i okolnim vertikalnim spojevima, gde su nađene nove prslinae na starim delovima spoja, tj. delovima zavarenog spoja koji nisu bili sanirani zavarivanjem. Tako su otkrivene prslinae na uzdužnom spoju L-17 blizu R-III spoja, unutar žljeba nastalog sanacijom prslina brušenjem 1991. godine, kao i prslinae u ZUT na spoju L-12 blizu R-I, koje nisu postojale pre ispitivanja pritiskom. Na 6 od otkrivenih 10 lokacija sa prslinom, prslina se nalazi unutar žljeba nastalog sanacijom 1991. godine.

Međutim, sanacija brušenjem ipak nije direktan uzrok pojave prslina, iz sledećih razloga:

- Prslinae nisu pronađene na oko 80 drugih žljebova nastalih sanacijom brušenjem 1991. godine.
- Sanacija 1991. je izvedena korektnim zaobljavanjem.
- Prslinae unutar žljebova na R-I i R-III nisu pronađene pre ispitivanja pritiskom.
- Na mestima sanacije izvedene brušenjem 1996. godine nakon ispitivanja pritiskom nisu otkrivene indikacije za greške tipa prslina.

Sve u svemu, može se tvrditi da je uzrok pojave prslina lokalno prekoračenje napona izazvano dejstvom ispitnog pritiska. Zbog toga dopunjena tehnologija sanacije za ovaj rezervoar obuhvata i čekićanje zavarenih spojeva u cilju smanjenja zaostalih napona.

Kontrole i sanacije su osetno smanjene zbog smanjenog broja prslina (10 prslina 1996, 1354 prslina 1989/90).

ISPITIVANJE HLADNIM VODENIM PRITISKOM

Pravilnik o tehničkim normativima za stabilne posude pod pritiskom (Sl.list SFRJ br.16/1983) propisuje da se redovno periodično ispitivanje pritiskom posude u eksploataciji mora izvršiti najkasnije do kraja šeste godine od poslednjeg ispitivanja, ako propisima o tehničkim normativima za neku vrstu posuda pod pritiskom nije drugačije određeno.

Vodeni pritisak za ispitivanje računa se po obrascu:

$$p_i = 1,3 \times p_r \quad (\text{bar})$$

gde je p_i ispitni pritisak i p_r proračunski pritisak.

Jasno je utvrđeno da se posle hidrotesta sa ovako proračunatim pritiskom kod sfernih rezervoara izrađenih od mikrolegiranih čelika, prslinae pojavljuju sa unutrašnje strane rezervoara, na zavarenim spojevima,

Analiza realnih uslova u eksploataciji pokazuje da se u ekstremnim situacijama može postići maksimalni radni pritisak, ali se to dešava vrlo retko. Ventili sigurnosti, koji se redovno baždare na set vrednosti +10% iznad maksimalnog radnog pritiska, praktično sprečavaju tokom eksploatacije veći pritisak od $1,1 \times p_r$. Prema tome, za sferne rezervoare koji su u eksploataciji, ispitni pritisak treba da se izračunava po obrascu:

$$p_i = 1,1 \times p_r + p_g \quad (\text{bar})$$

gde je p_g apsolutna vrednost greške baždarenja sigurnosnog ventila.

This is confirmed by magnetic particles testing before and after the cold water proof test on joints R-I and R-III and adjacent vertical joints, where the new cracks were found on the old parts of joints, e.g. on welded joint parts which was not repaired by welding. The cracks were detected in the longitudinal joint L-17 close to R-III joint, inside the notch induced by repair of the cracks by grinding in the year 1991, as well as cracks in HAZ on joint L-12 close to R-I, not existing before proof test. On 6 of 10 detected locations with crack, the crack is located inside the notch produced by repair in the year 1991.

Anyhow, repair by welding is not the direct cause of crack occurrence, for the following reasons:

- Cracks were revealed on about 80 other notches produced by grinding repair in the year 1991.
- Repair in 1991. was performed by proper rounding.
- The cracks inside the notches in R-I and R-III were not detected before the proof test.
- On the locations of repairing performed by grinding in the year 1996 after proof test no indications of crack-like defects was observed.

All together, it can be stated that the cause of crack initiation is local overstressing induced by the effect of test pressure. Therefore, the revised repair technology for this tank includes hammering of welded joints as well, in order to reduce residual stress.

Inspection and repair are noticeably due to reduced crack number (10 cracks in 1996, 1354 in 1989/90).

COLD WATER PRESSURE TEST

Directives for technical standards for stationary pressure vessels (Sl. list SFRJ No.16/1983) prescribed that the regular periodic pressure test of vessels in service should be performed until the end of the sixth year at the latest, if not otherwise prescribed by the regulations on the technical standards for certain type of pressure vessels.

Water test pressure is calculated using the formula:

$$p_i = 1.3 \times p_r \quad (\text{bar})$$

where p_i is proof test and p_r is design pressure.

It is clearly confirmed that after proof test with so calculated pressure in spherical storage tanks, produced of micro-alloyed steels, the cracks on the inner tank side, in welded joints, occurred.

The analysis of actual service condition shows that in extreme situations maximum operating pressure can be attained, but it's happen rarely. Safety valves, regularly calibrated to the set of values +10% above maximum operating pressure, practically do not allow the pressure higher than $1,1 \times p_r$ in service. Accordingly, for spherical storage tanks in service, test pressure should be calculated according to formula:

$$p_i = 1,1 \times p_r + p_g \quad (\text{bar})$$

where p_g is the absolute error value of the safety valve calibration.

PRAVCI DALJE AKTIVNOSTI

1. Potrebno je prikupiti prema jasnoj klasifikaciji nalaze i iskustva iz prakse probnog ispitivanja pritiskom posuda iz laboratorija za ispitivanja bez razaranja (IBR), (najmanje prema vrsti materijala, radnog fluida, vrednosti ispitnog pritiska). Na osnovu analize ovako prikupljenih podataka treba razmotriti važeće preporuke JUS TP14 i predložiti nove preporuke, za sferne kao i za cilindrične rezervoare, prema vrsti čelika (npr. za mikrolegirane čelike napona tečenja iznad 450 MPa).
2. Jasno je da hidrottest izaziva pojavu novih prslina, i to na starim (nesaniranim) delovima zavarenog spoja. Sem toga, prilikom ispitivanja nekoliko sfera 1996. namerno je ostavljeno više plitkih (do 1,5 mm) i kratkih prslina (dužine do 30 mm), za vreme trajanja izvođenja hidrottesta sa smanjenim pritiskom i utvrđeno je da ispitni pritisak nije izazvao rast prslina. Prsline su nakon probe pritiskom sanirane brušenjem.
3. Prethodni iskustveni podaci daju dovoljno argumenata za aktiviranje stručnog tima - komisije u organizaciji Društva za integritet i vek konstrukcija (DIVK) (stručnjaci zaposleni kod proizvođača posuda, sa fakulteta, iz Inspekcije parnih kotlova, laboratorija IBR) za izmenu propisa koji definišu postupak izvođenja probe pritiskom (naročito veličine ispitnog pritiska) na posudama u eksploataciji.
4. Problem je kako definisati naredna ispitivanja sfera u eksploataciji, jer je u pitanju treći ili čak četvrti vizuelni pregled nakon donošenja direktiva.

Na jednom primeru je pokazano da je znatno smanjen obim kontrolnih i sanacionih aktivnosti, ali se prsline i dalje javljaju (na nesaniranim delovima zavarenog spoja), iako su sve manje učestalosti, vrlo male dubine i dužine. Iskustveno je određena približna prosečna brzina rasta prslina od cca 0,5 mm/god. S obzirom da je ovo relativno mala brzina rasta, ukoliko bi ona bila potvrđena eksperimentalnim merenjima za pojedinačne slučajeve (merenjem napona na karakterističnim mestima, čak i sa namerno ostavljenim prslinama u toku eksploatacije, i poznavanjem kinetike stabilnog rasta prsline za pojedine vrste fluida), naredna ispitivanja bi mogla biti odlagana do sledećeg redovnog unutrašnjeg pregleda bez periodične kontrole, t.j. na period od 6 godina, sa tendencijom da se ispitivanja nakon 6 godina izvedu u znatno manjem obimu nego prilikom prvog i drugog vizuelnog pregleda..

LITERATURA – REFERENCES

1. B. Vujović-Djordjević, B. Aleksić, J. Kurai: "Pregled i analiza rezultata ispitivanja i sanacija posuda pod pritiskom izrađenih od finozrnih i mikrolegiranih čelika u toku eksploatacije", (Dokumentacija Sektora KKOM HIP-Azotara izrađena za potrebe RIPK), Pančevo, jun 1993.
2. J. Kurai: Predlog izmena Uputstva za pregled i ispitivanje spremnika za TNP, izrađenih od sitnozrnatih – mikrolegiranih čelika komercijalne oznake Nioval i Niobal, 6. Međunarodna letnja škola mehanike loma (IFMASS 6), Vrdnik, 1991. godine, Diskusija okruglog stola
3. J. Kurai: "Kritički osvrt na ispitivanje sfernih rezervoara od mikrolegiranih čelika", Sručni skup Republičkog inspektorata parnih kotlova i laboratorija za ispitivanje bez razaranja, Jastrebac 1996.

FURTHER ACTIVITY TRENDS

1. It is necessary to collect clearly classified results and experiences related to practice of pressure vessel proof testing from non-destructive testing (NDT) laboratories, (at least according to material quality, operating fluid, test pressure value). Based on the analysis of these data, valid directives JUS TP14 should be considered and the new ones proposed, for spherical and also for cylindrical storage tanks, according to steel quality (e.g. micro-alloyed steel of yield stress above 450 MPa).
2. It is clear that proof test causes the nucleation of new cracks in old (non repaired) parts of welded joints. In addition, in 1996 some shallow (up to 1.5 mm) and short (up to 30 mm long) cracks were intentionally left during the proof test under reduced pressure in several spheres and it was found that the test pressure did not induce any crack propagation. After the testing these cracks were removed by grinding
3. Previous data from experience offer sufficient arguments for the activation of an experts team - a committee under the auspice of the Society for Structural Integrity and Life (DIVK) (the experts of the vessel producers, from the faculties, Inspection Boiler Office, NDT laboratories) for change of the regulations defining pressure test procedure (especially test pressure value) on pressure vessels in service,.
4. Problem is in how to define future tests of spheres in service, since the third or even fourth visual examination after the introduced of directives is in question.

It has been shown on one example that the scope of inspection and repairing activities is significantly reduced, but the cracks still occur (on non repaired welded joint parts), although less frequently, with small depth and length. Based on experience, the approximate average crack growth rate of cca 0.5 mm/year is established. Since this is relatively slow crack growth rate, if it would be confirmed experimentally by measurement in specified cases (stress measurement at typical locations, also with intentionally left cracks during service, and knowing the kinetics of stable crack growth for specified fluid), future tests could be postponed up to next regular inside inspection without periodical inspection, e.g. to the period of 6 years, with the intention that the tests after 6 years should be performed in significantly reduced scope in comparison to first and second visual examination.

4. JUS TP 14: Tehnička preporuka za pregled i ispitivanje sfernih rezervoara u toku eksploatacije, Savezni zavod za standardizaciju, 1995.
5. J. Kurai, A. Fertilio: "Prilog problematici ispitivanja i ocene stanja sfernih rezervoara u eksploataciji", "Zavarivač", 1/1993, str. 43-50.
6. Radni materijal Komisije za izradu Pravilnika o tehničkim zahtevima za opremu pod pritiskom, Ministarstvo za privredu, Beograd, 1999-2000. A. Bređan,
7. J. Kurai: "Trebalo li nam Certifikaciono telo za certifikaciju osoblja u oblasti IBR", Savetovanje JUSK - Niška Banja, april 2003.