

ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA VRELOVODNOG KOTLA KAO PODLOGA ZA OCENU NJEGOVOG INTEGRITETA

ANALYSIS OF TEST RESULTS OF HOT-WATER BOILER AS A BASIS FOR ITS INTEGRITY ASSESSMENT

Originalni naučni rad / Original scientific paper
UDK /UDC: 620.169.1:697.326
Rad primljen / Paper received:

Adresa autora / Author's address:
¹) Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu,
vsijacki@mas.bg.ac.yu
²) Tehnički fakultet Univerziteta u Kragujevcu

Ključne reči

- vrelovodni kotao
- ispitivanja bez razaranja
- ispitivanja sa razaranjem
- procena integriteta
- korektivno-preventivne mere

Izvod

Procena eksploatacijske raspoloživosti i integriteta materijala termoelektrične opreme zahteva primenu metodološkog pristupa koji obuhvata prikupljanje i analizu podataka iz eksploatacije, definisanje programa ispitivanja stanja materijala metodama bez razaranja i razaranjem, i propisivanje kriterijuma prihvatljivosti. Na osnovu podataka iz eksploatacije kotlovske postrojenja, rezultata ranijih ispitivanja, kao i na osnovu poređenja novih rezultata ispitivanja sa kriterijumima prihvatljivosti izvršena je procena integriteta vrelovodnog kotla u toplani „Mirijevo“ u sastavu JKP „Beogradske elektrane“. Nakon procene integriteta ugroženih delova cevne sistema kotla definisan je predlog o parcijalnoj zameni ekranskih cevi, kao i niz preporuka za eksploataciju radi prevencije otkaza ekranskih cevi.

UVOD

Moderni pristupi u upravljanju radnim vekom kotlovske postrojenja, generalno, zasnovani su na obezbeđenju:

- eksploatacije postrojenja na što je moguće višim parametrima, povećanoj efikasnosti i sigurnosti;
- planske zamene delova u tehnički i ekonomski opravdanom trenutku, koja je zasnovana na pažljivo razrađenoj strategiji održavanja;
- produžetka radnog veka postrojenja.

Metodološki pristup, koji je sastavni deo upravljanja radnim vekom ovog tipa postrojenja, a koji omogućava dobijanje neophodnih podataka za procenu preostalog veka i integriteta postrojenja i njegovih vitalnih komponenata obuhvata:

- dijagnostiku oštećenja strukturnih elemenata u termoelektranama primenom različitih metoda ispitivanja bez i sa razaranjem;
- formiranje baze podataka i formiranje dosijea postrojenja u cilju korišćenja softvera za proračun veka do loma,
- definisanje programa kontrole postrojenja čiji će rezultati merenja nakon analize da budu sastavni deo baze podataka.

U cilju formiranja baze podataka neophodno je izvršiti dijagnostiku oštećenja vitalnih elemenata postrojenja, i to

Keywords

- hot-water boiler
- non-destructive tests
- destructive tests
- integrity assessment
- corrective and preventive measures

Abstract

Assessment of service availability and integrity of power plant component materials requires the use of methodological approach, that includes service history data acquisition and analysis; defining a programme for material state non-destructive and destructive testing; and formulating acceptance criteria. Data based on boiler service history and on previous test results, comparing the new results to adopted acceptance criteria served as a basis for integrity assessment of hot-water boiler at plant “Mirijevo”, belonging to JKP “Beogradske elektrane”. Following the integrity assessment of critical boiler piping system parts, a proposal is defined for partial replacement of boiler wall tubes and a sequence of service recommendations how to prevent appearance of wall tubing damage is also given.

po tipovima oštećenja, njihovim lokacijama, pratećim efektima, kao i mogućim uzrocima oštećenja. Ovakvi podaci ne predstavljaju samo dragocen ulazni podatak pri planiranju održavanja kotlovske postrojenja tokom rada i zastoja, već obezbeđuju i mogućnost upravljanja greškama čije se prisustvo odražava na radni vek postrojenja.

Analiza prikupljenih podataka, uključujući i one iz istorije eksploatacije, i rezultata ispitivanja omogućava izdvajanje kritičnih komponenata postrojenja i utvrđivanje glavnih mehanizama i uzročnika njihovog oštećivanja, /1–3/. U narednom koraku, kroz naučni i ekspertski pristup, moguće je proceniti preostali radni vek vitalnih komponenata postrojenja i integritet postrojenja primenom različitih metoda. Tek na osnovu tako dobijenih podataka moguće je doneti odluke o aktivnosti koje treba sprovesti da bi postrojenje moglo da nastavi sa daljom eksploatacijom, a koje se odnose na predviđanje narednog perioda kontrole, popravke, i neophodnost zamene, odmah ili nakon tačno određenog perioda.

Cilj ovoga rada je procena integriteta jednog vrelovodnog kotla po navedenoj metodologiji, na osnovu rezultata ispitivanja metodama bez razaranja i razaranjem. Procena

integriteta cevnog sistema kotla sprovedena prema predloženoj metodologiji je omogućila definisanje, /4/:

- trenutnih kritičnih zona cevnog sistema kotla (sa aspekta eksploatacije, stanja materijala, naslaga, stepena i brzine korozivnog ataka), kao i potencijalno kritičnih zona koje su predviđene za praćenje;
- stepena degradacije materijala, zaprljanosti i korozivnog ataka cevnog sistema kotla;
- mogućnosti dalje pouzdane eksploatacije komponenata cevnog sistema i njenih zona;
- delova cevnog sistema predviđenih za zamenu;
- programa praćenja stanja i ispitivanja kritičnih delova cevnog sistema koji nisu za zamenu;
- kratkoročnih i dugoročnih zadataka i mera održavanja;
- preporuka vezanih za vođenje postrojenja, planiranje zahvata i sprovođenje remonta.

OSNOVNI PODACI O KOTLU VK1 U TO „MIRIJEVO“

U toplani „Mirijevo“, u sastavu JKP „Beogradske elektrane“, nalazi se vrelovodni samostojeći membranski kotao VK1 od 58 MW. Proizvođač kotla je Minel kotlogradnja, RO „Fabrika kotlova“ – Beograd. Kotao je izgrađen 1987. godine, a pušten u pogon u januaru 1989. Kotao VK1 radi sa natpritiskom u gasnom traktu, sa prinudnom cirkulacijom i konstantnim protokom vode. Ložište je ekranisano i zaptiveno, a predviđeno je da se kao gorivo koristi gas ili mazut, te je stoga ugrađen kombinovani gorionik na gas i mazut.

Osnovni tehnički podaci o kotlu dati su u tab. 1.

Tabela 1. Tehnički podaci o kotlu VK1, TO „Mirijevo“, /5/

| | |
|------------------------------|------------------------------|
| Maksimalna trajna produkcija | $Q_{max} = 58 \text{ MW}$ |
| Radni pritisak | $P_{rad} = 17,5 \text{ bar}$ |
| Ispitni pritisak | $P_{isp} = 25 \text{ bar}$ |
| Temperatura ulazne vode | $t_u = 130^\circ\text{C}$ |
| Temperatura izlazne vode | $t_i = 180^\circ\text{C}$ |
| Zagrevna površina | 1893 m ² |
| Dužina ložišta | 5100 mm |
| Širina ložišta | 4125 mm |
| Visina ložišta | 9500 mm |
| Zapremina ložišta | 22,5 m ³ |

Prvi eksploatacijski problemi javljaju se u vidu curenja pojedinih ekranskih cevi ($\varnothing 57 \times 4$, čelik Č1214.1), zbog čega su nakon deset godina rada zamenjeni delovi cevnog sistema u ložištu. Međutim, time eksploatacijski problemi nisu otklonjeni, a učestalost curenja se povećala, posebno na cevima u zoni levog i zadnjeg zida ložišta, /5/.

Eksploatacijska istorija kotlovskog postrojenja ukazuje da je kritična komponenta cevnog sistema kotla ekranski isparivač, koji je zbog učestalih pucanja i otkaza, u znatnoj meri ugrozio eksploatacijsku pouzdanost postrojenja.

PROGRAM ISPITIVANJA CEVNOG SISTEMA KOTLA

Prvi korak u proceni integriteta ovog kotlovskog postrojenja je bilo definisanje Programa ispitivanja na osnovu vizuelnog pregleda ekranskih cevi vrelovodnog kotla VK1 i analize podataka iz eksploatacije, koji je obuhvatio ispitivanja metodama bez razaranja ekranskih cevi u kotlu i ispitivanja razaranjem uzoraka isečenih sa odabranih cevi, /5/.

Ispitivanja ekranskih cevi metodama bez razaranja su obuhvatila standardne postupke:

- vizuelnu kontrolu;
- merenje debljine zida cevi na kritičnim ekranskim cevima kotla u odgovarajućim zonama iz kojih nisu uzeti uzorci;
- merenje tvrdoće metala na odabranim ekranskim cevima;
- detekciju korozivskih oštećenja i taloga uređajem EMF3-MFI;
- penetrantsku kontrolu zona i cevi koje su se, na osnovu podataka iz eksploatacije i obavljenog mapiranja, pokazale kao kritične i sklone oštećivanju.

Tačna pozicija ekranskih cevi, predviđenih za isecanje i ispitivanje razaranjem, definisana je nakon detaljne vizuelne kontrole u kotlu i mapiranja repariranih zona. Na isečenim uzorcima cevi su obavljena standardna ispitivanja: vizuelna kontrola sa makro snimanjem, dimenziona kontrola, ispitivanje tvrdoće i zateznih karakteristika, analiza hemijskog sastava i mikrostrukturna ispitivanja.

ISPITIVANJA METODAMA BEZ RAZARANJA EKRANSKIH CEVI KOTLA

Vizuelna kontrola

Vizuelna kontrola dostupnih zona ekranskih cevi je obavljena na licu mesta i sastojala se u:

- sagledavanju stanja spoljnjih površina ekranskih cevi u prednjem, zadnjem, desnom i levom zidu i podu;
- mapiranju lokacija po visini i strani kotla cevi/deonica cevi ekrana koje su zamenjene ili reparirane, sl. 1;
- proveru geometrije panela.

Na spoljnjim površinama cevi u prednjem, zadnjem i desnom bočnom zidu uočena je ravnomerna korozija bez debljih naslaga. Prisustvo kondenzacije i ovlaženih zona sa tragovima curenja utvrđeno je na više mesta, uglavnom ispod repariranih oblasti. Uočene su i deformacije pojedinih cevi u vidu ispupčenja ka ložištu kotla i to u tri zone, sl. 2.

Debljina zida cevi

Merenje debljine zida ekranskih cevi je obavljeno u 5 zona: prednjem, zadnjem, levom i desnom zidu i u podu.

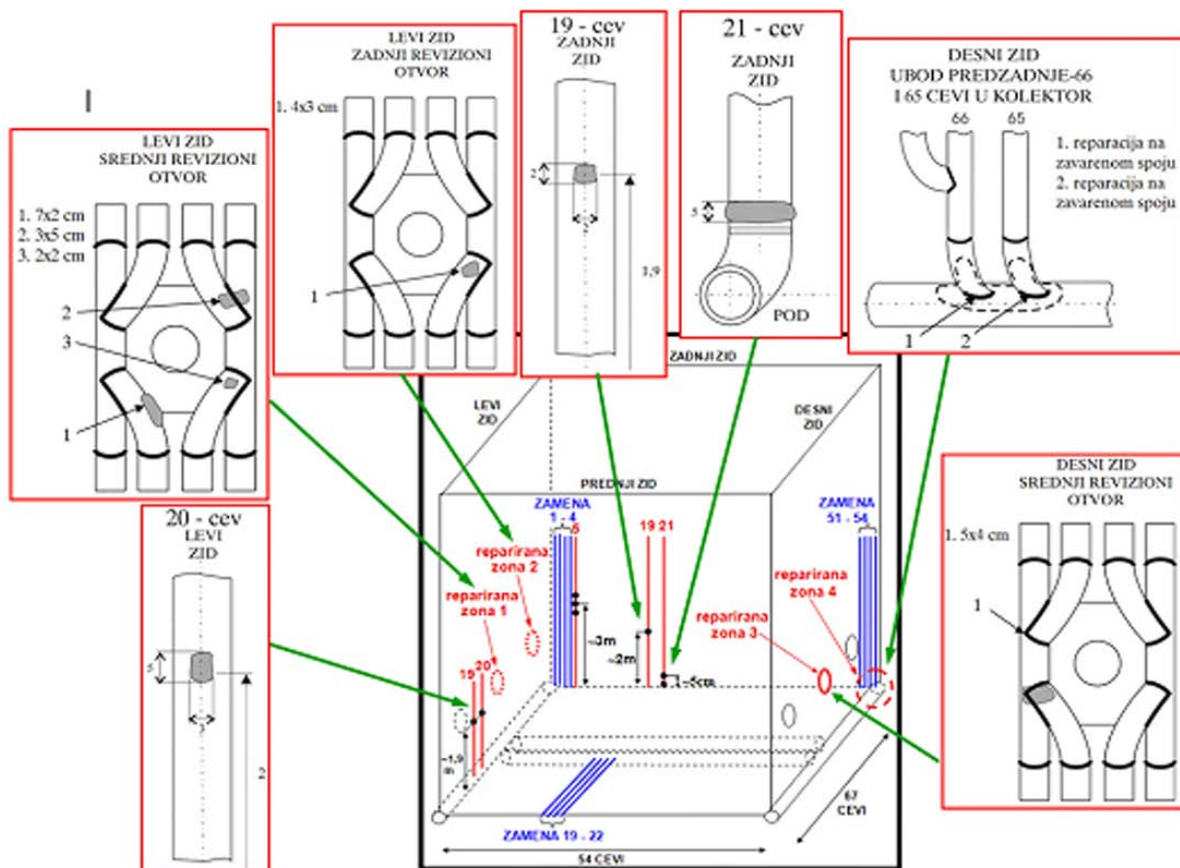
U skladu sa analizom pozicija reparacija i zamena ekranskih cevi, ispitivanje debljine zida je obavljeno na kritičnim cevima na tri merna mesta po cevi. Izmerene vrednosti debljine zida cevi su u opsegu 3,3–4,0 mm, a na cevima zadnjeg, desnog i levog zida i poda nađeno je stanjenje debljine zida u odnosu na nominalnu vrednost za 10% i više.

Tvrdoća materijala

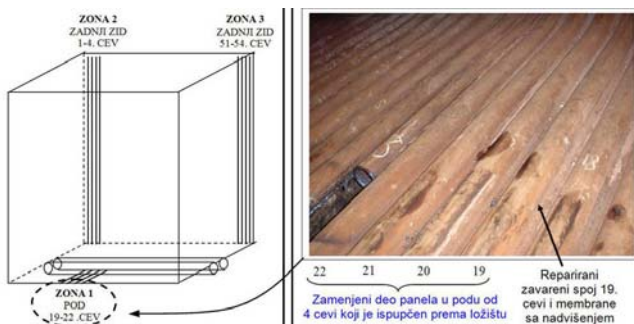
Tvrdoća materijala ekranskih cevi je merena na svim zidovima i u podu, na tri merna mesta na svakoj kritičnoj cevi, tab. 2. Prikazani podaci pokazuju da postoje cevi kod kojih je izmerena tvrdoća niža od standardne minimalno propisane vrednosti, posebno na levom i desnom zidu.

Detekcija korozivskih oštećenja i taloga uređajem EMF3-MI

Uređaj EMF3-MI, razvijen i sertifikovan na Mašinskom fakultetu u Beogradu, uspešno je primenjen na cevnom sistemu kotlova domaćih termoenergetskih postrojenja (TE Kostolac i TE-TO Zrenjanin) za otkrivanje korozivskih oštećenja i naslaga različitog stepena sa unutrašnje strane cevi bez njenog isecanja. Ovim uređajem se na brz i jednostavan način, bez razaranja, ispita velika oblast cevnog sistema bez posebne pripreme spoljnjih površina, /6/.



Slika 1. Pozicije zamenjenih i šematski prikaz repariranih ekranskih cevi. /5/



Slika 2. Zone deformacije ekranskih cevi

Tabela 2. Rezultati merenja tvrdoće na licu mesta

| Zona I – prednji zid | | |
|---|----------------------|---------------|
| Broj cevi | Lokacija | Tvrdoća, HBS |
| 4, 27, 51 | 1,5 m od poda | 119, 124, 145 |
| Zona II – zadnji zid | | |
| 19 | u blizini reparacije | 129-144 |
| 21, 31 50, 53 | 1,7 m od poda | 129-145 |
| Zona III – levi zid | | |
| 20, 34, 45, 63 | 1,7 m od poda | 115-160 |
| Zona IV – desni zid | | |
| 20, 35 | 1,5 m od poda | 117-131 |
| Zona V – pod | | |
| 10, 18, 20, 25 | kolektor | 119 -160 |
| Minimalno preporučena vrednost tvrdoće, HBS (Č1214) | | 120 |

Ispitivanje pomoću ovog uređaja je obavljeno na ukupno 34 cevi u svih pet zona. Cevi u zadnjem, prednjem, levom i

desnom zidu su ispitane na visini ~1,5 m od poda ložišta (zona gorionika), a cevi u podu ložišta na sredini između prednjeg zida i kolektora, odnosno, na sredini između zadnjeg zida i kolektora. Dobijeni rezultati su pokazali da je skoro dve trećine od ispitanih cevi zahvaćeno jakim korozivskim atakom i vidu izdvojenih naslaga i kratera, a da su sa aspekta korozije najugroženiji zadnji zid ložišta i pod.

Penetrantska kontrola

Kontrola penetrantima je obavljena na svim do sada repariranim ekranskim cevima i zonama. Takođe, izvršeno je i ispitivanje cevni lukova u blizini zadnjeg i levog zida, na desnom i levom zidu u blizini revizionog otvora, kao i na 32 cevi u zoni tragova curenja. Ovim ispitivanjima ekranskih cevi nisu otkrivene nedozvoljene greške.

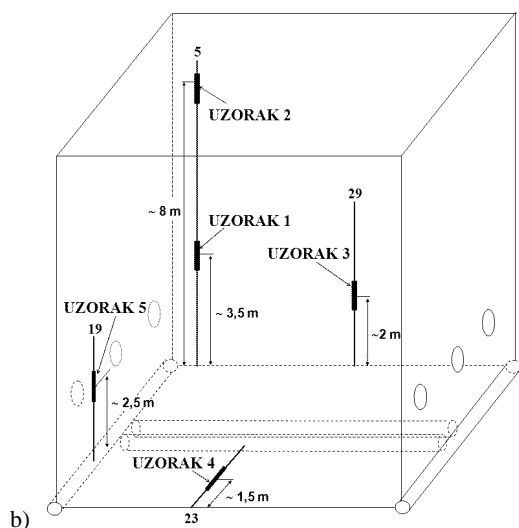
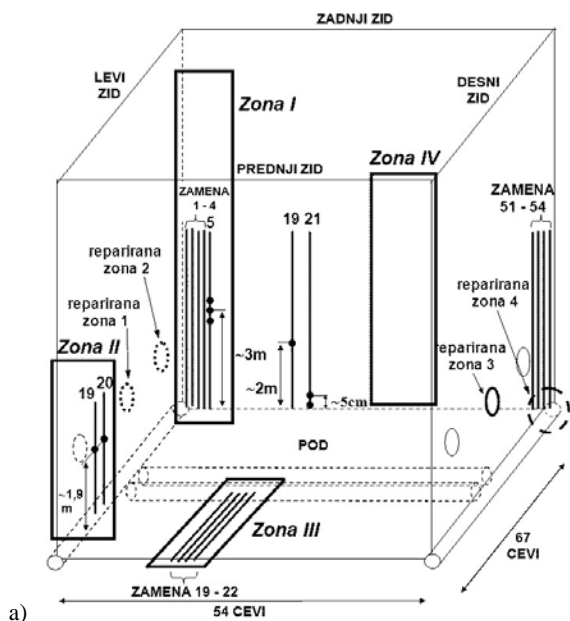
REZULTATI ISPITIVANJA UZORAKA CEVI

Na osnovu podataka iz eksploatacije ekranskog isparivača, vizuelne kontrole *in situ* i ispitivanja pomoću uređaja EMF3-MI, definisane su kritične zone i lokacije iz kojih su isečeni cevni uzorci za ispitivanje razaranjem, sl. 3a, b.

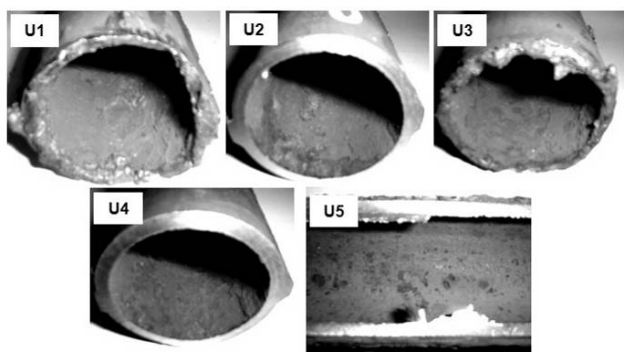
Vizuelna kontrola

Na unutrašnjoj površini strane cevi okrenute ka ložištu, kod svih pet uzoraka, uočene su višeslojne, po debljini neravnomerne (do 3 mm) rastresite naslage crvenkasto-smeđe boje (hematit), ispod kojih postoji snažan korozivski atak u vidu kratera različite dubine, sl. 4.

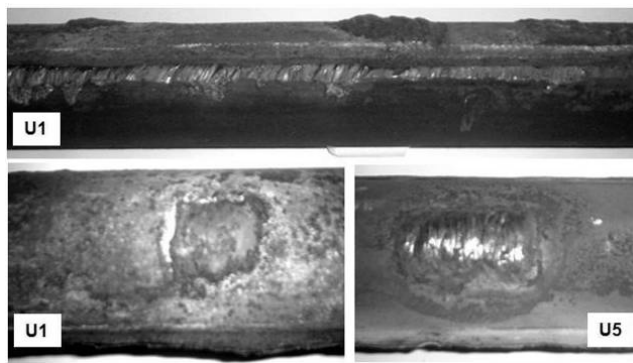
Cevni uzorci 1 i 5 sadrže i oblasti (~30×40 mm) koje su reparaturno zavarene, sl. 5. Sve reparirane zone karakteriše greška zavarivanja tipa nadvišenja visine do 35 mm.



Slika 3. Pozicije: (a) „kritičnih“ zona i (b) lokacije uzorkovanja cevni uzoraka



Slika 4. Unutrašnja površina strane okrenute ka ložištu uzoraka cevi



Slika 5. Izgled repariranih oblasti za nadvišenjem

Debljina zida cevi

Merenje debljine zida ekranskih cevi je obavljeno na pet mernih mesta na strani cevi okrenutoj direktnom dejstvu dimnih gasova (plamena strana). Kod četiri uzorka stanje zida cevi je veće od 10% (U1–3,59 mm; U3–3,54 mm; U4–3,5 mm i U5–3,52 mm), što takođe ukazuje na jak korozijski atak na unutrašnjoj površini ekranskih cevi kotla.

Hemijska analiza

Hemijski sastav uzoraka cevi je određen kvantometarskim postupkom sa spoljnje i sa unutrašnje strane. Rezultati ispitivanja hemijskog sastava standardnom propisanog sadržaja hemijskih elemenata čelika Č1214 dati su u tab. 3.

Iako svi ispitani uzorci imaju zadovoljavajući hemijski sastav prema standardu, indikativna je ne samo razlika u sadržaju ugljenika sa spoljnje i unutrašnje strane istog uzorka, već i nizak sadržaj ugljenika kod četiri od pet uzoraka. Iako standard ne definiše za čelik Č1214 donju granicu sadržaja ugljenika, prema opštim napomenama u standardu, može da se usvoji da ona ne treba da bude manja od 0,10% C, pa može da se zaključi da je sadržaj ugljenika kod uzorka 1–3 i 5 nizak, osetno niži od standardne vrednosti (≤ 0,17). Ovako nizak sadržaj ugljenika može da potiče od:

- fabrikacije, što znači da je polazni materijal bio nezadovoljavajućeg kvaliteta, ili
- uslova eksploatacije pri kojima je moglo da dođe do razugljeničenja površinskih slojeva (i sa spoljnje i sa unutrašnje strane).

Međutim, na osnovu rezultata ostalih ispitivanja jasno je da su bile ugrađene cevi sa ovako niskim sadržajem ugljenika.

Tabela 3. Hemijski sastav uzoraka cevi

| Uzorak | Sadržaj legirajućih elemenata, % | | | | | | |
|-----------|----------------------------------|-----------|-------|------|-------|-----------|--------------|
| | C | Si | Mn | Cr | Ni | P | S |
| U1s | 0,079 | 0,238 | 0,490 | 0,10 | 0,09 | 0,026 | 0,024 |
| U1u | 0,069 | 0,211 | 0,493 | 0,10 | 0,089 | 0,028 | 0,030 |
| U2s | 0,073 | 0,221 | 0,485 | 0,10 | 0,063 | 0,028 | 0,03 |
| U2u | 0,082 | 0,218 | 0,498 | 0,10 | 0,087 | 0,01 | 0,022 |
| U3s | 0,088 | 0,22 | 0,486 | 0,10 | 0,094 | 0,018 | 0,026 |
| U3u | 0,082 | 0,216 | 0,489 | 0,10 | 0,088 | 0,018 | 0,020 |
| U4s | 0,13 | 0,281 | 0,443 | - | - | 0,018 | 0,015 |
| U4u | 0,151 | 0,280 | 0,447 | - | - | 0,018 | 0,017 |
| U5s | 0,066 | 0,261 | 0,432 | - | 0,102 | 0,018 | 0,033 |
| U5u | 0,072 | 0,261 | 0,43 | - | 0,105 | 0,021 | 0,030 |
| St. Č1214 | <0,17 | 0,10-0,35 | >0,45 | - | - | max 0,050 | max 0,050 |

Mehanička svojstva materijala

Od mehaničkih svojstava uzoraka cevi ispitana je tvrdoća po Brinelu i određena zatezna svojstva materijala. Tvrdoća je merena po spoljnoj površini strane cevi okrenute ka ložištu duž izvodnice, kao i na poprečnom preseku prsteno-va pripremljenih za metalografska ispitivanja.

Rezultati merenja tvrdoće i standardom propisane vrednosti za čelik Č1214.1 prikazani su u tab. 4.

Tabela 4. Rezultati ispitivanja tvrdoće uzoraka cevi

| Tvrdoća, HBS | | | | | |
|---------------------------------------|-----------|------------|------------|------------|------------|
| Merno mesto | Uzorak 1 | Uzorak 2 | Uzorak 3 | Uzorak 4 | Uzorak 5 |
| Spoljna površina | | | | | |
| 1 | 72 | 131 | 118 | 119 | 102 |
| 2 | 80 | 130 | 120 | 124 | 95 |
| 3 | 52 | 129 | 121 | 122 | 89 |
| 4 | 48 | 131 | 119 | 120 | 112 |
| 5 | 63 | 131 | 119 | 122 | 107 |
| Poprečni presek | | | | | |
| 1 | 48 | 115 | 107 | 113 | 78 |
| 2 | 51 | 115 | 111 | 119 | 75 |
| 3 | 49 | 117 | 109 | 116 | 85 |
| 4 | 54 | 118 | 109 | 114 | 83 |
| Opseg tvrdoće Č1214/1: 120–154 | | | | | |

Epruvete za ispitivanje zateznih svojstava su isečene iz svih pet uzoraka, i to sa strane cevi okrenute ka ložištu, dok su kod uzorka 1 radi poređenja uzeti i uzorci sa strane cevi okrenute ka ozidu kotla. Rezultati ispitivanja zateznih svojstava svih pet uzoraka i sa standardom propisane vrednosti za Č1214.1 su prikazani u tab. 5.

Rezultati izmerenih tvrdoća, tab. 4, pokazuju da je kod svih 5 ispitanih uzoraka cevi u poprečnom preseku (indikativni pokazatelji) ova karakteristika materijala nezadovoljavajuća i da su vrednosti kod uzoraka cevi 1 i 5 ekstremno male. Naime, u tab. 4 navedene su, radi poređenja, i vrednosti tvrdoće materijala cevi Č1214/1 koje su propisane standardom – razlike izmerenih i propisanih vrednosti su uočljive, a odstupanje, za pojedine vrednosti više od 60% u odnosu na donju graničnu vrednost je neprihvatljivo po bilo kom dopuštenom odstupanju. Praktično sve izmerene vrednosti tvrdoća (i po spoljnoj površini strane cevi okrenute ka ložištu i po poprečnom preseku) su ili na nivou propisane donje granične vrednosti standardnog intervala ili značajno niže od tog nivoa.

Tabela 5. Rezultati ispitivanja zateznih karakteristika uzoraka

| Uzorak | Zatezne karakteristike | | |
|---------|-------------------------------|---------------------------|--------------------|
| | Napon tečenja | Zatezna čvrstoća | Izduženje pri lomu |
| | $R_{0,2}$, N/mm ² | R_m , N/mm ² | A_5 % |
| U1 – 1 | 74 | 123 | 11 |
| U1 – 2 | 170 | 311 | 26,9 |
| U2 – 1 | 162 | 299 | 23,63 |
| U3 – 1 | 175 | 306 | 26,13 |
| U4 – 1 | 211 | 323 | 26,67 |
| U5 – 1 | 116 | 194 | 9,3 |
| Č1214.1 | 235 | 340–440 | min 25 |

Karakteristike čvrstoće ($R_{0,2}$, R_m) svih ispitivanih uzoraka su niže ili ekstremno niže od minimalnih standardom propisanih vrednosti. Ove karakteristike su u potpunoj

saglasnosti sa rezultatima merenja tvrdoće na poprečnom preseku svih uzoraka cevi. Svojstva deformacije (A_5) su kod uzoraka cevi 1 i 5 nedozvoljeno niska u odnosu na standardom propisanu minimalnu vrednost, kod uzorka cevi 2 su nešto niža od standardom propisanih, a kod uzoraka cevi 3 i 4 su na minimalno dozvoljenoj granici.

Mehaničke karakteristike, određene na svim uzorcima cevi su neprihvatljive kao karakteristike koje treba da ima materijal Č1214 u datim uslovima eksploatacije, što znači da materijal cevi nema zadovoljavajuće karakteristike po ovom kriterijumu za pouzdanu eksploataciju.

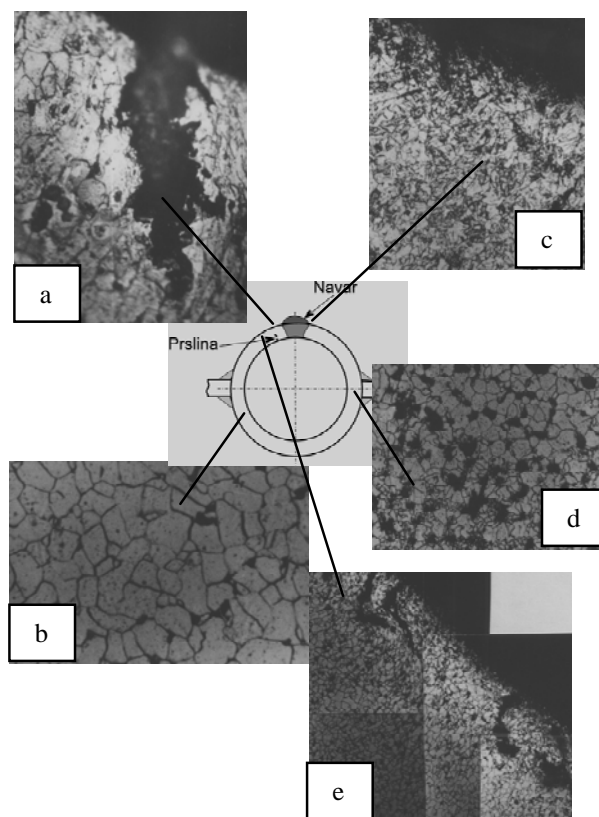
Mikrostrukturna ispitivanja

Mikrostrukturna ispitivanja svih pet uzorka su izvedena na metalografskim uzorcima isečenim u vidu prstena iz reprezentativnih oblasti i pripremljenih na standardan način.

Kod uzorka 1 (zadnji zid, 5. cev, kota ~3,5 m od poda) prsten je isečen iz cevi tako da je obuhvaćena i zona reparacije, što je šematski prikazano na sl. 6.

Sa prikazanih mikrofotografija, sl. 6(a–e), koje odražavaju mikrostrukturu ispitivanog uzorka, utvrđeno je da je:

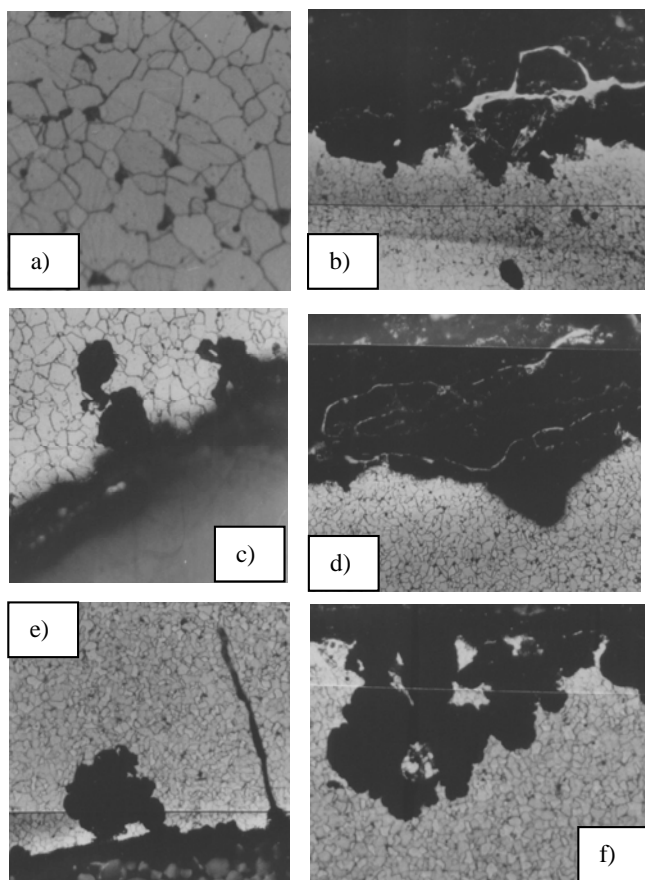
- osnovna mikrostruktura feritno-perlitna, kao što se i očekuje za ovu klasu čelika, ali sa vrlo malim sadržajem perlitnog mikrokonstituenta (3,5% perlita, što odgovara čeliku sa sadržajem ugljenika od svega 0,04%),
- u zoni popravke uočene su, u široj oblasti, sve veoma grube strukture ZUT i prsline sa unutrašnje strane cevi, što ukazuje ili na neprikladan postupak popravke ili na neprikladne parametre reparaturnog zavarivanja.



Slika 6 (a-e). Uzorak 1, prsten za ispitivanje mikrostrukture, pozicije ispitivane na poprečnom preseku cevi: a) osnovni materijal; b) unutrašnja strana, prslina u blizini popravke; c) zona popravke, unutrašnja strana, prsline; d) ZUT membrane; e) unutrašnja strana, prsline

Mikrostrukturne karakteristike uzorka 2 (zadnji zid, 5. cev, kota ~3,5 m od poda ložišta sa vrha panela) su prikazane na sl. 7(a–f), sa kojih se vidi:

- da je osnovna mikrostruktura skoro čisto feritna, perlitni mikrokonstituent je prisutan sporadično, uz nehomogenu raspodelu i u veoma maloj količini;
- da je sa unutrašnje strane cevi prisutan korozijski atak u vidu kratera dubine 0,6–0,9 mm, vide se proizvodi galvanske korozije i naslage debljine 0,8–1,0 mm,
- da su sa spoljnje strane cevi prisutni krateri od gasne korozije, dubine do 0,3 mm, kao i prslina, dubine prodora do 0,85 mm; po nekim karakteristikama, pre svega po načinu inicijacije uočena prslina bi mogla da se svrsta u kategoriju korozijsko-zamornih prslina.

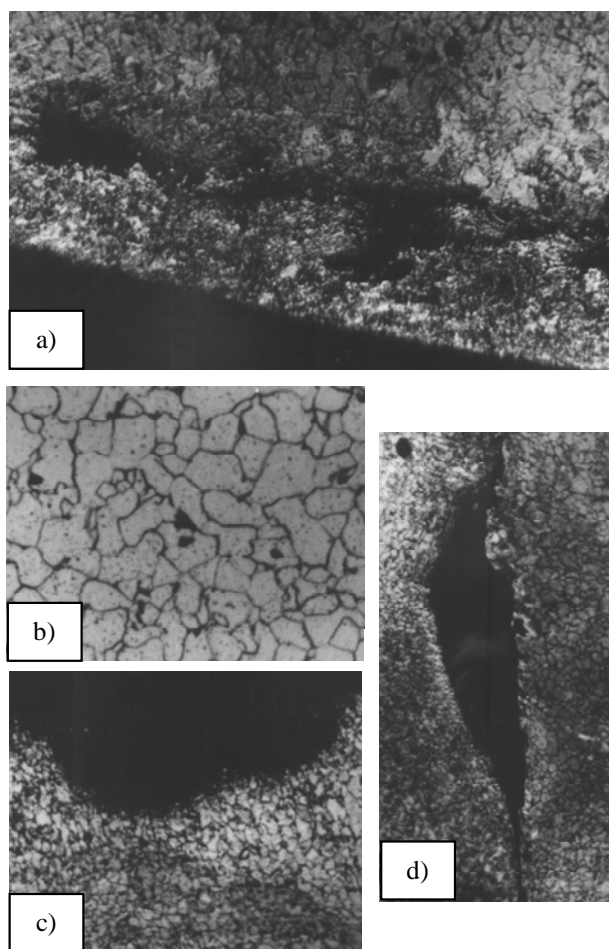


Slika 7 (a–f). Uzorak 2, pozicije ispitivane na poprečnom preseku cevi: a) osnovni materijal; b) unutrašnja strana, naslage; korozijski krateri; c) spoljnja strana, razugljeničenje, krateri; d) unutrašnja strana, naslage, korozijski krateri; e) spoljnja strana, prslina, krateri; f) unutrašnja strana, povezani korozijski krateri

Mikrostrukturne karakteristike uzorka 3 (zadnji zid, 29. cev, kota ~2,0 m od poda ložišta) su prikazane na sl. 8(a–d) sa kojih se vidi:

- da je osnovna mikrostruktura skoro čisto feritna, perlitni mikrokonstituent je prisutan sporadično, uz nehomogenu raspodelu i u veoma maloj količini, 4% perlita, 0,035% ugljenika);
- da je sa unutrašnje strane cevi prisutan korozijski atak u vidu kratera dubine do 0,6 mm i da postoje naslage debljine 0,8–1,5 mm;

- da su sa spoljnje strane cevi prisutni korozijski krateri i potpovršinske prsline koje se pružaju paralelno sa osom cevi i vrlo verovatno su posledica grešaka iz fabrikacije – prevaljanosti.



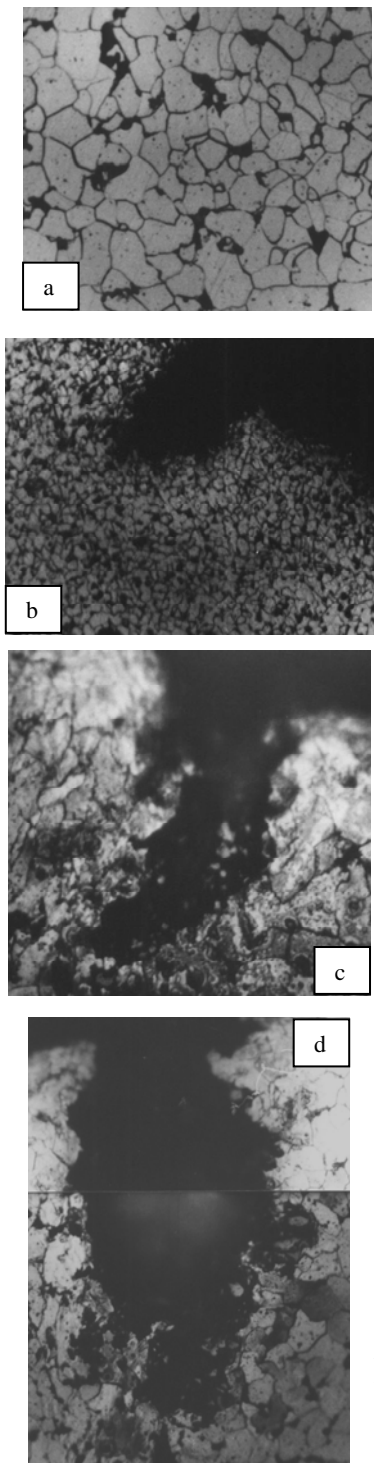
Slika 8 (a–d). Uzorak 3, pozicije ispitivane na poprečnom preseku cevi: a) spoljnja površina, prslina i prevaljanost u potpovršinskom sloju; b) osnovni materijal; c) unutrašnja strana, razugljeničenje, korozijski krater; d) spoj cev–membrana, greška vezivanja, prslina

Mikrostrukturne karakteristike uzorka 4 (prednji zid, 23. cev, na rastojanju od ~1,5 m od prednjeg zida ložišta) su prikazane na sl. 9(a–d) sa kojih se vidi:

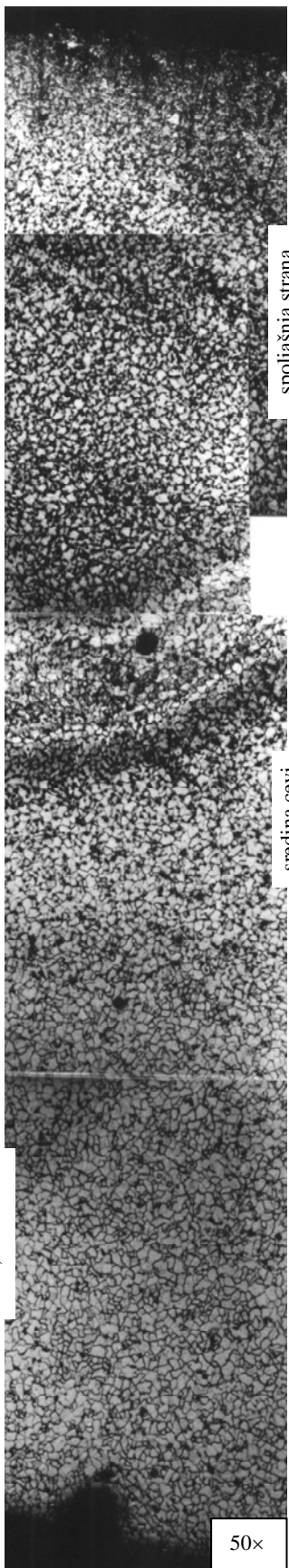
- da je osnovna mikrostruktura feritna-perlitna, sa perlitnim mikrokonstituentom u količini ~7% (0,06% C);
- da su sa unutrašnje strane cevi vidljive deformacije potpovršinskih slojeva u blizini oštećenja, izrazit korozijski atak u vidu kratera dubine do 0,7 mm i naslage debljine 0,3–0,5 mm;
- prisustvo korozijskih kratera i naslage sa spoljnje strane.

Mikrostrukturne karakteristike uzorka 5 (levi zid, 19. cev, kota ~3 m od poda) se vide na sl. 10 (a,b):

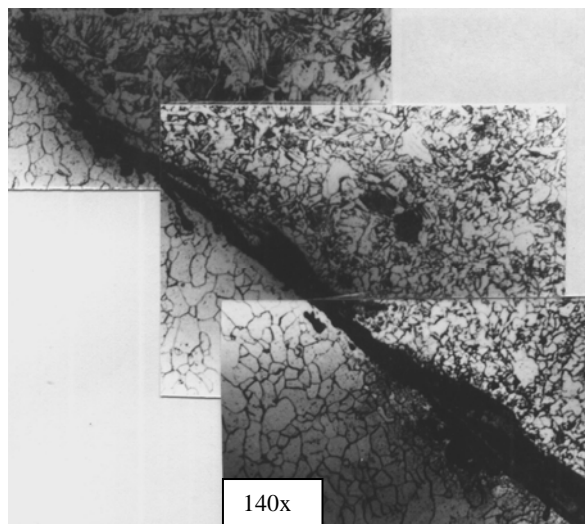
- osnovna mikrostruktura je feritna-perlitna, sa izrazitom koncentracijskom nehomogenosti, sadržaj ugljenika sa spoljnje strane iznosi 0,066%, a sa unutrašnje 0,122%; količina perlitnog mikrokonstituenta varira po debljini zida cevi u zavisnosti od sadržaja ugljenika;
- deformacija srednjih mikrostrukturnih slojeva kao posledica fabrikacije cevi, šupljine i uključci;
- sa unutrašnje strane cevi korozijski atak, krateri i naslage;
- prslina na površinski slojevi sa spoljnje strane.



Slika 9 (a-d). Uzorak 4, pozicije ispitivane na poprečnom preseku cevi: a) osnovni materijal; b-d) unutrašnja strana, korozivna oštećenja.



Slika 10a. Uzorak 5. Poprečni presek po debljini cevi



Slika 10b. Zona membrane. Greška vezivanja. Prsline. Grubi ZUT

EKSPLOATACIJSKA RASPOLOŽIVOST EKRANSKIH CEVI

Procena eksploatacijske raspoloživosti ekranskih cevi kotla VK1 u toplani „Mirijevo“ izvršena je na osnovu parametara stanja metala i podataka iz eksploatacijske istorije postrojenja. Parametri stanja metala ekranskih su dobijeni analizom rezultata ispitivanja: mikrostrukture, hemijskog sastava i mehaničkih svojstava materijala, stepena korozijskih i dugih vidova oštećenja metala, i odstupanja.

Za svaki od parametara usvojen je prikladan *kriterijum prihvatljivosti* na osnovu standarda, tehničkih normi i preporuka. Parametri sa kriterijumima prihvatljivosti i procenat ispitivanja koji zadovoljava zahteve su dati u tab. 6 i 7, /5/.

Analizom procentualnih udela rezultata ispitivanja koji su zadovoljili kriterijum prihvatljivosti po parametrima sačinjen je zbirni pregled, dat u tab. 8.

Tabela 6. Kriterijumi prihvatljivosti za parametre ispitivanja cevi kotla

| Parametar | Kriterijum prihvatljivosti | Ukupan broj ispitivanja | Procenat ispitivanja koja su zadovoljila kriterijum, % |
|----------------------------|--|-------------------------|--|
| Tvrdoća | HB>120 | 50 | 84 |
| Debljina zida | Dozvoljeno stanjenje < 10% | 53 | 36 |
| Koroziono stanje (EMF3-MI) | Indikovano samo I stepen korozijskih oštećenja – prihvatljiv | 34 | 35 |
| Ostala oštećenja | Bez nalaza | 9 | 100 |

Tabela 7. Kriterijumi prihvatljivosti za parametre ispitivanja uzoraka

| Parametar | Kriterijum prihvatljivosti | Ukupan broj ispitivanja | Procenat ispitivanja koja su zadovoljila kriterijum, % |
|------------------------------------|--|-------------------------|--|
| Hemijski sastav | Da zadovoljava standard | 50 | 84 |
| Mikrostruktura | Feritno-perlitna mikrostruktura sa ~20% perlita | 53 | 36 |
| Tvrdoća | HB>120 | 34 | 35 |
| Mehaničke karakteristike | Da zadovoljavaju standard | 9 | 100 |
| Spoljašnji prečnik cevi | D = 57 ± 1 mm | 9 | 100 |
| Debljina zida | Dozvoljeno stanjenje < 10% | 9 | 100 |
| Korozijsko stanje (mikrostruktura) | Indikovano samo I stepen korozijskih oštećenja – prihvatljiv | 9 | 100 |

Tabela 8. Zbirni pregled po kriterijumima prihvatljivosti

| Parametar | |
|--------------------------|--------------------|
| Hemijski sastav | NE ZADOVOLJAVA |
| Mikrostruktura | NE ZADOVOLJAVA |
| Tvrdoća | NE ZADOVOLJAVA |
| Mehaničke karakteristike | NE ZADOVOLJAVA |
| Debljina zida | NE ZADOVOLJAVA |
| Spoljni prečnik cevi | ZADOVOLJAVA |
| Korozijsko stanje | NE ZADOVOLJAVA |
| Površinska oštećenja | ZADOVOLJAVA |

ZAKLJUČAK

Uočene mikrostrukturne karakteristike, nehomogenost u hemijskom sastavu i mikrostrukтури, izrazito niska mehanička svojstva i visok stepen razvoja korozijskih oštećenja ukazuju da *polazne karakteristike ugrađenog materijala ekranskog cevnog sistema nisu zadovoljavale, što znači da polazni materijal nije imao standardom propisane vrednosti.*

Na osnovu ukupnog obima i prirode korozionog ataka na cevnom sistemu ekrana mogu se doneti sledeći zaključci:

- naslage i proizvodi korozijskih procesa na unutrašnjoj površini ispitivanih ekranskih cevi po obimu zahvataju gotovo celo ložište i prisutni su u različitoj meri u zadnjem, prednjem, levom i desnom zidu ložišta i u podu;
- po pojavnim oblicima tip uočenih korozijskih oštećenja odgovara piting, zaustavnoj i koroziji pod naslagama;
- procena eksploatacijske raspoloživosti i integriteta ekranskih cevi kotla izvedena je na osnovu relevantnih parametara i usvojenih *kriterijuma prihvatljivosti* za svaki od parametara ukazuje da *integritet ekranskog cevnog sistema nije zadovoljavajući u pogledu eksploatacijske raspoloživosti za duži period, što znači da se tokom dalje eksploatacije mogu očekivati pucanja ekranskih cevi kako u kritičnim tako i u ostalim zonama ložišta.*

LITERATURA

1. Hagn, L., *Lifetime Prediction for Parts in Corrosive Environment*, Proceedings, 8th International Brown Bowery Symposium on Corrosion in Power Equipment, Baden, Germany, 1983, pp. 256-262.
2. Šijački-Žeravčić, V., Bakić, G., Đukić, M., Anđelić, B., Milanović, D., *Model klasifikacije otkaza i njihove statističke obrade za cevni sistem termoenergetskog postrojenja*, Preventivno inženjerstvo, Vol.XI, No2, 2003, str. 35-39.
3. Šijački-Žeravčić, V., Bakić, G., Đukić, M., Anđelić, B., Milanović, D., Marković, D., *Moderni pristupi u održavanju termoenergetskih postrojenja – metodologija, poređenja, unapređenja*, Preventivno inženjerstvo, Vol.X, No 2, 2002, str. 23-29.
4. Đukić, M., Šijački-Žeravčić, V., Bakić, G., Kerečki, J., Anđelić, B., Rajčić, B., *Koncept održavanja kotlovnih cevi izloženih korozionom ataku*, Zbornik radova na CD-u sa simpozijuma Elektrane 2004, Vrnjačka Banja, Srbija, 2004.
5. Šijački-Žeravčić, V., Bakić, G., Đukić, M., Izveštaj 12-10-12. 04/2001, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2001.
6. Šijački-Žeravčić, V., Bakić, G., Đukić, M. i dr., *Iskustva u primeni uređaja EMF3-MI za detekciju korozionih oštećenja na cevima cevnog sistema kotla*, Zbornik radova sa konferencije Energetika Srpske, Teslić, Republika Srpska, 2001, str. 125.