

PROCENA INTEGRITETA I VEKA KOMPONENTI UGROŽENIH KOROZIJOM INTEGRITY AND LIFE ASSESSMENT OF COMPONENTS ENDANGERED BY CORROSION

Stručni rad / Professional paper

UDK /UDC: 620.169.1

Rad primljen / Paper received: 24.04.2007

Adresa autora / Author's address:

¹ Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu,
sedmak@divk.org.yu

² Inovacioni centar Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu

Ključne reči

- korozija
- integritet konstrukcije
- vek
- ispitivanja bez razaranja
- analiza rezultata

Izvod

Opisani su postupci mehanike loma za ocenu integriteta i veka konstrukcija i prikazana njihova primena. Dat je pregled novih postupaka ispitivanja bez razaranja konstrukcija i sistem za ocenu značaja korozije za vek konstrukcija.

UVOD

Uspešno korišćenje instalirane opreme radi ispunjenja osnovnog zahteva korisnika podrazumeva niz aktivnosti, počev od projekta, preko izrade do eksploatacije opreme, sve do dostizanja propisanog ili očekivanog veka. Pri tom se uzimaju u obzir svi aspekti: konstrukcije, uključujući i izbor materijala, kvalitet izvođenja, ostvaren primenjenim postupcima izrade i kontrole, uslovi eksploatacije i praćenje i održavanje opreme. Korisnik zahteva da oprema bude funkcionalna pouzdana, odnosno, uvek obezbeđen integritet u toku očekivanog veka. U slučaju pojave oštećenja kao posledica opterećenja i radnih uslova u toku eksploatacije, izvedene inspekcije i kvaliteta održavanja, mora se oceniti njihov uticaj na integriteta i preostali veka. Danas su takve analize vrlo tačne zahvaljujući savremenim uređajima za ispitivanje bez razaranja visoke osetljivosti i preciznom određivanju veličine i položaja grešaka, primeni postupaka mehanike loma za ocenu značaja grešaka, usavršenih kompjutera i softvera velikih mogućnosti.

PROBNO ISPITIVANJE PRITISKOM KAO KRITERIJUM SIGURNOSTI I INTEGRITETA OPREME

Do zahteva da se dokaže sigurnost proizvedene opreme pod pritiskom je došlo dvadesetih godina prošlog veka paralelno sa uvođenjem zavarivanja umesto zakivanja u izradi opreme. Značajni napor je uložena da se korisnici opreme uvere u nadmoć postupka zavarivanja. Tako je za dokaz homogenosti zavarenog spoja uvedeno rentgensko ispitivanje, u to vreme jedini razvijen postupak ispitivanja bez razaranja. Kratko posle uvođenja ispitivanje rendgenom je standardom propisano za prijem i inspekciju opreme pod

Keywords

- corrosion
- structural integrity
- life
- non-destructive testing
- results analysis

Abstract

Fracture mechanics procedures for structural integrity and life assessment are described and their application presented. The review of new non-destructive testing methods is given as well as the system for the evaluation of significance of corrosion for structural life.

pritiskom i još uvek se rendgenogram zahteva kao obavezni osnovni dokument o kvalitetu zavarenog spoja.

Drugi značajni zahtev je bio da se dokaže sigurnost u radu opreme pod pritiskom. Posle učestalih otkaza opreme u radu, ne retko sa katastrofalnim posledicama, taj zahtev je rešen uvođenjem probnog ispitivanjem pritiskom. Pristup je jednostavan: ako posuda, na osnovu izvedenih ispitivanja ocenjena kao prihvatljiva za eksploataciju, izdrži probni pritisak propisanog nivoa, velika je verovatnoća da će u eksploataciji ona izdržati pritisak nižeg nivoa. To znači da je time sigurnost zagarantovana, pa se problem svodi na određivanje potrebnog nivoa probnog pritiska, kao bitan kriterijum stepena sigurnosti opreme.

Još uvek se konstruisanje opreme pod pritiskom zasniva na naponu tečenja R_e izabranog materijala. U načelu su dopuštene samo elastične deformacije, pa se dopušteni napon σ_{dop} određuje kao količnik napona tečenja i stepena sigurnosti, koji je za posude pod pritiskom najčešće $\nu = 1,5$. Stepenu sigurnosti obuhvata neizvesnosti pri projektovanju u pogledu podataka, što se naročito odnosi na zavareni spoj. Pomoću kotlovske formule se određuje potrebna debljina zida t posude, prečnika D , izložene radnom pritisku p :

$$\sigma = Dp/2t \quad \sigma_{dop} = R_e/\nu \quad t = Dp/2 \quad \sigma_{dop} = \nu Dp/2R_e \quad (1)$$

Da bi se dostigao napon tečenja materijala treba, zbog stepena sigurnosti $\nu = 1,5$ probni pritisak p_i da bude za 50% bude veći od radnog pritiska p . Ako posuda izdrži probni pritisak tog nivoa, ne treba očekivati otkaz u radu.

Nekoliko primera će pokazati manjkavost ovog pristupa.

Dobro poznat i detaljno analiziran krti lom se dogodio 1964. godine pri probnom ispitivanju pritiskom 480 bar posude debljine zida 150 mm i prečnika 2 m, namenjene za konverziju amonijaka (sl. 1). Posuda je projektovana za

pritisak 350 bar i temperaturu 120°C. Prema propisanom postupku posuda je pre probnog ispitivanja prekontrolisana, uključujući i rentgensko snimanje. Do loma je došlo u toku predviđene zadržke, 30 s nakon dostizanja pritiska 340 bar /1,2/. Uzrok loma je prslina u zoni uticaja toplote (ZUT). Zbog loše izvedene termičke obrade došlo je do povećane tvrdoće i krtosti čelika u ZUT, što je uz veliku debljinu zida i grešku tipa prslina u materijalu uslovalo da se uspostavi stanje ravne deformacije i velika koncentracija napona oko postojeće greške. S obzirom na uspostavljeno ravno stanje deformacije pritiskom od 340 bar je uneta dovoljna energija ne samo za inicijaciju, već i za rast prslina i lom.



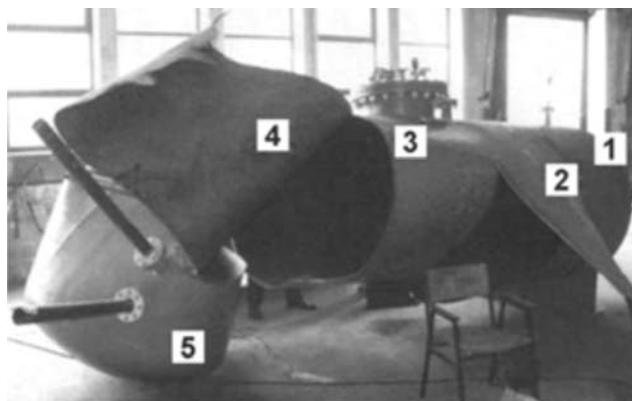
Slika 1. Havarija debelozidne posude pri probnom pritisku

U ovom slučaju je namena probnog ispitivanja pritiskom ispunjena. Očigledno je da je ovim lomom izbegnut otkaz posude u eksploataciji, čije bi posledice bile mnogo teže. I ova neočekivana šteta je bila velika. Proizvođač posuda je bio zabrinut i zbog toga što je ranije isporučen i pušten u eksploataciju veći broj ovakvih konvertora, koji su izdržali probno ispitivanje i pritisak od 480 bar, a u eksploataciji nisu izloženi pritisku većem od 350 bar. Ipak je naručio detaljno istraživanje uzroka koma. Dobijeni rezultati /1,2/ su bili dragoceni za proizvođača opreme. Naknadna analiza primenom mehanike loma radi ocene integriteta je potvrdila rezultate istraživanja i pokazala valjanost pristupa u slučaju krtog loma, /2/.

Princip inspeksijskog probnog ispitivanja pritiskom je još uvek osnova za prijem i kontrolu opreme pod pritiskom u eksploataciji. Koliko je taj pristup delikatan pokazuje i primer krtog loma pri probnom ispitivanju rezervoara za utečnjeni prirodni gas (sl. 2), koji se dogodio nedavno, /3/. Verovatni uzrok loma je niska temperatura, ispod prelazne temperature krtosti materijala i zavarenog spoja, jer nije bila kontrolisana temperatura hlađenja tečnim azotom pri ispitivanju. Na osnovu podataka je zaključeno da uzrok loma leži u uslovima ispitivanja, a da je kvalitet rezervoara bio zadovoljavajući s obzirom na uslove eksploatacije.

Treći primer probno ispitivanje pritiskom radi prijema sfernih rezervoara (sl. 3) za skladištenje pod pritiskom utečnjenog prirodnog gasa dovodi u sumnju sam pristup. Za izradu ovih rezervoara je korišćen mikrolegirani čelik tipa TSt 460 – NIOVAL 47, nazivnog napona tečenja 460 MPa. Ovi su rezervoari konačno zavarivani na licu mesta. Kod većine rezervoara je posle pet do šest godina eksploatacije

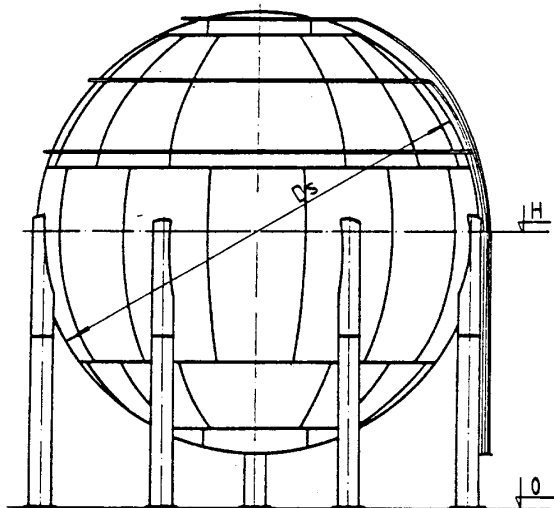
dolazilo do curenja koje nije bilo moguće odmah objasniti, /4/. Da bi se problem rešio, sredinom osamdesetih godina u Nemačkoj je propisom dopuštena izrada sfernih rezervoara samo od čelika napona tečenja 355 MPa ili manje, jer se ovakav otkaz nije javljao kod čelika tipa St 52-3, napona tečenja 355 MPa (Č.0563 JUS C.B0.500). Ovakvi sferni rezervoari su kod nas još uvek u eksploataciji i zahtevaju posebnu pažnju, jer nije bilo mogućnosti da se zamene.



Slika 2. Krti lom rezervoara za utečnjeni prirodni gas pri probnom ispitivanju pritiskom, /3/

Naponska korozija je jedan od osnovnih razloga otkaza sfernih rezervoara, što je za temu ovog rada od posebnog interesa. Zato treba prvo objasniti razlog pojave inicijalnih prslina, koje predstavljaju mesta razvoja naponske korozije. Redosled operacija izrade i prijema rezervoara predviđa probno ispitivanje pritiskom posle montažnog zavarivanja i izvedenog ispitivanja bez razaranja, primenom rentgenskog ispitivanja i postupaka pogodnih za otkrivanje prslina: ultrazvukom (UZ), penetrantskim tečnostima i magnetima. Pri tom, otkrivene greške se moraju sanirati. Kada se utvrdi da nema grešaka, pristupa se probnom ispitivanju pritiskom nivoa 50% većeg od radnog pritiska. Ukoliko rezervoar izdrži toliki pritisak, a u njemu nema grešaka, on je ocenjen kao spreman za eksploataciju pri nazivnom radnom pritisku. Pa ipak dolazi do curenja u eksploataciji. Utvrđeno je, /5/, da se pri zavarivanju čelika klase TSt 460 u ZUT obrazuje kрто područje u blizini linije stapanja. Greške zavarivanja, čija je veličina ispod praga osjetljivosti opreme za ispitivanje bez razaranja se ne mogu otkriti. Zbog koncentracije napona oko prisutnih grešaka, pod dejstvom pritiska koji odgovara naponu tečenja osnovnog materijala, lokalno će biti uspostavljena plastično deformisana zona ili će biti inicirana prslina, ako je materijal krt, kao što je slučaj područja linije stapanja kod čelika TSt 460. Kako je probno ispitivanje pritiskom bilo uspešno, a pre toga nisu otkrivene prslina, sledi zaključak da je rezervoar spreman za eksploataciju. Ako je čistoća gasa nedovoljna, odnosno, ako je sadržaj sumpora veći od kritičnog, pod dejstvom pritiska u rezervoaru dolazi do naponske korozije. Kako je to vremenski zavisani proces, razvoj korozije kroz debljinu zida do curenja gasa traje i više godina.

Može se zaključiti da standardni postupak probnog ispitivanja nije primenljiv u opisanim okolnostima. Kao jedno rešenje predloženo je smanjenje nivoa pritiska na 10 do 30% iznad radnog, ali to zahteva dodatno razmatranje.



Slika 3. Konstrukcija i podaci o sfernom rezervoaru sa dimenzijama otkrivene prsline

KRITERIJUMI MEHANIKE LOMA ZA OCENU INTEGRITETA KONSTRUKCIJA

Mehanika loma je uvođenjem parametara prsline u formule za proračun napona omogućila ocenu integriteta oštećenih konstrukcijskih komponenti. Uspešnost primene mehanike loma zavisi od raspoloživih podataka u pogledu opterećenja konstrukcije, uticaja okolne sredine, ponašanja materijala i njegovih karakteristika. Pri kvazistatičkom ili jednokratnom udarnom opterećenju, ponašanje materijala može biti dvojak. Kada je materijal krto i njegov odgovor pri opterećenju linearno elastičan, konačni lom je krto i odvija se velikom brzinom, jer se razvija u uslovima ravne deformacije, uz zanemarljivu plastičnu deformaciju. Tada se koristi linearno elastična mehanika loma (LEML). Kada se materijal ponaša dominantno plastično, koristi se elasto-plastična mehanika loma (EPML). U tom slučaju je potrebna dodatna energija za razvoj plastične deformacije i postojeće prsline u uslovima ravnog stanja napona, a za to je potrebno vreme. Konačni lom može biti duktilan, ili ako je poprečni presek smanjen rastom prsline, mogu se steći uslovi i za brzi lom. Ostali oblici razvoja loma bitno zavise od vremena. Pri promenljivom opterećenju javlja se zamor materijala, uz rast prsline u svakom ciklusu promene opterećenja, u agresivnoj sredini se razvija korozija, a do pužanja materijala dolazi na povišenoj temperaturi. U svim ovim slučajevima vremenski zavisnog dejstva opterećenja prsline se razvija do kritične veličine za konačni lom.

Primena mehanike loma je donela značajne promene u inženjerskoj praksi. To se najbolje vidi na primeru naftovoda Aljaska, kada su u SAD po prvi put prihvaćeni kriterijumi mehanike loma kao merodavni za greške u zavarenom spoju, /6/, umesto previše konzervativnih standarda. Naime, kada je ispitivanjem bez razaranja otkriven veliki broj grešaka u kružnim zavarenim spojevima, koje je po tada važećim standardima trebalo popraviti, postavilo se pitanje ekonomske opravdanosti i tehničke neophodnosti popravke. Vladina institucija SAD, na zahtev kompanije koja je postavila cevovod, je zatražila ekspertizu od Nacionalnog biroa za standarde (*National Bureau of Standards* – NBS). Analiza mehanike loma, zasnovana na konceptu otvaranja vrha

materijal:	finozmi čelik NIOVAL 47 Železarna Jesenice
nazivni napon tečenja:	$R_c = 460 \text{ MPa}$
zapremina:	$V = 5000 \text{ m}^3$
prečnik:	$D (= 2R) = 21,25 \text{ m}$
debljina zida:	$t = 25 \text{ mm}$
projektni pritisak:	$p = 6 \text{ bar}$
ispitni pritisak:	$p_i = 10 \text{ bar}$
radna temperatura:	$T = 20 \div 50^\circ\text{C}$
stepen sigurnosti:	1,5
koeficijent zavarenih spojeva:	0,85
dužina prsline:	$a = 57 \text{ mm}$
dubina prsline:	$c = 5 \text{ mm}$
koeficijent Poasona:	$\nu = 0,3$
parametar Ijuske:	$\lambda = \sqrt[4]{12(1-\nu^2)} \frac{2a}{\sqrt{Rt}} = 0,2$

prsline (COD), obuhvatila je procenu sile rasta prsline i otpornost materijala, u ovom slučaju metala šava, na rast prsline, /6/. Rezultati ove ekspertize su zvanično prihvaćeni, obim popravke je sveden na minimum, čime su izbegnuti nepotrebni troškovi, a otklonjena je opasnost od unošenja novih grešaka reparaturnim zavarivanjem. Na osnovu ove ekspertize je zaključeno „da je analiza mehanike loma prihvatljiva osnova za odstupanje od postojećih standarda pod određenim okolnostima, ako ta analiza daje ubedljivu i konzervativnu (sigurnu) procenu integriteta konstrukcije“.

Praktična primena uvedenih kriterijuma mehanike loma biće prikazana na nekoliko karakterističnih primera.

Primena linearno elastične mehanike loma

Primena LEML se zasniva na faktoru intenziteta napona, K_I , koji predstavlja opterećenje i geometriju konstrukcije, kao i oblik i veličinu prsline, a njegova kritična vrednost, K_{Ic} , predstavlja svojstvo materijala, žilavost loma pri ravnoj deformaciji, definisano standardom JUS C.A4.083 i 084

$$K_I = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad K_{Ic} = Y\sigma_c\sqrt{\pi a} \quad (2)$$

Ovde je Y –faktor geometrijskog oblika, σ –napon, a –dužina prsline, σ_c –kritična veličina napona za rast prsline.

Na osnovu ovih parametara, LEML kriterijum za ocenu integriteta konstrukcije definisan je u obliku:

$$K_I \leq K_{Ic} - \text{integritet nije ugrožen} \quad (3)$$

$$K_I > K_{Ic} - \text{integritet je ugrožen krtim lomom} \quad (4)$$

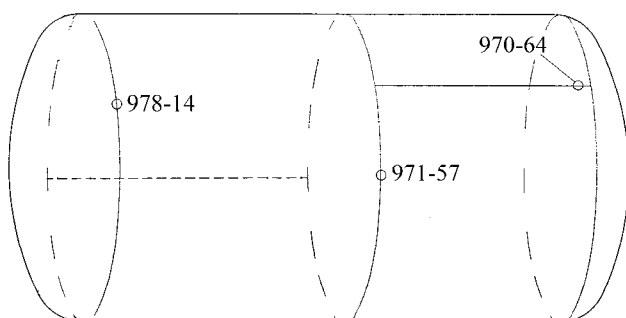
Primenom pristupa usvojenih u brojnim postupcima, od kojih je najpotpuniji *Structural Integrity Assessment Procedure* (SINTAP), /7/, može se oceniti integritet konstrukcije, ali je pri tom potrebno dokazati, uz dopuštena uprošćenja u analizi, da su rezultati ocene konzervativni.

Primer procene integriteta posude pod pritiskom

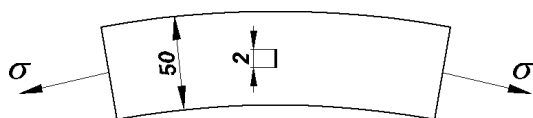
U ovom primeru je prikazan problem koji nastaje kada se u eksploataciji inspekcijским ispitivanjem bez razaranja otkriju greške u zavarenim spojevima, nedopuštene prema standardu JUS ISO 5817, kao što je bio slučaj sa posudama za komprimovani vazduh br. 970, 971 i 978 u HE Bajina Bašta, /8/. Sve ove posude su iste konstrukcije, izrađene prema istoj dokumentaciji. Na sl. 4 su prikazane najveće

greške, od kojih su dve, snimci 970-64 i 971-57, analizirane na osnovu parametara mehanike loma. Kao kritične greške su izdvojene radi analize stanja posuda, neprovar u posudi 970 i nalepljivanje u posudi 971, na osnovu detaljnog pregleda radiograma i dodatnog snimanja ultrazvukom.

Greška sa snimka 970-64 (podužni spoj, blizu gornjeg kružnog šava, sl. 4) je potvrđena kao neprovar dužine 60 mm i širine 2 mm, pri čemu je dimenzija u pravcu zavarrenog spoja uzeta kao dužina greške, a dimenzija u pravcu debljine šava, odnosno zida, kao njena širina (sl. 5).



Slika 4. Analizirane greške na posudama 970, 971 i 978



Slika 5. Skica preseka u kome se analizira prslina

Podaci bitni za analizu primenom LEML, greške 970-64, konzervativno usvojene u vidu prslina su:

- geometrija posude (debljina zida $t = 50$ mm, srednji prečnik $D = 2150$ mm);
- materijal posude: niskolegirani čelik povišene čvrstoće NIOVAL 50, nazivnog napona tečenja 500 MPa;
- geometrija prslina (dužina 60 mm, širina $a = 2$ mm, sl. 5, pravac–duž šava, lokacija–koren metala šava u blizini podužnog kružnog šava sa dancem, daleko od priključaka);
- opterećenje (unutrašnji pritisak $p = 8,1$ MPa, zaostali zatezni napon poprečno na šav $\sigma_R = 200$ MPa, uzet na osnovu iskustva sa merenim zaostalim naponom na sličnoj posudi);
- žilavost loma metala šava $K_{Ic} = 1580$ MPa $\sqrt{\text{mm}}$, uzeto kao minimalna vrednost iz literature, /5/.

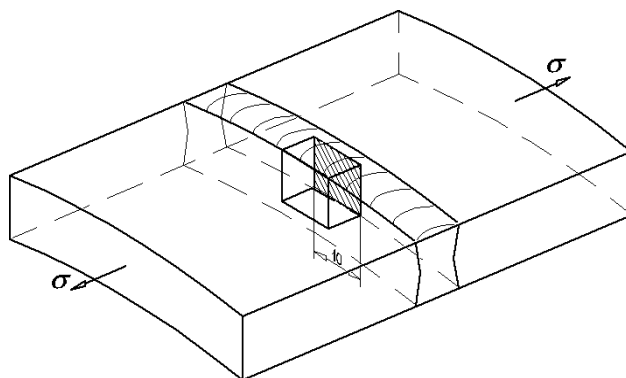
Ako se za udaljeni napon uzme zbir obimskog napona od unutrašnjeg pritiska (jedn. 1) i poprečni zaostali napon u sredini šava, za faktor intenziteta napona se dobija:

$$K_I = (pR/t + \sigma_R)\pi\sqrt{a} = (8,1 \cdot 1075/50 + 200)\pi\sqrt{2} = 663 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$$

Integritet posude s obzirom na krta lom nije ugrožen, jer je vrednost faktora intenziteta napona manja od žilavosti loma metala šava $K_I < K_{Ic} = 1580$ MPa $\sqrt{\text{mm}}$.

Greška 971-57 (nalepljivanje dužine 10 mm u kružnom šavu na sredini posude) je za ovu ocenu konzervativno uprošćena kao prolazna prslina (sl. 6), jer druga dimenzija ionako nije poznata. Kako je konstrukcija posude ista kao prethodna, dati su samo podaci koji se razlikuju:

- geometrija prslina (dužina 10 mm, pravac–duž kružnog metala šava u sredini posude, daleko od priključaka);
- opterećenje (zaostali napon $\sigma_R = 175$ MPa–poprečno na šav, van centra šava, uzeto na osnovu iskustva).



Slika 6. Skica dela omotača u kome se nalazi greška 971-57

Za ove podatke, dobija se za faktor intenziteta napona veća vrednost nego u prethodnom slučaju:

$$K_I = 1039 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$$

ali je i to 66% kritične vrednosti ($K_{Ic} = 1580$ MPa $\sqrt{\text{mm}}$) i ne dovodi posudu u kritično stanje. Čak i da se pretpostavi da je dužina prslina dvostruko veća ($2a = 20$ mm), faktor intenziteta napona $K_I = 1465$ MPa $\sqrt{\text{mm}}$ je još uvek manji od kritične vrednosti (iznosi 92% K_{Ic}).

Na osnovu rezultata ocene integriteta, inspekcija je prihvatila zahtev vlasnika posude za dalju eksploataciju.

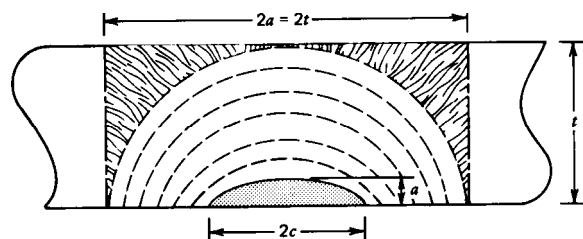
Princip procurivanja pre loma

Kao bitan doprinos konstruisanju opreme pod pritiskom sa sigurnošću od loma, sem prikazane neposredne primene LEML, treba poznavati i princip „procurivanje pre loma“ (*leak-before-break* – LBB), čime se stvaraju uslovi da se spreči krta lom sa mogućim katastrofalnim posledicama. Osnovna ideja je da se obezbede uslovi da prslina, ako postoji, raste prvo u dubinu, a tek potom u dužinu. Na taj način do curenja posude dolazi pre katastrofalnog loma, i zbog pada pritiska neće doći do loma.

Osnovna varijantna principa procurivanja pre loma je opisana u /9/. Pretpostavlja se da u posudi postoji unutrašnja polueliptična prslina dimenzija $a \times 2c$ ($2c > a$), sl. 7, koja može da raste sa vremenom usled kombinovanog dejstva opterećenja, korozije i zamora. Prsline ovakvih dimenzija imaju tendenciju da brže rastu u dubinu sve dok ne dobiju polukružni oblik, pa može da se pretpostavi da će prslina biti takvog oblika i kada dostigne spoljnu površinu posude, tj. kada počne curenje. Dužina prslina je tada očigledno jednaka dvostrukoj debljini zida posude, $2a = 2t$, pa uslov procurivanja pre loma može da se definiše kao:

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a} = \sigma\sqrt{\pi t} < K_{Ic} \quad (5)$$

što znači da prslina dužine manje od dvostruke debljine neće izazvati katastrofalni lom ako do procurivanja dođe, jer nema uslova za njen trenutni rast u podužnom pravcu.



Slika 7. Šematski prikaz koncepta procurivanja pre loma

Treba imati u vidu da se proces odigrava u uslovima linearne elastičnosti, odnosno da važi zavisnost (1).

Razvoj prsline pri elastoplastičnoj deformaciji

Konstrukcije izrađene od duktilnih materijala nisu sklone krtom lomu, ali mogu da pri preopterećenju otkazu posle izražene plastične deformacije (plastični kolaps).

Dijagram analize loma

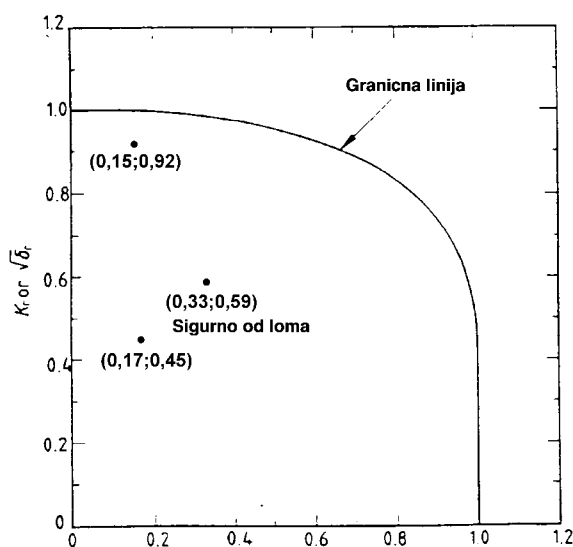
Prema preporuci u literaturi, npr. SINTAP, /7/, u analizi se primenjuje dvoparametarski pristup, iskazan dijagramom analize loma (*Failure Assessment Diagram – FAD*), izraženim pomoću granične krive:

$$\frac{K_{eff}}{K_I} = \frac{\sigma_c}{\sigma} \left[\frac{8}{\pi^2} \ln \sec \frac{\pi}{2} \frac{\sigma}{\sigma_c} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

gde je: $K_I = \sigma \sqrt{\pi a}$, K_{eff} –kritični faktor intenziteta napona, σ_c –napon kolapsa. Napon kolapsa je poluzbir napona tečenja i zatezne čvrstoće i pogodniji je kriterijum tečenja kod realnih materijala. Ovaj dijagram se prikazuje na prikazan način (sl. 8) pomoću bezdimenzionih promenljivih, $S_r = \sigma/\sigma_c$ i $K_r = K_I/K_{Ic}$, pri čemu je usvojeno da je $K_{eff} = K_{Ic}$:

$$K_r = S_r \left[\frac{8}{\pi^2} \ln \sec \left(\frac{\pi}{2} S_r \right) \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (7)$$

Parametri (K_r ; S_r) za grešku na posudi 970 (sl. 4 i 5) su (0,33; 0,59); na posudi 978 su (0,17; 0,45); i na posudi 971 (sl. 6) su (0,15; 0,92), što je prikazano na sl. 8.



Slika 8. Dijagram analize loma primenjen na posude sa greškom

Vidi se da najveće greške, otkrivene pri inspekcijskoj kontroli na tri posude za komprimovani vazduh, nisu kritične ni sa aspekta elastoplastičnog otkaza ni sa aspekta krtog loma. Ove greške nisu ranije otkrivene, jer oprema za ispitivanje korišćena u prethodnim ispitivanjima nije bila dovoljno osetljiva s obzirom na veličinu i vrstu greškaka. Otkrivene greške upućuju na to, da su unete pri zavarivanju i da se posude od početka koriste sa tim greškama, što znači više od 30 godina. Inspekcija je prihvatila ove argumente i dala saglasnost za dalje korišćenje posuda, uz skraćeni rok za naredni pregled.

J integral – analiza rasta prsline

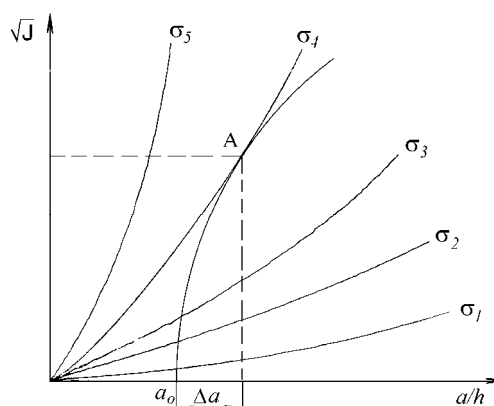
Primena J integrala na procenu integriteta konstrukcije je opravdana jer je sa jedne strane J integral parametar elasto-plastične mehanike loma, koji definiše geometriju tela sa prslinom i opterećenje preko sile rasta prsline (*Crack Driving Force – CDF*), a sa druge strane J integral je mera otpornosti materijala na rast prsline. Za krto ponašanje se kao mera koristi žilavost loma, J_{Ic} , a ako je plastična deformacija izražena, koristi se kriva otpornosti prema rastu prsline, $J-R$ kriva. Bitna razlika je upravo u rastu prsline. Veličina prsline a je nepromenljiva i zajedno sa naponom σ se tretira kao parametarska veličina za proračun sile rasta prsline, a za otpornost materijala prema rastu prsline se podrazumeva priraštaj njene veličine (dužine a). Kriterijum za početak stabilnog rasta prsline je iskazan formulom:

$$J(\sigma, a) = J_{Ic} \quad (8)$$

gde je: $J(\sigma, a)$ –sila rasta prsline, koja zavisi od udaljenog napona (opterećenja) σ i dužine (veličine) prsline a , dok je J_{Ic} –otpornost materijala na inicijaciju stabilnog rasta prsline. Analiza rasta prsline se u slučaju elastoplastične mehanike loma ne završava primenom izraza (7), već uključuje tok stabilnog rasta prsline Δa i uslov za njen nestabilni rast, odnosno, $J-R$ krivu, koja se pogodnim grafičkim postupkom upoređuje sa CDF, sl. 9. Matematički formulisan uslov za početak nestabilnog rasta prsline glasi:

$$\partial J(\sigma, a) / \partial a \geq \partial J / \partial a \quad (9)$$

odnosno, povećanje CDF mora da bude veće od priraštaja otpornosti materijala pri istom priraštaju dužine prsline Δa . Kada $J(\sigma, a)$ dostigne vrednost J_{Ic} , izraz (8), presek krive CDF sa $J-R$ krivom, počinje zatupljivanje vrha prsline i njen stabilni rast. Ako $\partial J(\sigma, a) / \partial a$ postane veće od $\partial J / \partial a$, u tangenti krive CDF i $J-R$ krive, kada je veličini $a_0 + \Delta a$ kritična, izraz (9), počinje brzi, nestabilni rast prsline.



Slika 9. Postupak za analizu rasta prsline pomoću J integrala

Za primenu dijagrama sa sl. 9. su potrebne dve veličine.

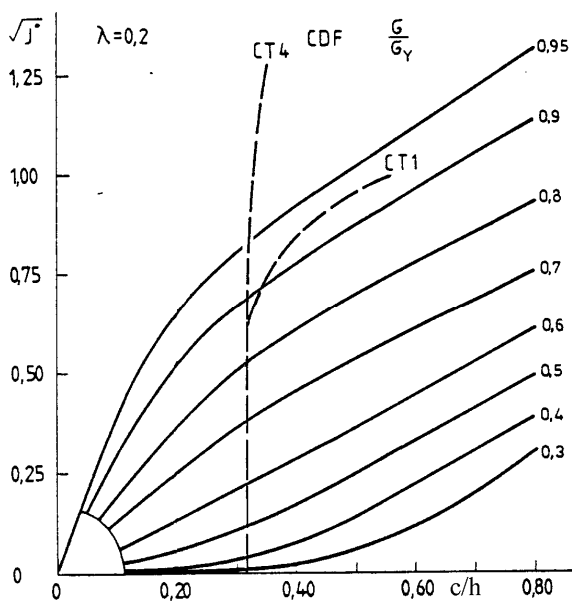
Prva je sila razvoja prsline, predstavljena krivim σ_1 do σ_5 . Ona se jednostavno određuje Ratvani-Erdogan-Irvin (REI) elastoplastičnom modelom tanke ljuske sa podužnom prslinom, /10/, jer daje u bezdimenzionom obliku podatke za proračun za karakteristične veličine, parametra ljuske λ (vidi sl. 3). Mogu se primeniti i drugi modeli, npr. model Kinga, /11/, zasnovan na uprošćenom korišćenju niza opruga koje zamenjuju uticaj preostalog ligamenta.

Druga veličina je kriva otpornosti materijala prema rastu prslina, sa početkom na vrhu postojeće prsline dužine a_0 , koja se određuje standardnim ispitivanjem, /7/.

Procena preostale nosivosti sferne posude pod pritiskom

U sfernom rezervoaru (sl. 3) bilo je potrebno zavariti privremene držače za skele radi montaže, /12/. Kako su u pitanju su privremeni držači, koji se skidaju brušenjem posle montaže, pri zavarivanju nije korišćeno predgrevanje, potrebno za čelik NIOVAL 47. Zbog velikog unosa toplote i povećane brzine hlađenja u spoju posle brušenja držača su otkrivene prsline u ZUT, oblikom spoja usmerene u osnovni metal. Radi analize značaja ovih prslina, snimljene su krive otpornosti osnovnog materijala ispitivanjem CT kompaktnih epruveta za zatezanje (CT1) podužno i (CT4) poprečno u odnosu na pravac valjanja, /12/.

Na sl. 10 su prikazane sile rasta prsline, dobijene REI modelom, i krive otpornosti na rast prsline, u pravcu podužno (CT1) i poprečno (CT4) na pravac valjanja. Vidi se da čak i pri opterećenju nivoa 95% napona tečenja, integritet rezervoara sa nađenom prslinom dužine $a = 57$ mm i dubine $c = 5$ mm (sl. 3) nije ugrožen, jer kritična dubina prsline je ≈ 8 mm, odnosno kriva otpornosti CT1 je ispod krive sile razvoja prsline, odnosa $\sigma/\sigma_y = 0,95$.



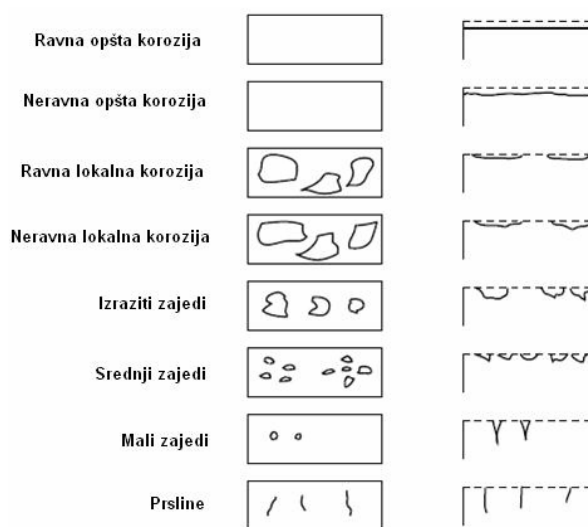
Slika 10. Analiza rasta prsline na sfernom rezervoaru

PRIMENA KRITERIJUMA ZA OCENU INTEGRITETA KONSTRUKCIJA NA KOROZIJSKA OŠTEĆENJA

Koji će od prikazanih kriterijuma biti primenjen i na koji način zavisi od vrste korozije, tipa i veličine oštećenja. Pri tome su za integritet i vek opreme pod pritiskom posebno važni kao pojavnici oblici opšta i lokalna korozija, zajedni i prsline (sl. 11).

Da bi se prišlo postupku ocene integriteta opreme pod pritiskom neophodno je snimiti stanje u pogledu korozije. U kojoj meri će biti otkrivena korozija zavisi od konstrukcije opreme i uslova eksploatacije, kao i od uređaja za ispitivanje, njegove prikladnosti i osetljivosti.

Oštećenje od opšte korozije se po pravilu svodi na lokalno smanjenje debljine zida. Ako se na opremi očekuje pojava opšte korozije, princip je da se vek obezbedi tzv. dodatkom na koroziju, kojim se poveća debljine zida, određena prema kotlovskoj formuli (1) ili prema formuli od nje proširenoj. U ovom slučaju primena probnog ispitivanja pritiskom je opravdana, naročito imajući u vidu da se korozija očekuje kod konstrukcijskih čelika opšte namene i izražene plastičnosti. Što se tiče procene preostalog veka pogodno je utvrditi napredovanje korozije u vremenu (npr. u mm po godini) i na osnovu tog parametra oceniti preostali vek. Po pravilu se ne očekuje značajna koncentracija napona zbog opšte korozije, ali u slučaju da do toga ipak dođe, može se primeniti mehanika loma sa konzervativnim uprošćenjem, kao što je prikazano u primeru posude sa sl. 4.



Slika 11. Pojavnici oblici oštećenja od korozije

Kada korozija izaziva koncentraciju napona (zajedni) ili svojim delovanjem pospešuje rast prsline (korozija u zazoru ili geometrijskom prelazu) može njeno dejstvo da bude vrlo izraženo ako deluje napon, i to je naponska korozija, /13, 14/. Za naponsku koroziju mehanika loma je uvela kao parametar materijala kritični faktor intenziteta napona u agresivnoj sredini K_{Isc} , koji se određuje eksperimentalno u odgovarajućoj agresivnoj sredini. Ako je delujući faktor intenziteta pri naponskoj koroziji K_{sc} manji od kritične veličine K_{Isc} , može se primeniti formula tipa (2), odnosno tipa (3), ako je on veći od K_{Isc} .

RAZVOJ POSTUPAKA ZA PRAĆENJE VEKA OPREME POD PRITISKOM UGROŽENE KOROZIJOM

Intenzivan razvoj cevovoda i njihova masovna upotreba podrazumevaju njihovu pouzdanu i sigurnu eksploataciju. Dužine cevovoda su dostigle više hiljada kilometara kada se transportuje nafta, gas ili voda. Po dužini su poznati naftovodi (Aljaska, više transevropskih) i gasovodi (Rusija, Evropa i Azija). Po dužini su znani i vodovodi (onaj u Libiji je dugačak oko 5000 km). Danas veliki gradovi imaju razgranatu mrežu za razvod grejnog medijuma (para ili voda). Navedimo da je u Beogradu dužina mreže 512 km. Međutim, time se ne završava lista cevovoda. Oni su zastupljeni u termoelektranama, toplanama, procesnoj

industriji i rafinerijama. Nekad cevovodi dominiraju toliko da se stiće utisak da su oni najbitniji u procesu.

Nije potrebno dokazivati da su na tim velikim dužinama cevovoda otkazi neizbežni i da mogu biti katastrofalni, kao kod gasovoda. Posmatrajući samo iz ekonomskog aspekta može se lako utvrditi koliko je značajno da ovakvi sistemi rade bez otkaza i zastoja. Praćenjem stanja sistema pod pritiskom i cevovoda se obezbeđuje pouzdanost i sigurnost, ali se ostvaruju i značajni ekonomski efekti.

Usavršene tehnike ispitivanja bez razaranja

Pre bilo kakve akcije potrebno je znati da li je došlo do oštećenja na opremi pod pritiskom, kod kojih je korozija vrlo značajna. Takođe je važna i kontrola zavarenih spojeva i detekcija prslina, koje u njima nastaju iz različitih razloga. Prikazani sistemi su samo deo savremenih dostignuća.

T-SCAN i P-SCAN tehnika

Tehnika T-SCAN, /14/, se koristi za ručnu ili automatsku kontrolu zavarenog spoja (sl. 12). Za automatsko skeniranje se koriste magnetna kolicica, vođena daljinskim upravljačem po ispitivanoj površini. Skener može imati do 8 UZ sondi. Dobijeni podaci se obrađuju na licu mesta. Za akviziciju podataka koristi se softver, koji omogućava prikaz rezultata na displeju ili na papiru u vidu mape u boji. Istom opremom se snima i P-SCAN projekcija, tehnikom prikazanom na sl. 13, u primeni na sfernom rezervoaru.

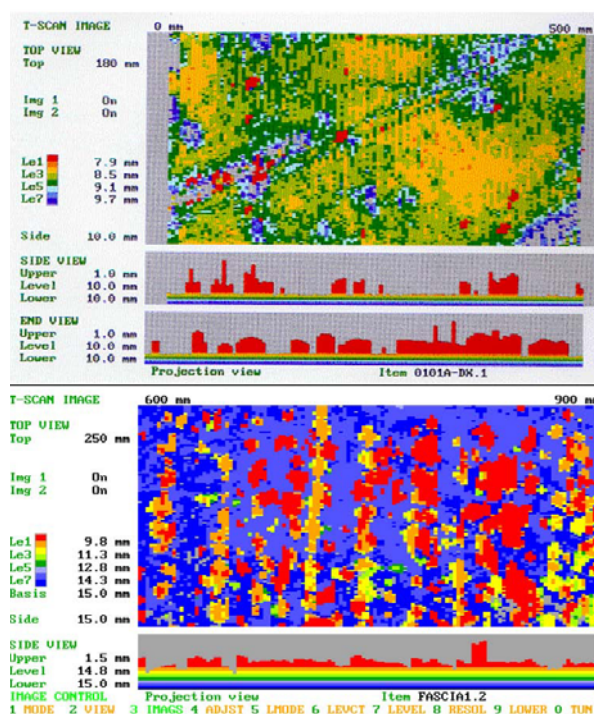


Slika 12. Sistem za ispitivanje T-SCAN tehnikom: skener na kolicima (gore) i sistem za akviziciju podataka (dole)

Dvodimenzionalna slika eha diskontinuiteta sa ispitivane površine se dobija UZ ispitivanjem sa T-prikazom (T-SCAN), a odbijeni impulsi se prikazuju kao događaji. Direktnom sondom se otkrivaju unutrašnje greške ili se dobija mapa korozije, nastale u proizvodnji ili u eksploataciji (npr. zbog vlažnog H₂S). Ova tehnika (sl. 14) daje u različitim bojama gornju i bočnu projekciju za dve nominalne debljine zida: 10 mm i 15 mm.



Slika 13. P-SCAN kontrola zavarenog spoja na sfernom rezervoaru

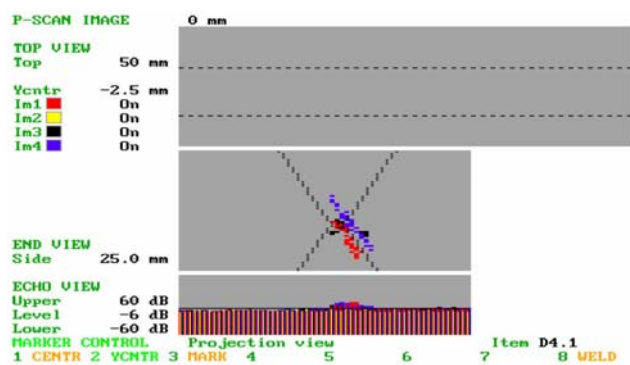


Slika 14. T-SCAN mapa unutrašnje korozije (gore, debljina zida 7,9 mm do 10 mm) i oštećenje dejstvom H₂S – vodonične prsline (dole, najveća dubina 15,0 – 9,8 = 5,2 mm)

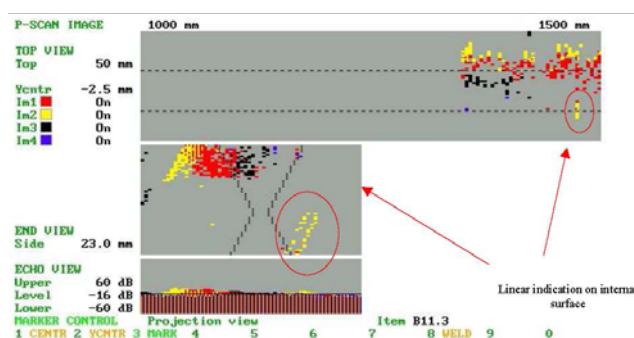
P-SCAN (*Projection Imaging Scanning*) omogućava 3-D prikaz greške projekcijom na bilo koju bočnu stranu objekta (B-SCAN) i predstavlja sliku objekta (koja se vidi odozgo) na ispitnoj površini. Otkrivene greške se prikazuju projekcijama različitih boja, što se vidi na mapi zavarenog spoja sa greškom tipa nespojenog mesta (sl. 15), koje odgovaraju polukoraku, odnosno, punom koraku signala svake sonde. Na sl. 16 je dat snimak po dužini spoja zavarenog spoja sfernog rezervoara, na kome su zaokružene i strelicama označene indikacije tipa prsline.

Sistem vođenih ultrazvučni talasa

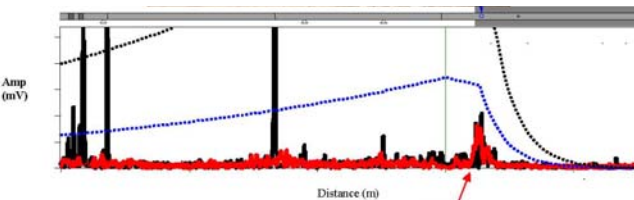
Ovaj sistem je pogodan za otkrivanje korozijskih oštećenja, /14/. Njime se Lambovi UZ talasi vode po dužini cevi, tako da se i više od 100 m cevi može pregledati sa jedne lokacije uz kontrolu nepristupačnih cevi, npr. na ukrštanju sa putem ili ispod izolacije. Uređaj za Lambove UZ talase se pričvršćuje na površinu cevi i šalje torzijske i uzdužne talase duž cevi (sl. 17).



Slika 15. Mapa zavarenog spoja sa greškom tipa nespojenog mesta – P-SCAN tehnika



Slika 16. Greške u zavrenom spoju sfernog rezervoara (P-SCAN). Zaokružene su i strelicom označene linearne indikacije tipa prslina



Slika 17. Primer kontrole ukopanog dela cevovoda sistemom vođenih ultrazvučnih talasa i nađeno korozijsko oštećenje (označeno crvenom bojom)

Sistem otkriva lokacije na kojima je poprečni presek zida cevi stanjen za najmanje 5% na dugim deonicama, kvantitativno i on-lajn. Pogodan je za kontrolu korozije cevi prečnika 50–1200 mm, na osloncima, ispod izolacije, na prelazu tlo–vazduh, za kontrolu ukopanih cevovoda, ukrštanja sa putevima i podvodnih cevi. Vođeni talasi prolaze kroz

prave deonice, kolena, oslonce, T spojeve, ali ne prolaze kroz prirubnice i završne poklopce cevi. Područja primene sistema su:

- idealni uslovi, 80 metara i više,
- cevi stare 30 godina sa malom korozijom, 40 metara,
- prirubnice, kolena ili račve – posebni plan ispitivanja,
- najviše šest kružnih zavarenih spojeva, zavisno od dužine cevi (npr. za cev od 12 metara je to 72 metra)
- cevi stare 30 godina sa opštom korozijom, 20 metara,
- cevi fabrički izolovane, 15 do 20 metara,
- jako korodirale cevi i cevi izolovane bitumenom, 5 metara

Druge savremene metode ispitivanja bez razaranja

Vreme preleta ultrazvuka (*Time-of-flight diffraction – TOFD*) se zasniva na njegovom odbijanju od „čoškova“ i „ivica“, odnosno grešaka komponente. Nepouzdana je za detekciju grešaka, ali može da se meri visina indikacije.

Metoda merenja polja naizmenične struje (*Alternative current field measurement – ACFM*) se koristi za detekciju i merenje potpovršinskih prslina na opremi pod pritiskom, sa osnovnom primenom na zavarene spojeve. Namotajem naizmenične struje, sonda unosi magnetno polje upravno na pravac struje u tanki površinski sloj metala. Greška u materijalu skreće magnetno polje u x i y pravcu i sonda može detektovati grešku i odrediti njenu veličinu.

Gubitak magnetnog fluksa, unetog jakim magnetom u materijal (*Magnetic flux leakage – MFL*) će se pojaviti ako postoji oštećenje, npr. od korozije ili erozije. Senzor između magnetnih polova u tom slučaju daje električni signal srazmeran gubitku fluksa, i ako je on veći od zadatog praga, biće zabeležen. Međutim, metoda je kvalitativna, pa se posle detekcije signala ultrazvukom meri veličina greške. Priključeni kompjuter sa sistemom za akviziciju podataka može brzo da oceni pogodnost za upotrebu poređenjem sa arhiviranim prethodnim rezultatom. Metoda je pogodna za otkrivanje korozije na podnoj strani posude pod pritiskom.

Postupak za ocenu pouzdanosti korodiranog cevovoda

Italijanski institut za zavarivanje (IIS) je razvio sistem za ocenu pouzdanosti cevovoda ugroženih korozijom, /15/, koji se bazira na opisanim savremenim postupcima ispitivanja bez razaranja. S obzirom na veliki broj uticajnih faktora, nije moguće dobiti precizan odgovor na pitanje veka, ali dobrom kombinacijom raspoloživih akcija, pouzdanost je podignuta na visok nivo primenom statističke verovatnoće u skladu sa karakterom problema. Kriterijumi za korišćenje cevovoda do naredne inspekcije moraju da uključe i odgovarajući nivo rizika. Veliki broj ovakvih postupaka se može naći u literaturi, a izbor za određenu namenu zahteva dobro poznavanje sistema i uslova eksploatacije cevovoda.

Sistem IIS zahteva klasifikaciju cevovoda prema vrsti i opasnosti fluida. Standard API 570 raspoređuje cevovode u tri klase različitog nivoa rizika, koji uslovljavaju različit nivo kontrole i inspekcije i primenu različitih postupaka za ocenu integriteta i veka:

- klasa A: jako opasni fluidi, čije procurivanje može dovesti do velike štete po ljude i okolinu (eksplozivnost, visoka zapaljivost i toksičnost);
- klasa B: fluidi srednje opasni, čije procurivanje ne dovodi do ozbiljne štete po ljude i okolinu (srednja toksičnost,

korozivnost, srednji nivo zapaljivosti, para i voda na temperaturi iznad 110°C);

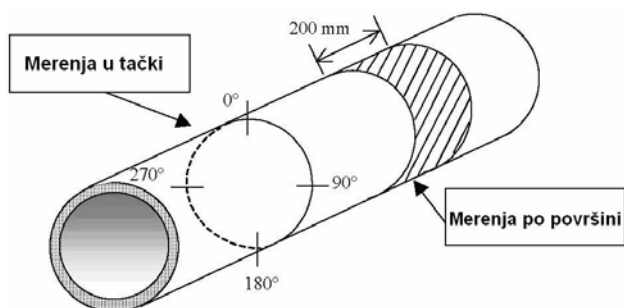
- klasa C: zanemarljivo opasni fluidi (iritirajući proizvodi).

Merenje debljine zida

Ako ne postoji dokumentacija o cevovodu, što je čest slučaj, treba izmeriti debljinu zida. Pri tom se cevovodi vizuelno kontrolišu 100%, a lokalno se debljina zida meri ultrazvukom da bi se kontrolisala korozija. Kritične tačke u pogledu korozije, velikih deformacija i stanja oslonaca se utvrđuju pomoću vođenih ultrazvučnih talasa (sl. 17).

Koriste se tri tehnike za merenje debljine zida (sl. 18):

- lokalno kontaktno ručno merenje debljine ultrazvukom po obimu – merenje u tački (*Punctual Measurement – PM*);
- ručno uzdužno skeniranje ultrazvukom po površini dužine 200 mm radi merenja debljine, na različitim mestima po obimu (*Area Measurement – AM*);
- automatsko merenje T-SCAN metodom radi određivanja minimalne debljine po površinama različite veličine (*T-SCAN Measurement – TM*).



Slika 18. Merenje radi određivanja minimalne debljine zida

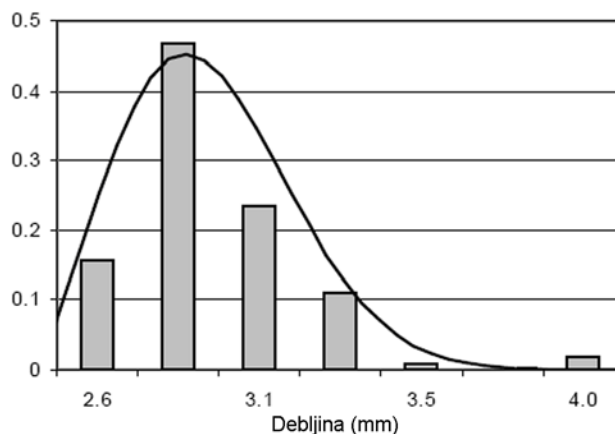
Maksimalna debljina ukazuje na nazivnu debljinu.

Minimalno potrebna debljina, koja ugrožava integritet cevovoda, se određuje bez stepena sigurnosti prema naponu tečenja, na osnovu opterećenja (pritisak, težina, udarno opterećenje oslonaca). Da bi se utvrdilo da li je merodavna debljina veća od minimalno potrebne, u IIS postupku, 1/5, su propisani iskustveni faktori za statističku obradu. Pri tom se ima u vidu da je greška merenja po površini mala, dok greška merenja u tački raste sa porastom debljine zida. Tako je za nazivne prečnike 100 i veće i značajnu koroziju faktor $\gamma = 1$ za debljine do 63% NT (NT–nazivna debljina), $\gamma = 1,13$ za debljine 63% do 86% NT; $\gamma = 1,27$ za 86% NT i veće, a za umerenu koroziju se uzima $\gamma = 1$; $\gamma = 1,07$, odnosno, $\gamma = 1,14$, respektivno.

Statistička obrada u vidu Vajbulove raspodele izmerenih debljina zida cevi 8”×3,96 mm cevovoda data je na sl. 19.

Ocena verovatnoće otkaza

Debljina zida se meri tako da što bolje predstavlja razvoj korozije. Na osnovu statističke raspodele debljine, može se odrediti verovatnoća otkaza, tj. debljine zida manje od minimalno potrebne debljine. Verovatnoća otkaza kao globalna ocena pouzdanosti cevovoda se može iskazati preko sheme na sl. 20 u vidu nivoa rizika I do IV, gde je I najveći rizik, a IV je zanemarljiv rizik.



Slika 19. Vajbulova raspodela debljine zida cevi 8”×3,96 mm

Tabela 1. Nivoi rizika cevovoda

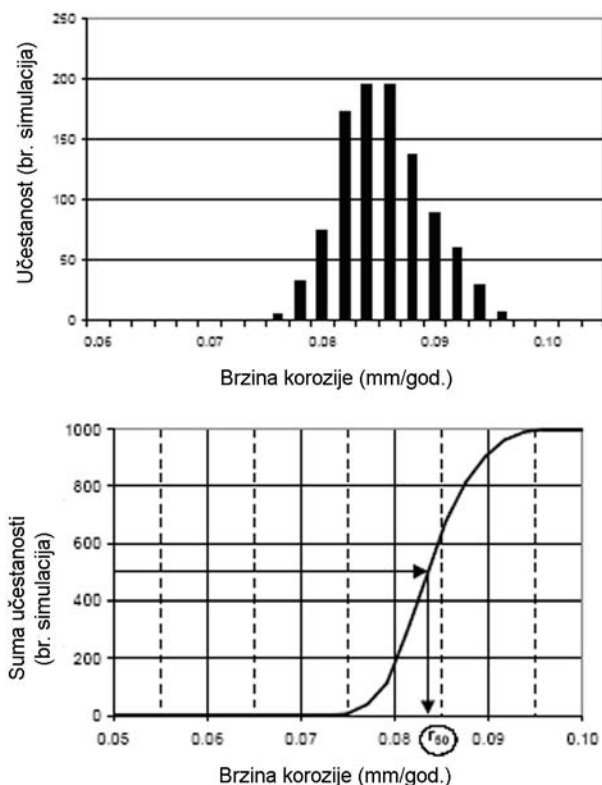
Klasa	Verovatnoća P			
	$P \leq 10^{-6}$	$10^{-6} < P \leq 10^{-4}$	$10^{-4} < P \leq 10^{-3}$	$P > 10^{-3}$
A	III	II	I	I
B	IV	III	II	I
C	IV	IV	III	II

Maksimalna brzina korozije i minimalni preostali vek

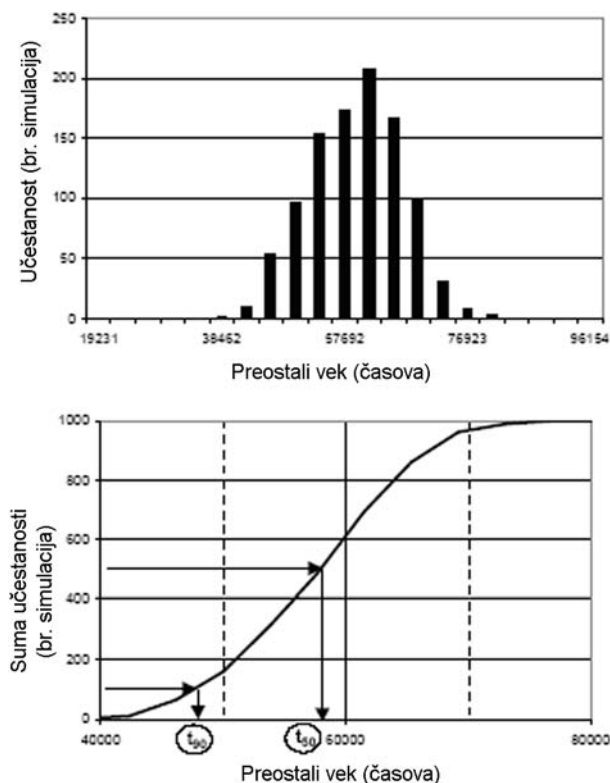
Radi postizanja što dužeg veka, potrebne su redovne inspekcije i popravke u eksploataciji. Intervali inspekcije i obim popravke se određuju na osnovu brzine korozije i ocene preostalog veka kada je oštećenje utvrđeno. Debljina zida zavisi od tolerancije izrade i tokom eksploatacije se menja, a tačnost izmerene debljine zavisi od osetljivosti merne opreme, pa su u pitanju slučajne statističke veličine normalne distribucije sa odgovarajućom srednjom vrednosti i standardnom devijacijom. Propisan period eksploatacije i minimalna debljina, određena na opisan način su determinističke veličine. Zbog toga je na osnovu metode Monte Karlo, IIS postupak uveo analizu simulacijom.

Za svaku simulaciju se koriste rezultati kontrole, i to vrednosti preostalih i nazivnih debljina uzete iz statističke raspodele, a veličine brzine korozije i preostalog veka određene prikladnim proračunom. Na kraju simulacije zapisane su maksimalna vrednost brzine korozije CR_{max} i minimalna vrednost preostalog veka RL_{min} , kao i položaj gde su te vrednosti određene. Tako je dobijen niz mogućih vrednosti CR_{max} i RL_{min} . Prednost ovakvog postupka je da se koriste samo stvarne vrednosti promenljivih.

Rezultati izvedene analize maksimalne brzine korozije i minimalnog preostalog veka se daju u vidu frekventnog dijagrama i kumulativne raspodele. Kao ilustracija su, za cevovod 8”×3,96 mm, ti rezultati dati na sl. 20 i 21. Brzina korozije je iskazana preko srednje vrednosti, a za preostali vek su izabrani različiti nivoi poverenja, zavisno od nivoa rizika cevovoda. Za rizik nivoa I, preostali vek odgovara nivou poverenja 90% (t_{90}), za nivo II – 70%, za nivo III – srednjoj vrednosti – 50% i za nivo IV ili 50%, ili usvojenoj većoj vrednosti prema trasi cevovoda. Cevovod za koji se utvrdi velika verovatnoća otkaza, tako da mora da se zameni, proračun preostalog veka daje vreme posle kojeg to treba uraditi.



Slika 20. Brzina korozije – histogram učestanosti (gore) i kumulativna raspodela (dole)



Slika 21. Preostali vek korodiranog cevovoda – histogram učestanosti (gore) i kumulativna raspodela (dole)

ZAKLJUČAK

Korozija je često uzrok oštećenja postrojenja u toplanama i termoelektranama i zbog toga se praćenju korozije i prevenciji otkaza posvećuje velika pažnja. S obzirom na vremensku zavisnost razvoja korozije, neophodno je uvek pratiti stanje i preduzimati odgovarajuće mere. Tome doprinose i savremeni uređaji za ispitivanje bez razaranja. Druga strana problema je ocena integriteta i preostalog veka. Razvoj mehanike loma, numeričke i statističke analize je omogućio da se trenutno stanje oceni i predvide akcije za postizanje očekivanog veka.

LITERATURA

1. Baker, R.G., The welding of pressure vessel steels, Climax Molybdenum Co, London, 1970.
2. King, R.T., *Failures of pressure vessels*, in Metals Handbook, Ninth Edition, Volume 11, Failure Analysis and Prevention, ASM, Metals Park, Ohio, 1986.
3. Filipović, N., Gerić, K., Sedmak, S., *Uticao uslova opterećenja na tip loma zavarenog tankozidnog rezervoara (Loading condition effect on welded thin-walled storage tank type fracture)*, Integritet i vek konstrukcija (Structural Integrity and Life), Vol. 7, 1–2007, str. 21–28.
4. Hrivnak, I., *Reparaturno zavarivanje velikih sfernih rezervoara*, u monografiji Eksploatacijske prslina u posudama pod pritiskom i rezervoarima, ured. S. Sedmak, A. Sedmak, TMF – GOŠA, Beograd, 1994, str. 328.
5. Gerić, K., *Prslina u zavarenim spojevima*, FTN Izdavaštvo, Novi Sad, 2005.
6. Reed, R.P., et al: *Fitness-for-Service Criteria for Pipeline Girth-Weld Quality*, Final Report to the U.S. DOT, NBS, Boulder, USA, 1983.
7. SINTAP – Structural Integrity Assessment Procedures for European Industry; Final Report, July 1999, Report No. BE95-1426/FR/7.
8. Sedmak, A., *Primena mehanike loma na integritet konstrukcija*, Mašinski fakultet, Beograd, 2003.
9. Hertzberg, R.W., *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*, John Wiley & Sons, New York, 1996.
10. Ratvani, M.M., *Primena principa COD na projektovanje sudova pod pritiskom i cevovoda*, I Međunarodna letnja škola mehanike loma, S. Palanka, ured. S. Sedmak, Institut GOŠA–TMF, 1980, str. 87.
11. King, R.B., *Elastic-plastic analysis of surface flaws using a simplified line-spring model*, Eng. Fracture Mech. 18, 1983, pp. 217–231.
12. Sedmak, S., Petrovski, B., Sedmak, A., Lukačević, Z., *The study of crack significance in spherical storage tanks by J resistance curve*, Internat. Conf. on Weld Failures, London, TWI, 1988.
13. Dražić, D.M., Jegdić, B.V., *Naponska korozija*, Integritet i vek konstrukcija (Structural Integrity and Life), Vol. 7, 2–2007, str. 91–96.
14. Dražić, D.M., Jegdić, B.V., IFMASS 8
15. Bresciani, F., Pinca, S., Servetto, Ch., *Advances NDE Techniques and Reliability Engineering Assessments for Piping and Storage Tanks in Refineries and Petrochemical Plants*, 3rd MENDT– Middle East Non-destructive Testing Conference & Exhibition, 27–30 Nov 2005, Bahrain, Manama.
16. *Appraisal and development of pipeline defect assessment methodologies*, MSL Engineering Limited, Minerals Management Service, 2000.