



Radomir Jovičić ^{1,a}, Mihajlo Arandjelović ¹, Simon Sedmak ¹, Dejan Jovičić ², Jernej Markež ³, Maja Marković ⁴

ZNAČAJ VIZUELNOG ISPITIVANJA ZAVARENIH SPOJEVA ZA EKSPLOATACIJSKU SIGURNOST OPREME POD PRITISKOM

SIGNIFICANCE OF VISUAL TESTING OF WELDED JOINTS ON EXPLOITATION SAFETY OF PRESSURE EQUIPMENT

Originalni naučni rad / Original scientific paper

Rad primljen / Paper received:

Avgust 2022.

Rad prihvaćen / Paper accepted:

Jul 2023.

Adresa autora / Author's address:

¹ Inovacioni centar Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, Srbija

² SchwingStetter doo, Smederevo, Srbija;

³ Metalweld, Sosnowiec, Poljska

⁴ Minel Enim, Smederevo, Srbija

email: ^a jovicicrad@gmail.com

Ključne reči: oprema pod pritiskom, zavareni spoj, greške, otkaz.

Keywords: pressure equipment, welded joint, defects, failure.

Rezime

Često se u dokumentaciji o izradi zavarenih konstrukcija, izveštaji o vizuelnom ispitivanju ne mogu naći ili nisu izrađeni u skladu sa odgovarajućim standardom. Lom zavarenih konstrukcija izazivaju prsline, koje se prevashodno javljaju na greškama u zavarenim spojevima. Neke od ovih grešaka se mogu otkriti samo vizuelnim ispitivanjem. Takođe, vizuelnim ispitivanjem se, u odnosu na ostale metode ispitivanja bez razaranja, lakše i pouzdanije otkrivaju delovi zavarenih spojeva sa povećanom verovatnoćom nastanka prsline, npr. mesta reparatura tokom izrade ili eksploatacije konstrukcije. Delovi zavarenih spojeva sa povećanom verovatnoćom nastanka prsline, otkriveni vizuelnim ispitivanjem, moraju da budu predmet ispitivanja ostalim metodama ispitivanja bez razaranja. Na taj način smanjuje se verovatnoća otkaza tj. povećava se sigurnost zavarene konstrukcije. Ovo je posebno važno kod opreme pod pritiskom. U ovom radu je prikazan lom jednog rezervoara za skladištenje tečnog kiseonika tokom eksploatacije. Pri izradi rezervoara napravljen je veći broj grešaka u zavarenim spojevima. Jedna od grešaka, oblika zarez, nakon višegodišnje eksploatacije rezervoara je dovela do njegovog razaranja.

Abstract

More often than not, documentation about making and testing of welded structures does not include visual test reports, or includes such reports which are not in accordance with relevant standards. Welded structure failure is caused by cracks, which typically occur in welded joint defects. Some of these defects can only be detected using visual testing. In addition, visual testing is a reliable method for determining which parts of a welded joint have increased risk of crack initiation, i.e., repair locations during fabrication or exploitation, which also need to be subjected to other non-destructive test methods. In this way, probability of failure is decreased, i.e., welded structure safety is improved. This is of particular importance for pressure equipment. This paper shows the failure of a tank used for storage of liquid oxygen during exploitation. During tank fabrication, a number of defects were made in the welded joint. One of these defects, in the form of a notch, lead to the destruction of the tank after years of exploitation.

Rad je u izvornom obliku objavljen u Zborniku radova sa 32. Savetovanja sa međunarodnim učešćem „Zavarivanje 2022“ održanog na Tari, Srbija od 12. do 15. oktobra 2022. godine



1. Uvod

Često se u dokumentacijama o izradi zavarenih konstrukcija, izveštaji o vizuelnom ispitivanju zavarenih spojeva ne nalaze ili nisu usklađeni sa odgovarajućim standardom [1]. Standardi za ispitivanja i kontrolu zavarenih konstrukcija predviđaju ovo ispitivanje kao obavezno. Pod vizuelnim ispitivanjem, pored pregleda metala šava (MŠ), podrazumeva se i njegova dimenziona kontrola, kao i pregled zona sa obe strane šava.

Da bi zavarena konstrukcija bila bezbedna za eksploataciju izvedeni nivo kvaliteta zavarenih spojeva mora biti veći od projektovanog ili bar jednak njemu [2]. Pod izvedenim nivoom kvaliteta podrazumeva se da greške u izvedenim spojevima svojom prirodom, veličinom, brojem i učestalošću ne slabe spojeve više nego što je to projektom dozvoljeno. Sve greške, u zavisnosti od prirode, veličine i učestalosti, izazivaju lokalna povećanja napona, što povećava verovatnoću nastanka ili rasta postojećih prslina ili eventualno otkaza tj. mesta sa greškama u zavarenim spojevima predstavljaju slaba mesta na zavarenim konstrukcijama. Na spojeve na konstrukcijama deluju naponi izazvani opterećenjem, koji su na različitim delovima konstrukcija, različiti po vrsti, smeru i intenzitetu, npr. podužni i kružni spojevi i njihova ukrasna mesta na opremi pod pritiskom. Ovo znači da u delovima nekih spojeva do nastanka ili rasta prslina ili eventualno loma, može doći pri manjim naponima izazvanim opterećenjem konstrukcije tj. da neki delovi zavarenih spojeva na konstrukciji predstavljaju slaba tj. kritična mesta [3]. Načelno, zavarena konstrukcija je bezbedna za eksploataciju onoliko koliko je bezbedno najslabije mesto na njoj.

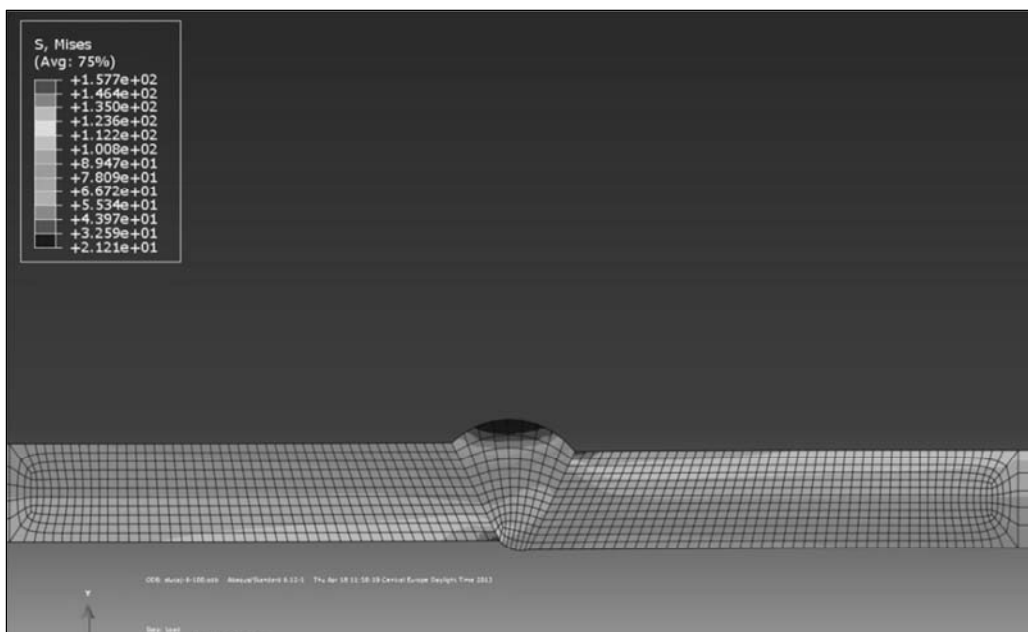
Da bi se otkrilo najslabije mesto na zavarenoj konstrukciji i utvrdile njegove osobine tj. procenio rizik od loma tokom eksploatacije konstrukcije, potrebno je prvo definisati proceduru ispitivanja zavarenih spojeva metodama bez razaranja [4]. Definisanje ove procedure podrazumeva analizu proizvođačke dokumentacije konstrukcije, analizu rezultata prethodnih ispitivanja metodama bez

razaranja (IBR) i analizu uslova eksploatacije konstrukcije, zbog eventualnih prekoračenja projektnih parametara koja mogu dovesti do oštećenja zavarenih spojeva. Na osnovu toga i na osnovu relevantnih standarda definišu se metode, obim i mesta primene metoda IBR na pojedinim zavarenim spojevima.

2. Značaj vizuelnog ispitivanja zavarenih spojeva

Standardi za ispitivanja zavarenih spojeva, samo u slučaju VT ispitivanja predviđaju, bez izuzetka, obim ispitivanja 100%. Ovo je posebno važno kod opreme pod pritiskom kod koje verovatnoću nastanka i rasta prslina tj. verovatnoću otkaza povećava energija akumulirana u zidu opreme tj. u zavarenim spojevima, a koja je posledica unutrašnjeg pritiska. Ostale konvencionalne metode IBR se u najvećem broju slučajeva, prema standardima, primenjuju i u manjem obimu. U tim slučajevima, ukoliko se i VT ispitivanje ne primeni ili ne primeni u obimu 100%, pojedini delovi zavarenih spojeva ostaju neispitani, zbog čega u njima mogu ostati neuočena kritična mesta. Ta mesta su mesta sa greškama koje se osim VT ispitivanjem ne mogu otkriti drugim metodama IBR, neodgovarajuće dimenzije spojeva, greške koje se mogu otkriti VT ispitivanjem, a koje mogu da budu da uzrok nastanka drugih grešaka, mesta sa višestrukim greškama u spoju, mesta prethodnih reparatura zavarenih spojeva, eksploatacijska oštećenja kao i greške u osnovnom materijalu (OM) pored zavarenih spojeva.

Slike 1., 2. i 3. prikazuju pojednostavljene modele spojeva zavarenih na čeliku S 235, debljine 10 mm, MAG postupkom sa dodatnim materijalom SG2. Modeli su izrađeni metodom konačnih elemenata. Spojevi su poprečno opterećeni silom koja u OM izaziva napon od 100 MPa. Na slikama 1. i 2. su prikazane greške koje se, osim VT ispitivanjem, ne mogu otkriti drugima metodama IBR. To su smaknuće i neodgovarajući ugao prelaza sa lica šava na OM. Na slici 1. prikazano je smaknuće veličine 1 mm, koje je u ovom slučaju prihvatljivo za nivo kvaliteta B prema standardu [5].

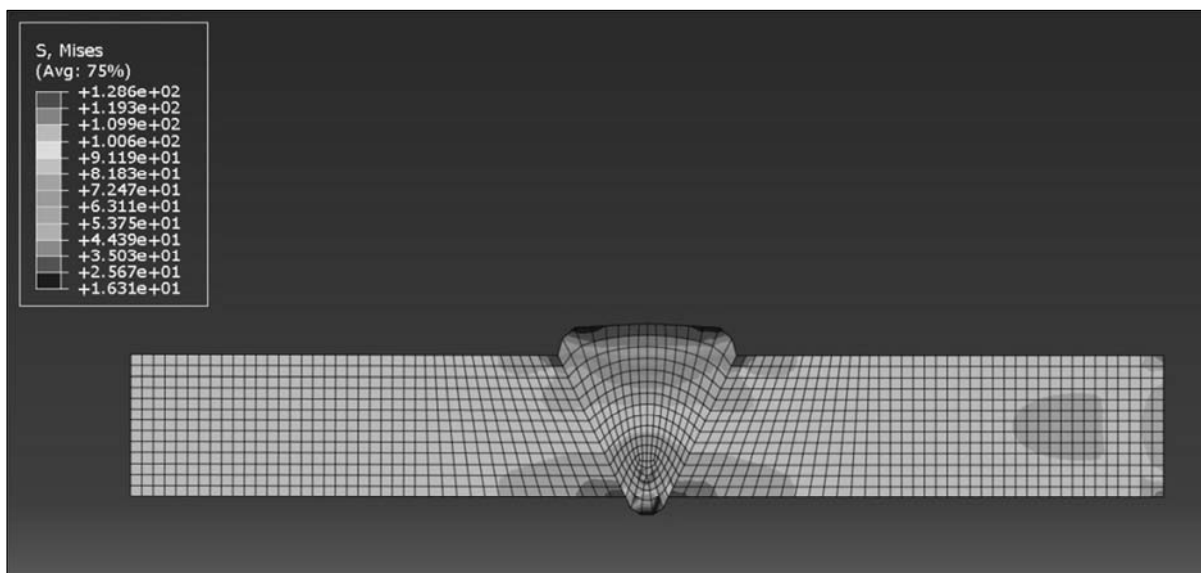


Slika 1. Povećanje napona u zavarenom spoju izazvano smaknućem

Figure 1. Stress increase in the welded joint caused by the misalignment

Sa slike se vidi da ova greška izaziva povećanje napona od skoro 58% na prelazu sa lica i naličija šava na OM. Pri istom naponu u OM, lokalno povećanje napona, definisano kao faktor koncentracije napona, povećava se sa povećanjem

veličine smaknuća. Na slici 2. prikazan je spoj sa uglom prelaza sa lica šava na OM od 90° i nešto većim uglom prelaza sa strane korena šava. Ovaj ugao je prihvatljiv za spojeve nivoa kvaliteta D prema standardu [5].



Slika 2. Povećanje napona u zavarenom spoju izazvano oštrim uglom prelaza sa šava na osnovni materijal

Figure 2. Stress increase in a welded joint caused by a sharp angle transitions from the weld metal to the base metal

Sa slike se vidi da ova greška izaziva lokalno povećanje napona - faktor koncentracije napona od skoro 29%, kako u zoni lica tako i u zoni korena šava. Ovo povećanje napona tj. faktor koncentracije napona se smanjuje sa povećanjem ugla prelaza. Navedeni primeri pokazuju da se napon izazvan prisustvom greške u zavarenom spoju može odrediti ako su poznati faktor

koncentracije napona na grešci i veličina delujućeg zateznog napona. Faktor koncentracije napona zavisi od oblika i dimenzija greške.

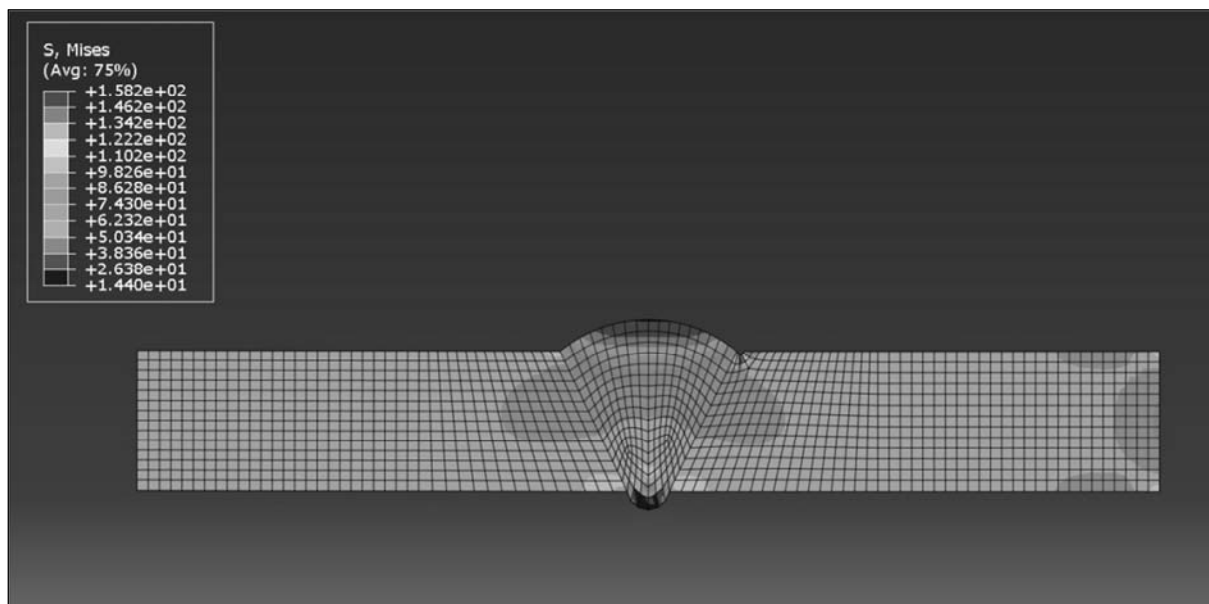
Izvedeni kvalitet zavarenih spojeva se utvrđuje i na osnovu širine i visine metala šava sa strane lica i korena i na osnovu ujednačenosti ovih veličina duž šava. Kod ugaonih spojeva ove veličine nije



moguće odrediti na drugi način osim VT ispitivanjem. Takođe, samo je VT ispitivanjem, kod ugaonih spojeva, moguće otkriti greške kao što su nedovoljna visina ili prevelika ispupčenost tj. mali ugao prelaza sa lica spoja na OM. Kod sučeonih spojeva širinu je moguće odrediti i RT metodom. Međutim, ovom metodom se teško, sa dovoljnom tačnošću, mogu odrediti visine pojedinih delova spoja npr. na mestima prevelikog nadvišenja ili prokapina, što je uslov za određivanje njihove prihvatljivosti. Neujednačene visine i širine spojeva ukazuju na odstupanja od zadatih parametara zavarivanja duž spoja. Usled ovih odstupanja povećava se broj grešaka u spojevima i time i broj kritičnih mesta na zavarenoj konstrukciji. Zbog ovoga je važno da se VT ispitivanje uradi u obimu

100% čime se obezbeđuje da eventualna kritična mesta budu predmet ispitivanja i ostalim metodama IBR.

Greške kao što su npr. ivični zajed i smaknuća mogu biti uzrok nastanka prslina ili nedostatka stapanja. Ivični zajed i smaknuća su greške koje se lako otkrivaju VT ispitivanjem. Međutim, prsline i nedostatak stapanja se uglavnom ne mogu otkriti ovim ispitivanjem. Zbog toga je, nakon VT ispitivanja ova mesta potrebno ispitati drugim metodama IBR. Na slici 3. prikazan je ivični zajed dubine 0,5 mm na spoju opisnih karakteristika. Ivični zajed ove dubine je prihvatljiv za nivo kvaliteta B prema standardu [5].



Slika 3. Povećanje napona u zavarenom spoju izazvano ivičnim zajedom

Figure 3. Stress increase in the welded joint caused by edge undercut

Sa slike 3. se vidi da ivični zajed, u ovom slučaju, izaziva lokalno povećanje napona - faktor koncentracije napona od 58%. Povećanje napona se javlja u delu ZUT koji najčešće ima najtvrdju i najnepovoljniju mikrostruturu sa aspekta otpora na nastanak i rast prslina.

Smaknuće, takođe, izaziva povećanje napona u delovima ZUT sa nepovoljnom mikrostrukturom, ali ne samo sa strane lica nego i sa strane korena spoja, slika 1. Slika 4.a) pokazuje makrostruturu jednostrano zavarenog spoja sa smaknućem veličine 2 mm. Spoj je zavaren na čeliku S 235 debljine 12 mm, MAG postupkom sa dodatnim materijalom SG2. U korenog delu niže strane spoja uočava se nedostatak stapanja. Kod spojeva kod kojih je jedna strana smaknuta u odnosu na drugu

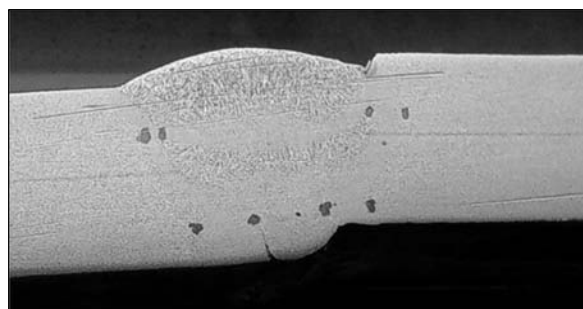
nedostatak stapanja je vrlo verovatna greška. U slučajevima većih smaknuća pojavljuje se i greška nedostatka uvarivanja. Ove greške su posledica neravnomernog zagrevanja strana žleba električnim lukom.

U praksi su česti slučajevi da se na istom mestu u spoju nađe više grešaka. Tokom eksploatacijskog ispitivanja rezervoara za skladištenje tečnog ugljendioksida, na spoju omotača i danca, otkrivena je višestruka greška, smaknuće i oštar prelaz sa lica šava na OM. Rezervoar je horizontalan, zapremine 50 m³ i izrađen je od mikrolegiranog čelika P460NL1, debljine 17 mm. Ostali podaci o rezervoaru su: maksimalni radni pritisak 20 bara, ispitni pritisak 26 bara, najniža radna temperatura - 50°C i spoljni prečnik 3000 mm [6]. Spoj sa višestrukom greškom je zavaren dvostrano u X

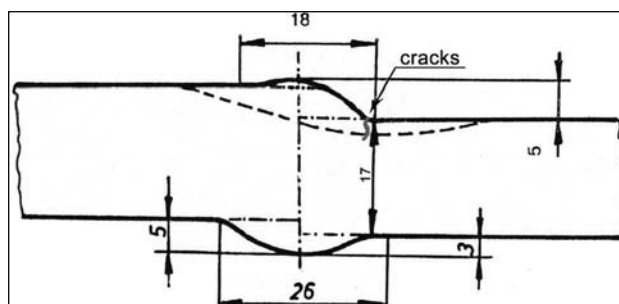


žlebu, EPP postupkom, dodatnim materijalom S2NiMo. Potrebni nivo kvaliteta zavarenog spoja je nivo B [5]. Na osnovu toga zaključeno je da je, u ovom slučaju, prihvatljiva veličina smaknuća od 1,7 mm, dok je VT ispitivanjem izmereno 5 mm, a da je prihvatljiva veličina ugla prelaza sa lica šava na OM

minimalno 150° , dok je izmereno 120° . Prema tome otkrivene greške su neprihvatljive za zahtevani nivo kvaliteta zavarenog spoja. Slika 4.b) prikazuje poprečni presek kroz spoj na mestu višestruke greške.



a)



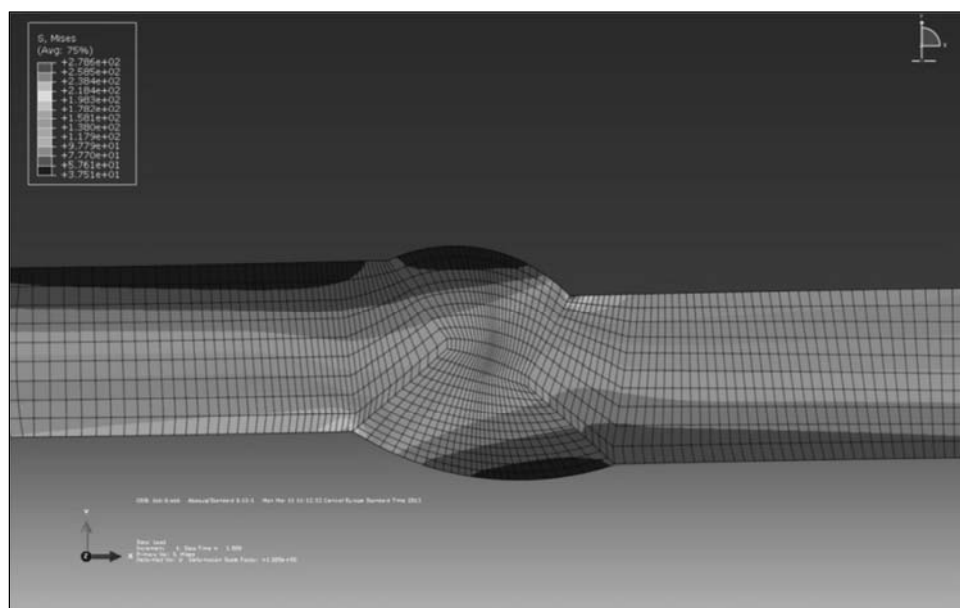
b)

Slika 4. Makrostruktura spoja sa smaknućem, nedovoljnom popunjenošću žleba i nedostatkom stapanja u korenu a), b) presek kroz spoj na mestu višestruke greške, smaknuće i mali ugao prelaza sa lica šava na osnovni materijal i položaj i veličina njima izazvane prsline

Figure 4. Macrostructure of the joint with misalignment, underfill of the groove and a lack of root fusion a), b) section through the joint at the place of multiple defects, misalignment and a small angle of transition from the weld metal to the base metal and the position and size of the crack caused by them

Metodom konačnih elemenata analizirano je naponsko stanje oko ove višestruke greške pri radnim i ispitnim uslovima u rezervoaru [6]. Cilj analize je utvrđivanje mogućnosti nastanka prsline. Utvrđeno je da su za nastanak prsline kritični uslovi pri ispitivanju rezervoara unutrašnjim pritiskom.

Slika 5. prikazuje raspodelu i veličine napona oko mesta sa višestrukom greškom pri ispitnom pritisku. Sa slike se vidi da se najveći napon od 279 MPa (crvena oblast), javlja u zoni smaknuća na prelazu sa lica šava na OM.



Slika 5. Povećanje napona u zavarenom spoju izazvano višestrukom greškom, smaknuće i mali ugao prelaza sa lica šava na osnovni materijal

Figure 5. Stress increase in the welded joint caused by a multiple defects, misalignment and a small angle of transition from the weld metal to the base metal



Na osnovu proizvođačke dokumentacije rezervoara zaključeno je da on nije naponski žaren, da je zavaren dodatnim materijalom čvrstoće praktično jednake čvrstoći OM i da je zavaren EPP postupkom. Na osnovu toga procenjeno je da zaostali napon u zavarenom spoju sa greškom iznosi oko 85% napona tečenja MŠ tj. da iznosi oko 383 MPa [6]. Ovaj napon sabran sa naponom koji izaziva višestruka greška iznosi 662 MPa što prevazlazi zateznu čvrstoću OM. Moguće je da je ovaj napon veći i od zatezne čvrstoće OM u ZUT što može dovesti do pojave prslina na prelazu sa lica šava na OM. Zbog toga je predviđeno da se nakon VT ispitivanja ovo mesto ispita magnetnim česticama i ultrazvukom. Ovim ispitivanjima su, na mestu višestruke greške, otkrivene prsline, slika 4.b) dubine do 3 mm.

Mesta naknadnih popravki tj. reparatura treba obavezno da budu predmet ispitivanja metodama IBR. Ona se, po pravilu, zavaruju pod nepovoljnijim uslovima u odnosu na ostatak zavarenih spojeva. U tom smislu najuticajniji faktor je omoteno skupljanje MŠ zbog čega se na mestima reparatura javljaju veliki zaostali naponi koji pogoduju nastanku prslina. Zbog toga tokom VT ispitivanja ova mesta obavezno treba ispitati i drugim metodama IBR.

Greške u OM pored zavarenih spojeva koje se mogu otkriti VT ispitivanjem, a koje mogu da budu uzrok nastanka prslina ili otkaza su npr. trag uspostavljanja luka, oštećenja od privremenih spojeva, tragovi brušenja i oštećenja od pomoćnih alata. Uspostavljanje luka i privremeni spojevi u OM su greške koje su posebno opasne kod čelika povišene i visoke čvrstoće, jer pogoduju pojavi hladnih prslina. Tragovi brušenja i oštećenja od pomoćnih alata povećavaju sklonost ka pojavi prslina kroz efekat zarezata.

3. Analiza otkaza rezervoara za tečni kiseonik

Rezervoar je vertikalna, dvostruka, vakum izolovana posuda pod pritiskom, zapremine 11m³ [7]. Rezervoar se sastojao se od spoljne posude izrađene od niskougleničnog čelika u koju je smeštena unutrašnja posuda izrađena od visokolegiranog austenitnog čelika X5CrNi18.10, debljine 5,7 mm. Rezervoar je korišćen za skladištenje utečnog kiseonika. Pri otkazu spoljni rezervoar je potpuno uništen, a unutrašnji

rezervoar je u značajnoj meri oštećen i deformisan. Na jednom od podužnih spojeva na omotaču uočena je zona dužine oko 300 mm sa više prslina, slika 6. Ostali podaci o rezervoaru su radni pritisak 15 bara, ispitni pritisak 23 bara, najniža radna temperatura - 196°C.

Nakon otkaza, zavareni spojevi na unutrašnjem rezervoaru su ispitani metodama bez razaranja i razaranjem. Ispitivanje VT metodom je urađeno sa spoljne i unutrašnje strane rezervoara u obimu 100%. Svi spojevi na rezervoaru su zavareni E postupkom, dvostrano, austenitnim dodatnim materijalom. Ispitivanjem su otkriveni ivični zajedni (slika 7.a), mestimične popravke lica šava brušenjem, oštećenja OM od brušenja (slika 7.b), smaknuća, mestimično nedovoljna visina šava – lice šava niže od nivoa OM (slika 7.a) i duboka oštećenja OM od brušenja. Prihvatljivost otkrivenih grešaka je ocenjena na osnovu propisa koji su važili u momentu puštanja rezervoara u eksploataciju [8, 9, 10]. Iz literature [10] se vidi da na podužnim spojevima rezervoara nisu dozvoljeni ivični zajedni i oštećenja površina OM uz spoj, a da su dozvoljena manja udubljenja lica šava. Na kružnim spojevima dozvoljeni su manji ivični zajedni i manja udubljenja lica šava, dok oštećenja OM uz spoj nisu dozvoljena. Poredeći rezultate ispitivanja sa kriterijumima prihvatljivosti zaključuje se da izvedeni kvalitet zavarenih spojeva nije zadovoljavajući. Navedene greške nisu posledica eksploatacijskih oštećenja i nastale su pri izradi rezervoara. Pregledom proizvođačke dokumentacije utvrđeno je da izveštaji o VT ispitivanjima u njoj ne postoje.

Pregledom površina OM u zoni loma, neposredno uz spoj su uočeni učestali i duboki tragovi brušenja, koji su približno normalni na osu spoja. Ovi tragovi brušenja imaju oblik zarezata i, na slici 6.b), se vide kao veći broj crnih linija pored spoja. Najveće dubine ovih zarezata se kreću od 1,1 do 1,5 mm, što čini 18 do 25% debljine OM. Vizuelnim pregledom prelomne površine uočeno je da se jedna od prslina prostire kroz dublji od ovih zarezata. Analizom ostalih površina prslina nisu uočene greške koje bi mogle biti uzrok loma. Na osnovu toga i rezultata ostalih ispitivanja zaključeno je da su zarezati, kao koncentratori napona, bili uzrok nastanka ove prslina i na kraju otkaza rezervoara.



a)



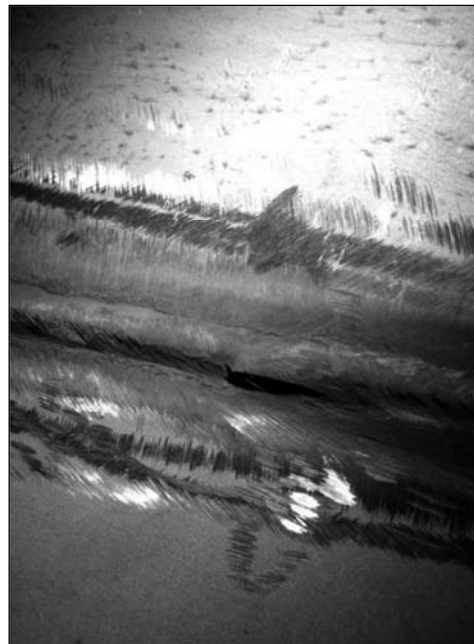
b)

Slika 6. Položaj i izgled oštećene zone na podužnom spoju na omotaču unutrašnjeg rezervoara a), b) oštećena zona, tamne linije u OM pored spoja su oštećenja brušenjem

Figure 6. Position and appearance of the damaged zone in the longitudinal joint on the inner tank cover a), b) damaged zone, and dark lines in the BM next to the joint are damaged by grinding



a)



b)

Slika 7. Podužni spoj, spoljna strana, ivični zajed i mesto sa nedovoljnom visinom šava a), b) spoj dna i omotača, unutrašnja strana rezervoara, oštećenja OM i lica šava brušenjem

Figure 7. Longitudinal joint, outer side, edge undercut and a place with underfill a), b) joint of the bottom and cover, inner side of the tank, damage to the OM and the face of the seam by grinding



4. Zaključci

Vizuelno ispitivanje, pri oceni izvedenog kvaliteta zavarenih konstrukcija, u značajnom broju slučajeva nije primenjeno ili nije primenjeno na odgovarajući način. Ovo se zaključuje na osnovu pregleda dokumentacija konstrukcija i izveštaja o eksploatacijskim ispitivanjima u kojima izveštaji o VT ispitivanjima nedostaju ili nisu izrađeni u skladu sa propisima.

Vizuelno ispitivanje zavarenih spojeva je nužno sprovesti iz sledećih razloga. Neki tipovi grešaka u zavarenim spojevima se mogu otkriti samo ovim ispitivanjem. Izvedene dimenzije zavarenih spojeva, npr. ugaonih, nije moguće utvrditi drugima metodama IBR. Dimenzije nekih tipova grešaka nije moguće dovoljno precizno utvrditi drugima metodama da bi se ocenila njihova prihvatljivost. VT ispitivanjem se otkrivaju greške koje mogu da iniciraju nastanak drugih grešaka, zatim višestruke greške u spoju, mesta predhodnih reparatura, eksploatacijska oštećenja kao i greške osnovnom materijalu pored zavarenih spojeva. Navedene greške, osim VT ispitivanjem, moraju da budu predmet ispitivanja i drugim metodama IBR, jer mogu da budu uzrok nastanka ili rasta prslina i time i otkaza konstrukcije. Ovo je posebno važno kod opreme pod pritiskom.

U praksi se, u zavarenim spojevima, često otkrivaju višestruke greške tj. dve ili više pojedinačnih grešaka na istom mestu u spoju. Ocena prihvatljivosti ovakvih grešaka je složena. U standardima za nivo kvaliteta zavarenih spojeva postoje kriterijumi prihvatljivosti za manji broj višestrukih grešaka. Međutim, zbog velikog broja mogućih kombinacija pojedinačnih grešaka u višestruke, ovi standardi, u praksi nisu uvek od koristi. Zbog toga, višestruke greške treba detaljno analizirati i ispitati ostalim metodama IBR.

Otkaz rezervoara za skladištenje tečnog kiseonika je uzrokovan prslinom koja je nastala, u osnovnom materijalu, pored spoja na zarezu od brušenja. Zarez je nastao pri izradi rezervoara. Pregledom proizvođačke dokumentacije rezervoara je utvrđeno da izveštaji o VT ispitivanjima u njoj ne postoje. Može se zaključiti da VT ispitivanje zavarenih spojeva nije urađeno ili nije urađeno dovoljno detaljno, zbog čega su ostali neuočeni tragovi brušenja u OM, koji su doveli do loma rezervoara.

4. Conclusions

Visual test, when evaluate the quality of welded constructions, was not applied in a significant number of cases or was not applied in an appropriate manner. This is concluded on the basis of a review of construction documents and reports on exploitation tests in which VT tests reports are missing or not prepared in accordance with regulations.

Visual inspection of welded joints must be carried out for the following reasons. Some types of weld defects can only be detected by this test. Derived dimensions of welded joints, e.g. angular, it is not possible to determine with other NDT methods. The dimensions of some types of errors cannot be determined precisely enough by other methods to assess their acceptability. VT testing reveals errors that can initiate the occurrence of other faults, then multiple faults in the joint, places of previous repairs, operational damage as well as errors in the base material next to welded joints. The mentioned errors, apart from VT testing, must also be subject to testing by other IBR methods, because they can be the cause of the formation or growth of cracks and thus the failure of the structure. This is especially important with pressure equipment.

In practice, multiple faults are often detected in welded joints, i.e. two or more individual faults in the same place in the joint. The assessment of the acceptability of such faults is complex. In the standards for quality levels of welded joints, there are acceptance criteria for a smaller number of multiple defects. However, due to the large number of possible combinations of individual faults into multiple ones, these standards are not always useful in practice. Therefore, multiple faults should be thoroughly analyzed and investigated by other NDT methods.

The failure of the liquid oxygen storage tank was caused by a crack in the base material next to the joint on the notch from grinding. The notch was created during the manufacture of the tank. A review of the manufacturer's documentation of the tank revealed that there are no reports on visual tests in it. It can be concluded that the VT examination of the welded joints was not done or was not done in sufficient detail, which is reason that the grinding marks in the BM remained unobserved, which led to the breakage of the tank.



Literatura / References

[1] SRPS EN ISO 17637/2017 - Ispitivanje bez razaranja zavarenih spojeva – Vizuelno ispitivanje spojeva zavarenih topljenjem

[2] S. Sedmak, (1991), Eksploatacijske prsline u zavarenim spojevima posuda pod pritiskom, 6. Međunarodna letnja škola Mehanike loma, Eksploatacijske prsline u posudama pod pritiskom u rezervoarima, Vrdnik, Srbija, 293-308

[3] A. Radović, (1982), Zavareni spoj kao kritično konstrukciono mesto na posudi pod pritiskom, 2. Međunarodna letnja škola Mehanike loma, Savremeni aspekti projektovanja i izrade sudova i cevovoda pod pritiskom, Velika Plana, Srbija, 171-177

[4] R. Jovičić, (1997), Procena sigurnosti zavarenih posuda pod pritiskom ispitivanjem u toku eksploatacije, Magistarski rad, Tehnološko metalurški fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija

[5] Standard EN ISO 5817/2008: Elektrolučno zavarivanje čelika, nikla, titana i njihovih legura – Nivoi kvaliteta za nepravilnosti

[6] R. Jovičić, S. Sedmak, U. Tatić, U. Lukić, M. Walid, (2015), Stress State Around Imperfections in Welded Joints, Structural Integrity and Life, 15, 1, 27-29

[7] R. Jovičić, (2019), Ispitivanje i uzroci otkaza zavarenog spoja na rezervoaru za skladištenje utečnog kiseonika, Elaborat br. 01.19, Inovacioni centar mašinskog fakulteta u Beogradu, Beograd, Srbija

[8] Pravilnik o tehničkim normativima za stabilne posude pod pritiskom, Sl. SFRJ 16/83

[9] SRPS M.E2.159 Posude pod pritiskom, Kontrola i ispitivanje zavarenih spojeva

[10] SRPS C.T3.010 Zavarivanje – Klase kvaliteta zavarenih spojeva izvedenih topljenjem na čeliku



Ispitivanje Materijala & Zavarenih Spojeva