

<https://doi.org/10.24867/JPE-1994-11-033>

ORIGINALNI NAUČNI RAD

Kakaš D., Bajić V., Sabo B.

**PROBLEMATIKA POJAVE POPREČNIH PRSLINA U ZAVARENIM SPOJEVIMA
KOD SUDOVA POD PRITISKOM IZRADJENIM OD NISKO LEGIRANIH ČELIKA
POVIŠENE ČVRSTOĆE**

**THE PROBLEMS OF TRANSVERSAL CRACKS APPEARANCE IN WELDS AT HIGH
PRESSURE VESSEL PRODUCED OF HIGH STRENGTH LOW ALLOY STEEL**

Summary

High strength low alloy steels offer some economic benefits due to reduction in material consumption for manufacturing the rail tanks for aggressive fluid transportation. This steel could improve the service economy because of smaller weight of vessel. On the other side, these types of steels are very sensitive to stress corrosion. Presence of cracks in welds could influence on increasing the stress corrosion intensity in exploitation.

In this paper the problems of transversal cracks appearance in welds were analyzed based on experience in control at number of vessel. Number of transversal cracks increased at weld with local stress concentration involved by adjustment before the welding. The welds for joining the lids and cylindrical parts of tanks are the most critical what can be attributed to local plastic deformation during the adjustment and wall thickness differences. Significant influence of welding technology also was observed. The manual arc welding shows some advantage compared to submerged arc welding, what could be explained with smaller dimension of welds cross sections and smaller energy import during the welding.

Influence of heat treatment also was analyzed. Experimental results show that adequate choice of time and temperature could reduce the level of internal stress and hardness at recommended value.

According to actual standardized proof test requirements for this type of vessel the summary stress in transversal welds could overcome yield stress and initiate the cracks appearance. Once initiated cracks can propagate by stress corrosion in service. In this paper the heat treatment of welds was recommended to avoid transversal cracks appearance.

Dr.Damir Kakaš, red.prof, Dr.Bela Sabo,vanr.prof i Mr.Bajić Vladimir, asistent - Fakultet tehničkih nauka, Institut za proizvodno mašinstvo, Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6.

Rezime

U radu je analiziran problem nastanka poprečnih prslina u zavarenim spojevima kod sudova pod pritiskom izradjenim od visokočvrstih čelika namenjenim za transport agresivnih fluida. Prisustvo ovih prslina na unutrašnjoj površini suda može izazvati havarije u toku eksploatacije jer se pri transportu agresivnih fluida može pojaviti intenzivna naponska korozija koja jako utiče na ubrzano širenje već prisutnih pukotina.

Tehnologija zavarivanja ima najveći uticaj na pojavu poprečnih prslina kod ovih čelika. Najkritičniji zavari su na mestu spajanja dna i cilindričnog dela plašta, jer se tu pojavljuje problem lokalnih napona nastalih u toku podešavanja cilindričnosti pre zavarivanja, a ne može se zanematiti ni uticaj razlike u debljinama zidova. REL tehnologija se pokazala boljom u odnosu na EPP postupak, jer je manji unos energije pri zavarivanju. Nakon zavarivanja treba primeniti adekvatan postupak termičke obrade u cilju smanjenja zaostalih napona. Ukazano je da postoji veliki uticaj probnog pritiska pri ispitivanju cisterne, zbog superponiranja zaostalih i unesenih napona pri čemu ukupni napon može da predje granicu tečenja ovog materijala i da bude uzrok nastanku velikog broja poprečnih prslina.

1. UVOD

Nisko legirani čelici povišene čvrstoće (HSLA) su relativno naglo počeli da se primenjuju u savremenoj industrijskoj praksi jer se u mašinogradnji mogu postići značajne uštede njihovom upotrebom. Pre svega se to odnosi na smanjenje mase konstrukcije što je posebno značajno kod pokretnih sudova pod pritiskom. Nakon početnog entuzijazma, nastalo je veliko razočarenje kod korisnika u praksi, tako da se i u Jugoslaviji već 1982 godine pojavljuju ozbiljni problemi u eksploataciji sudova pod pritiskom izradjenih od ovih čelika. U literaturi se mogu sresti podaci da se i u drugim državama intenzivno izučavao ovaj problem jer se pojavio niz havarija sa veoma ozbiljnim posledicama. Postavljeno je pitanje ekonomske opravdanosti korišćenja već izradjenih sudova, jer se sa jedne strane nameće potreba za veoma skupom učestalom kontrolom razvoja već uočenih prslina, a sa druge strane se javlja problem mogućnosti nastanka katasrofalnih posledica u slučaju daljeg korišćenja posuda pod pritiskom, posebno u slučajevima kada sadrže eksplozivne ili otrovne fluide. /1-3/.

U našoj sredini najozbiljniji problemi su se pojavili kod vagon cisterni za transport tečnog amonijaka koje su bile izradjene od čelika StE 500 po DINu. Problem kvaliteta ovih cisterni je detaljno istražen u radu /4/.

Za sudove koji su predviđeni za transport agresivnih fluida, kao što je amonijak, naročita pažnja se mora posvetiti prisustvu prslina u zavarenim spojevima jer se one veoma lako putem naponske korozije mogu proširiti i izazvati havarije u toku eksploatacije. Sam postupak eksploatacije može bitno doprineti nastanku i razvoju prslina u zavarenim spojevima cisterni, tako da se postupak punjenja i pražnjenja mora strogo propisati i kontrolisati. Medjutim, najveći deo problema je vezan za proces izrade ovih posuda i tu treba strogo poštovati propisanu tehnologiju zavarivanja i kontrole, koja mora biti proverena na prototipu. Danas se još uvek traži rešenje za optimalni obim kontrole kao i za izradu kriterijuma prihvatljivosti koji su po pravilu mnogo strožiji u odnosu na cisterne izradjene od običnih konstrukcionih čelika. Tu se pre svega misli na:

Kakaš D., Bajić V., Sabo B.

**PROBLEMATIKA POJAVE POPREČNIH PRSLINA U ZAVARENIM SPOJEVIMA
KOD SUDOVA POD PRITISKOM IZRADJENIM OD NISKO LEGIRANIH ČELIKA
POVIŠENE ČVRSTOĆE**

**THE PROBLEMS OF TRANSVERSAL CRACKS APPEARANCE IN WELDS AT HIGH
PRESSURE VESSEL PRODUCED OF HIGH STRENGTH LOW ALLOY STEEL**

Summary

High strength low alloy steels offer some economic benefits due to reduction in material consumption for manufacturing the rail tanks for aggressive fluid transportation. This steel could improve the service economy because of smaller weight of vessel. On the other side, these types of steels are very sensitive to stress corrosion. Presence of cracks in welds could influence on increasing the stress corrosion intensity in exploitation.

In this paper the problems of transversal cracks appearance in welds were analyzed based on experience in control at number of vessel. Number of transversal cracks increased at weld with local stress concentration involved by adjustment before the welding. The welds for joining the lids and cylindrical parts of tanks are the most critical what can be attributed to local plastic deformation during the adjustment and wall thickness differences. Significant influence of welding technology also was observed. The manual arc welding shows some advantage compared to submerged arc welding, what could be explained with smaller dimension of welds cross sections and smaller energy import during the welding.

Influence of heat treatment also was analyzed. Experimental results show that adequate choice of time and temperature could reduce the level of internal stress and hardness at recommended value.

According to actual standardized proof test requirements for this type of vessel the summary stress in transversal welds could overcome yield stress and initiate the cracks appearance. Once initiated cracks can propagate by stress corrosion in service. In this paper the heat treatment of welds was recommended to avoid transversal cracks appearance.

Dr.Damir Kakaš, red.prof, Dr.Bela Sabo,vanr.prof i Mr.Bajić Vladimir, asistent - Fakultet tehničkih nauka, Institut za proizvodno mašinstvo, Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6.

Rezime

U radu je analiziran problem nastanka poprečnih prslina u zavarenim spojevima kod sudova pod pritiskom izradjenim od visokočvrstih čelika namenjenim za transport agresivnih fluida. Prisustvo ovih prslina na unutrašnjoj površini suda može izazvati havarije u toku eksploatacije jer se pri transportu agresivnih fluida može pojaviti intenzivna naponska korozija koja jako utiče na ubrzano širenje već prisutnih pukotina.

Tehnologija zavarivanja ima najveći uticaj na pojavu poprečnih prslina kod ovih čelika. Najkritičniji zavari su na mestu spajanja dna i cilindričnog dela plašta, jer se tu pojavljuje problem lokalnih napona nastalih u toku podešavanja cilindričnosti pre zavarivanja, a ne može se zanematiti ni uticaj razlike u debljinama zidova. REL tehnologija se pokazala boljom u odnosu na EPP postupak, jer je manji unos energije pri zavarivanju. Nakon zavarivanja treba primeniti adekvatan postupak termičke obrade u cilju smanjenja zaostalih napona. Ukazano je da postoji veliki uticaj probnog pritiska pri ispitivanju cisterne, zbog superponiranja zaostalih i unesenih napona pri čemu ukupni napon može da pređe granicu tečenja ovog materijala i da bude uzrok nastanku velikog broja poprečnih prslina.

1. UVOD

Nisko legirani čelici povišene čvrstoće (HSLA) su relativno naglo počeli da se primenjuju u savremenoj industrijskoj praksi jer se u mašinogradnji mogu postići značajne uštede njihovom upotrebom. Pre svega se to odnosi na smanjenje mase konstrukcije što je posebno značajno kod pokretnih sudova pod pritiskom. Nakon početnog entuzijazma, nastalo je veliko razočarenje kod korisnika u praksi, tako da se i u Jugoslaviji već 1982 godine pojavljuju ozbiljni problemi u eksploataciji sudova pod pritiskom izradjenih od ovih čelika. U literaturi se mogu sresti podaci da se i u drugim državama intenzivno izučavao ovaj problem jer se pojavio niz havarija sa veoma ozbiljnim posledicama. Postavljeno je pitanje ekonomske opravdanosti korišćenja već izradjenih sudova, jer se sa jedne strane nameće potreba za veoma skupom učestalom kontrolom razvoja već uočenih prslina, a sa druge strane se javlja problem mogućnosti nastanka katasrofalnih posledica u slučaju daljeg korišćenja posuda pod pritiskom, posebno u slučajevima kada sadrže eksplozivne ili otrovne fluide. /1-3/.

U našoj sredini najozbiljniji problemi su se pojavili kod vagon cisterni za transport tečnog amonijaka koje su bile izradjene od čelika StE 500 po DINu. Problem kvaliteta ovih cisterni je detaljno istražen u radu /4/.

Za sudove koji su predviđeni za transport agresivnih fluida, kao što je amonijak, naročita pažnja se mora posvetiti prisustvu prslina u zavarenim spojevima jer se one veoma lako putem naponske korozije mogu proširiti i izazvati havarije u toku eksploatacije. Sam postupak eksploatacije može bitno doprineti nastanku i razvoju prslina u zavarenim spojevima cisterni, tako da se postupak punjenja i pražnjenja mora strogo propisati i kontrolisati. Medjutim, najveći deo problema je vezan za proces izrade ovih posuda i tu treba strogo poštovati propisanu tehnologiju zavarivanja i kontrole, koja mora biti proverena na prototipu. Danas se još uvek traži rešenje za optimalni obim kontrole kao i za izradu kriterijuma prihvatljivosti koji su po pravilu mnogo strožiji u odnosu na cisterne izradjene od običnih konstrukcionih čelika. Tu se pre svega misli na:

- izbor materijala sa optimalnim odnosom napona tečenja i zatezne čvrstoće,
- strogo je propisan sadržaj ugljenika ,mangana, fosfora u čeliku,
- ograničena je maksimalna zatezna čvrstoća materijala,
- strogo je definisan kvalitet zavarenih spojeva
- mora se strogo poštovati detaljno razradjen i proveren tehnološki postupak izrade.

Poseban problem predstavlja neuskладjenost zahteva standardnog postupka ispitivanja hladnim vodenim pritiskom po JUS-u ,koi se u praksi pokazao neprimeren za ovaj tip sudova, jer je u određenoj meri nastanak prslina bio povezan sa prevelikom opterećenjem odnosno nastankom prevelikih napona u zavarenom spoju pri tom ispitivanju. Na ovo upućuju iskustva stečena pri sanaciji i dopunskom ispitivanju sudova pod pritiskom za transport tečnog amonijaka.

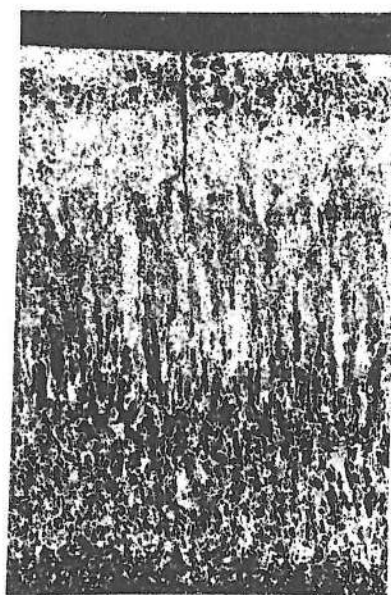
Cilj ovoga rada je da prikaže neka iskustva koja su stečena u toku detaljnog ispitivanja radjenih na grupi od 50 cisterni namenjenih za transport tečnog amonijaka. Ispitivani broj cisterni je sadržao cisterne koje nisu nikad punjene kao i cisterne koje su više puta punjene što je omogućilo da se sagleda uticaj tehnologije izrade kao i uticaj eksploatacije na pojavu grešaka tipa transverzalnih odnosno poprečnih prslina u zavarenom spoju.

2. REZULTATI I DISKUSIJA

U toku ispitivanja bez razaranja, prisustvo poprečnih prslina je ispitivano penetrantskom metodom, magnetnom metodom i pomoću ultrazvuka. Na mestima gde je pouzdano utvrđeno prisustvo prslina, u cilju detaljnijeg sagledavanja oblika i dužine prostiranja ovih prslina, korišćena je metoda replika. Na slici 1. prikazan je tipičan izgled poprečnih prslina, gde se jasno može uočiti da se neke od prslina prostiru preko celog zavarenog spoja, dok se značajan broj prslina prostire kroz samo jedan prolaz.



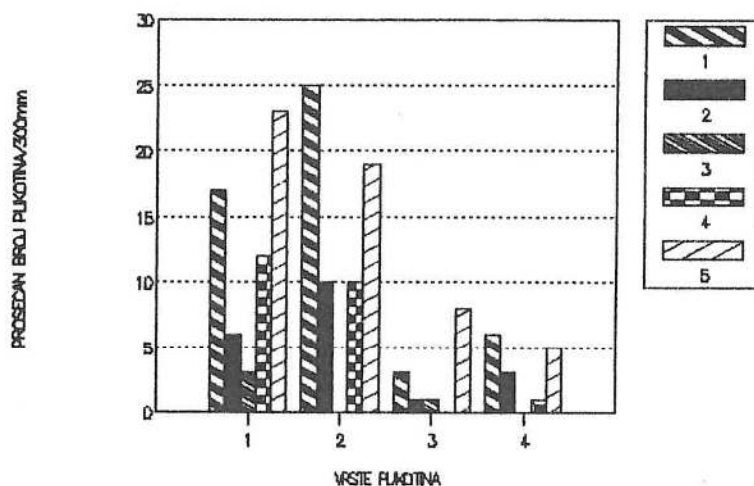
Sl.1 Makro izgled poprečnih prslina u zavaru



Sl.2 Uzdužni presek zavarenog spoja sa poprečnom prslinom (12 x)

Na slici 2. prikazan je metalografski izgled uzdužnog preseka zavarenog spoja, gde je jasno uočljivo da se poprečna prslina prostire do dubine uvara završnog prolaza.

Poprečne pukotine su brojane u šavovima na dužini od 300 mm, na unutrašnjoj površini cisterne. Pukotine koje se prostiru po širini jednog prolaza, najčešće se pojavljuju u kružnim zavarima na mestu spoja danca i cilindričnog dela plašta, dok su znatno manje prisutne na mestu spoja dva cilindrična dela plašta, iako je korišćen isti postupak zavarivanja (EPP) u oba slučaja (sl.3). Poprečne prsline se neuporedivo redje pojavljuju na mestu spoja dva cilindrična dela plašta (srednji kružni šav cisterne) zavarenih REL postupkom. Interesantno je da se intenzitet pojave poprečnih prsline malo razlikuje u zavisnosti od toga da li su prisutne u završnom ili u predzadnjem prolazu. Poprečne prsline koje se prostiru preko celog zavara, ili čak u i osnovni materijal, imaju daleko manju frekvencu pojavljivanja u odnosu na prethodne, ali se i tu kao kritična mesta pojavljuju mesta spoja cilindričnog dela plašta i danca.



Sl3. Prosečni broj poprečnih prsline na 300 mm dužine zavara u kružnim zavarima: 1 i 5 su kružni šav spoja danca i plašta, 2 i 4 - kružni spoj dva cilindrična dela plašta (EPP), 3 - srednji kružni zavar (REL). Vrste prsline su označene sa:

- 1 - Poprečne prsline samo u završnom prolazu
- 2 - Poprečne prsline u predzadnjem prolazu
- 3 - Poprečne prsline preko celog zavara
- 4 - Poprečne prsline preko zavara i osnovnog materijala

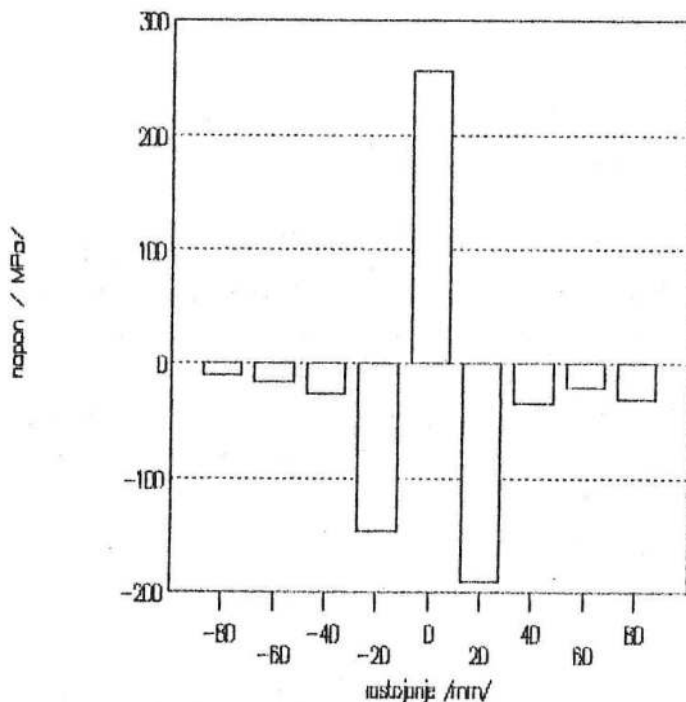
Interesantni podaci su dobijeni upoređivanjem rezultata ispitivanja prisustva poprečnih prsline, korišćenjem različitih defektoskopskih metoda na istom zavaru. Da bi se minimizirala subjektivna ocena operatera, svaki zavar je bio kontrolisan od strane dve nezavisne ekipe kontrolora. Ako bi se posmatrali samo rezultati ultrazvučnih ispitivanja, neki zavari bi bili proglašeni za ispravne, a tek naknadna ispitivanja magnetnom i penetrantskom metodom pokazala su da ipak u pojedinim segmentima postoji značajan broj prsline. Stoga smatramo da se u razradi postupaka kontrole posuda pod pritiskom izradjenih od HSLA materijala, moraju koristiti sve tri metode kontrole bez razaranja da bi se dobio dovoljno visok stepen pouzdanosti rezultata u vezi sa ocenom ispravnosti zavarenih spojeva. Takodje smatramo da se mora koristiti 100% kontrola kružnih zavara,

posebno imajući u vidu iskustvo neravnomernost gustine prslina u pojedinim segmentima jednog istog kružnog zavora.

Utvrđena je bitna razlika u pogledu prisustva poprečnih prslina kod kružnih i uzdužnih zavora. Kod uzdužnih zavora praktično nije uočeno prisustvo poprečnih prslina, što se može objasniti sa odsustvom efekta uklještenja u toku zavarivanja. Kod kružnih zavora, gde su spojena dva cilindrična dela plašta, efekat uklještenja je bio prisutan, jer je podešavana cilindričnost u cilju obezbedjenja sučeonog spajanja dva zida plašta. Najveći problem očigledno predstavlja prisustvo efekta uklještenja na mestu spajanja danca i cilindričnog dela plašta. Kao posebno kritični su se pojavili oni zavari na cisternama, kod kojih je danca imalo čak mehanička oštećenja koja su nastala pri podešavanju cilindričnosti danca i plašta jer se pojavila veća razlika u geometriji otvora danca i prečnika plašta. Smatramo da je određeni udio na pojavu poprečnih prslina u ovom zavoru imala i razlika u debljini zidova cilindričnog dela (13 mm) i danca (16 mm).

Rezultati ispitivanja prikazani na slici 3. ukazuju na znatno manji broj poprečnih prslina u kružnom zavoru izvedenog REL postupkom u odnosu na kružne zavora izvedene EPP postupkom. To se može objasniti razlikom u površini poprečnog preseka pojedinih prolaza pri zavarivanju, odnosno različitim efektom unosa toplote. REL postupak je imao po pravilu uočljivo manji poprečni presek pojedinih prolaza.

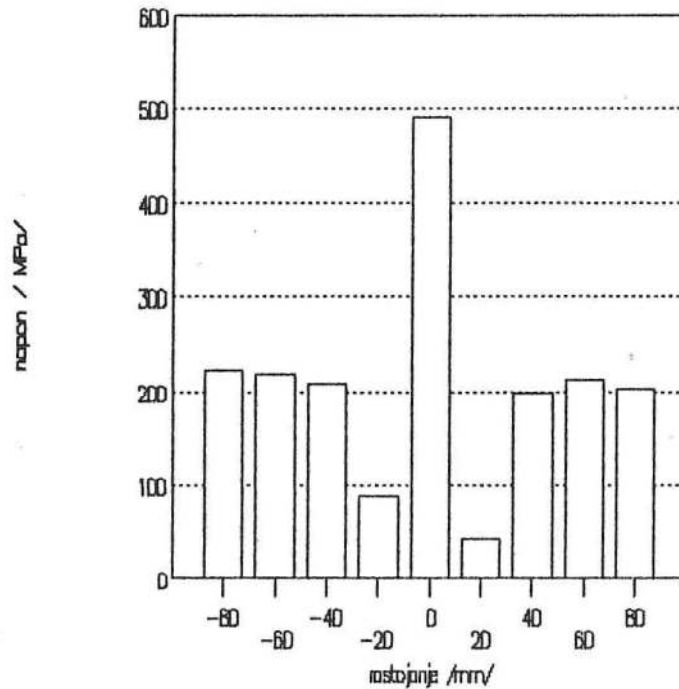
Zaostalo naponsko stanje kružnog zavora, nastalo usled zavarivanja, određeno je eksperimentalnim putem upotrebom metode izrezivanja mernih mesta (slika 4). Rezultati merenja prikazani na slici 4. ukazuju na prisustvo veoma visokih zaostalih zateznih napona u osi zavora, dok je u okolini zavora izmereno prisustvo zaostalog pritisnog napona.



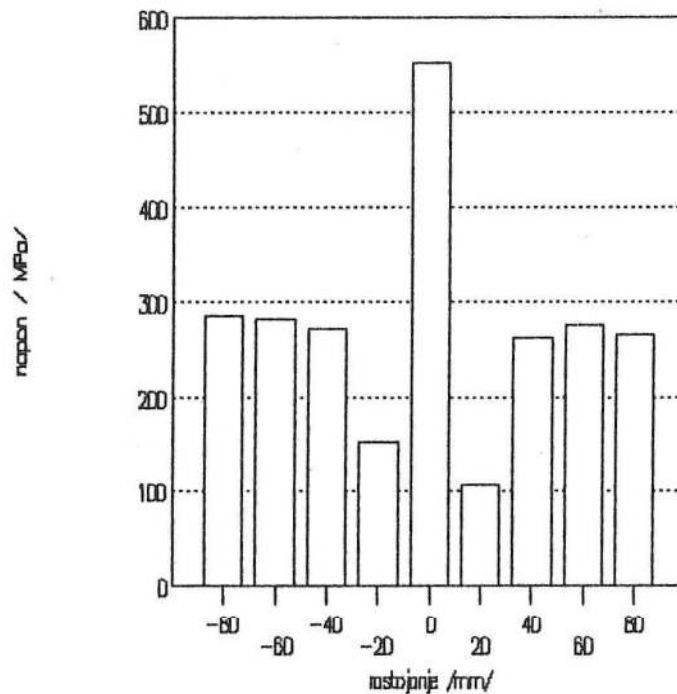
sl.4. Raspored uzdužnog zaostalog napona kružnog zavora (EPP).

Superponiranjem zaostalih napona sa proračunskim eksploatacionim naponima (uzetim iz isprave suda) dobijeno je ukupno naponsko stanje u kružnom zavoru koje je prikazano na slici 5. Veličina ukupnog zateznog napona u osi šava dostiže vrednosti koje su veoma bliske naponu tečenja, izmerene pri ispitivanju mehaničkih svojstava osnovnog

materijala. Posebno treba napomenuti da je u projektnoj dokumentaciji, kao dozvoljena vrednost ukupnih napona, navedena vrednost od 330 MPa.



sl. 5. Raspored ukupnog uzdužnog napona kružnog zavara (superpozicija zaostalog i eksploatacionog napona).



sl. 6. Raspored ukupnog uzdužnog napona kružnog zavara (superpozicija zaostalog i napona usled probnog pritiska).

Najvišiji ukupni naponi u kružnom zavaru javljaju se u toku ispitivanja cisterne sa hladnim vodenim pritiskom, koje se mora vršiti po JUS propisima. Za taj slučaj opterećenja izvršen je proračun naponskog stanja zavara i rezultati su prikazani na slici 6. Superponiranjem zaostalog uzdužnog napona sa unesenim naponima usled dejstva probnog pritiska (uzetim iz isprave suda), dobijena je ukupna vrednost uzdužnog napona u kružnom zavaru koja premašuje napon tečenja u osi šava.

Na osnovu rezultata dobijenih pri ispitivanju bez razaranja, izvršen je izbor uzoraka za detaljno ispitivanje sa razaranjem, tako da je izabrana jedna cisterna koja nikad nije bila u eksploataciji i dve cisterne koje su više puta bile punjene tečnim amonijakom. Makro pregledom je konstatovano prisustvo poprečnih prslina kod sve tri cisterne. Stoga uzrok nastanka prslina pre svega treba tražiti u neadekvatnom materijalu cisterni i neadekvatnoj tehnologiji zavarivanja.

Kod cisterni koje su bile u eksploataciji utvrđeno je prisustvo poprečnih prslina prvenstveno u zonama lociranim u donjem delu cisterne. Ovo se može objasniti eksploatacionim uslovima, imajući u vidu da je sud bio punjen samo do određene visine cisterne sa tečnim amonijakom. Međutim, činjenica da su sve tri cisterne imale veliki broj poprečnih prslina, ipak ukazuje da uzrok nastajanja ovih prslina pre svega treba tražiti u greškama proizvodnje, a ne u uslovima eksploatacije.

Kontrola hemijskog sastava osnovnog materijala je ukazala na prisustvo povišenog sadržaja Cu (0,15-0,19 %) u odnosu na vrednosti koje su deklarisanе za ovaj tip čelika (0,09 do 0,1%).

Ispitivanja mehaničkih svojstava su pokazala da osnovni materijal ima visoku vrednost granice tečenja ($R_{p0,2}$), koja dostiže vrednost 572 MPa, što je uticalo da se kod većine probnih uzoraka pojavila pukotina pri savojnom ispitivanju i to isključivo u ZUT-u.

Mikrotvrdoća je merena na poprečnom preseku kružnih zavaraenih spojeva. Izmerene vrednosti mikrotvrdoće u ZUT-u su prelazile 300 HV10 (čak do 387 HV10), a u zavaru su bile od 187 do 249 HV10.

Metalografska analiza poprečnih preseka zavarenih spojeva pokazala je prisustvo nedozvoljenih struktura, pre svega u ZUT-u, neposredno u blizini spoljne površine zavarenog spoja, odnosno u blizini zadnjeg i predzadnjeg prolaza pri zavarivanju. Ta mesta su po pravilu imala povećane tvrdoće, znatno iznad preporučenih vrednosti (do 250 HV10) za ovaj tip konstrukcija.

Visoke vrednosti granice $R_{p0,2}$ osnovnog materijala rezultuju visokim zaostalim naponima u ZUT-u, posebno u lokalnim tvrdim zonama zavarenih spojeva. Te tvrde zone su uglavnom mikrodimenzija i teško se mogu otkriti merenjem tvrdoće na spoljnim površinama zavarenog spoja (obično se nalaze nešto ispod same površine lima), ali one mogu biti mesto inicijacije pukotina. Stoga treba izvršiti termičku obradu zavarenih spojeva, sa ciljem smanjenja nivoa zaostalih napona uz istovremeno snižavanje tvrdoće. Tim putem se jako utiče na povećanje pouzdanosti u eksploataciji, posebno kod sudova pod pritiskom u kojima je smešten fluid sklon izazvanju naponske korozije. U više Evropskih zemalja postoje propisi da se ovakvi sudovi pod pritiskom moraju obavezno termički obraditi nakon zavarivanja, međutim postoje razlike u pogledu preporučenih vrednosti za temperaturu i trajanje procesa /5/. Raniji propisi RID, koji su obavezni za vagon cisterne, preporučivali su temperaturu $620 \pm 20^\circ\text{C}$ i trajanje od najmanje 2 časa. Novi RID (Pravilnik o međunarodnom i unutrašnjem železničkom prevozu opasnih stvari) propisi ne obavezuju proizvođače da vrše termičku obradu cisterni, imajući u vidu da

moгу nastati i neki negativni efekti u slučaju primene previsokih temperatura i predugih vremena pri termičkoj obradi određenih vrsta visokočvrstih mikrolegiranih čelika.

Novija iskustva su pokazala da se termička obrada ovih cisterni uspešno može vršiti sa parametrima datim u DIN 17102, gde se preporučuju temperature 530-580°C i trajanje do 2,5 časova sa time da se kod trajanja iznad 1,5 časova koriste niže vrednosti temperatura.

Da bi proverili uticaj termičke obrade na ispitivanim cisternama za transport amonijaka izvršili smo termičku obradu zavarenih spojeva na temperaturi 580 °C u trajanju 40 min. Nakon termičke obrade zavara tvrdoća u zavaru je bila maksimalno 216 HV10, a u ZUTu maksimalno 280 HV10. Ovi rezultati pokazuju da se sa termičkom obradom zavarenih spojeva uz optimiziranje parametara termičke obrade tvrdoće zavarenih spojeva mogu dovesti do preporučenih vrednosti.

Prilikom ispitivanja cisterni za prevoz tečnog hlora i sumpor dioksida, izradjenih od čelika NIOVAL 47 sa vrednostima napona tečenja od 475-510 MPa (po atestnoj dokumentaciji) nije uočeno prisustvo ni najmanje pukotine u zavarenom spoju, iako su cisterne bile u eksploataciji od 1986 godine. Ovi rezultati se mogu objasniti činjenicom da je izvršena termička obrada zavarenih spojeva na 560°C u trajanju od 45 minuta, ali i sa podatkom da je probni pritisak bio 22 bara /6/.

Radi poredjenja, treba naglasiti da su cisterne za transport amonijaka imale iste debljine zidova (13 mm) i da je korišćen isti tip zavarivanja (EPP) kao i kod cisterni za transport tečnog hlora, ali kod cisterni za amonijak je probni pritisak bio 26 bara i nije bila izvršena termička obrada.

3. ZAKLJUČAK

Pojava poprečnih prslina u zavarenim spojevima kod sudova pod pritiskom izradjenim od visokočvrstih čelika u velikoj meri zavisi od veličine zaostalih napona koji nastaju pri zavarivanju. Na ove napone jako utiču konkretni uslovi pripreme za svaki kružni zavar i primenjena tehnologija zavarivanja. Greške se češće javljaju na zavarima danca i plašta, nego na mestima spajanja dva cilindrična dela plašta. Isto tako se može konstatovati da je pojava grešaka redja kod primene REL postupka nego kod primene EPP postupka, što se može objasniti manjim unosom toplote pri zavarivanju.

Termička obrada zavara u velikoj meri utiče na kvalitet cisterni i može u potpunosti eliminisati pojavu poprečnih prslina, što se objašnjava sa efektom sniženja unutrašnjih napona i tvrdoće u samom zavaru, kao i u ZUT-u. Za svaki tip zavarenog spoja potrebno je odrediti optimalne parametre tehnologije termičke obrade (temperatura žarenja, vreme, brzina zagrevanja itd.) zavarenog spoja, zavisno od vrste osnovnog materijala i veličine unesenih napona pri zavarivanju.

Primena previsokih probnih pritisaka može dovesti do pojave poprečnih prslina u zavarenom spoju kod ovih sudova pod pritiskom, ali se na ovaj efekat može bitno uticati sa prethodnim snižavanjem nivoa unutrašnjih napona putem primene adekvatne termičke obrade zavarenih spojeva.

- /1/ Humpries M.S., McLaughlin J.E., "Status of Materials for Hidrogen Service and Future Technical Needs for the Petroleum Industry", Intern. Con. on Interaction of Steel with Hydrogen in Petroleum Industry Pressure Vessel Service, Paris, 1989.
- /2/ Hrivnak I., "Breakdown and repair of large spherical containers for liqified hydrocarbon gases", IIW doc. IX-15-16, 1988.
- /3/ Lukačević Z., "Projektiranje, proizvodnja i montaža proizvoda iz visokočvrstih čelika", Zavarivanje, vol 32, broj 5-6, str. 161-170., 1989.
- /4/ Kakaš D., Sabo B., Bajić V. i dr., "Elaborat o kvalitetu i upotrebljivosti vagon cisterni izradjenih od mikrolegiranog čelika namenjenih za prevoz amonijaka", FTN - Novi Sad, 1990, str. 491.
- /5/ "Obrade i ispitivanja posle zavarivanja čeličnih sudova pod pritiskom - sadašnje stanje znanja", Zavarivač, vol. 30, broj 2, 1985, str. 91-97.
- /6/ Kakaš D., Bajić V., "Elaborat o ispitivanju cisterni za transport hlora i sumpordioksida", FTN - Novi Sad, 1994.