

ANTO S. GAJIĆ<sup>1</sup>  
MILORAD V. TOMIĆ<sup>2</sup>  
LJUBICA J. PAVLOVIĆ<sup>3</sup>  
MIOMIR G. PAVLOVIĆ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Rudnik i termoelektrana Ugljevik,  
RiTE, R. Srpska

<sup>2</sup>Tehnološki fakultet Zvornik,  
Univerzitet u Istočnom Sarajevu,  
Zvornik, R. Srpska

<sup>3</sup>IHTM–Centar za elektrohemiju,  
Univerzitet u Beogradu,  
Beograd, Srbija

STRUČNI RAD

UDK 628.1.033:621.18:620.193

DOI: 10.2298/HEMIND100316018G

## UTICAJ KVALITETA VODE NA POUZDANOST RADA KOTLOVSKIH POSTROJENJA

*U ovom radu su prikazani osnovi i vrste korozionih procesa cevnog sistema kotla TE „Ugljevik“, R. Srpska. Korozione procese nije moguće u potpunosti zaustaviti, ali se oni mogu usporiti pa i smanjiti posledice koje oni izazivaju. Da bi se korozija vitalne opreme termoenergetskih postrojenja, a naročito kotlova, svela na minimum, neophodno je u svakom pojedinačnom slučaju odrediti delujući mehanizam korozije kao i uzročnike koji ga izazivaju. Oštećenja i njima izazvani zastoji u radu termoenergetskih postrojenja u velikom broju su izazvani odvijanjem različitih tipova korozionih procesa. Posebna pažnja je posvećena pripremi vode, s obzirom na njen uticaj na pojavu korozije. Vizuelnim pregledom su utvrđene sledeće vrste korozije na ekranskim cevima kotla sa strane vode i pare: eroziona, jamasta i naponska sa prslinama. Unutrašnje površine ekranskih cevi sa kojih je uklonjen (“sljušten“) sloj kamenca ukazuju da je usled erozije dolazilo do skidanja kamenca i produkata korozije, odnosno erozione korozije, uz stanjivanje zidova cevi. Prsline (perforacije) na ekranskim cevima koje su zavarene, pokazuju da se odigrala naponska korozija cevi sa obrazovanjem prslina, odnosno da je došlo do pucanja cevi. Rupice (udubljenja) na unutrašnjoj površini ekranskih cevi, vidljive nakon uklanjanja kamenca i produkata korozije, dokaz su da se odigrala tačkasta korozija. Istaknuti su potencijalni uzročnici korozije i dat je predlog mera za njihovo eliminisanje.*

Voda, kao najčešće korišćeni fluid u termoenergetskim postrojenjima za prenos toplote (zagrevanje ili hlađenje) nezamenjiva je zbog dobrog toplotnog kapaciteta, dostupnosti i niske tržišne cene. Voda koja se koristi u termoenergetskim postrojenjima mora da bude prethodno podvrgnuta hemijskoj pripremi, kako bi se odstranile štetne primese koje negativno utiču na rad ovih postrojenja. Primese koje treba ukloniti smanjuju efikasnost termoenergetskih postrojenja u smislu efikasnog prenosa toplote, usled taloženja kamenca i stvaranja mulja. Usled prisustva štetnih primesa ubrzava se i korozija ovih postrojenja, smanjuje radna pouzdanost i radni vek postrojenja.

Voda koja se koristi u termoenergetskim postrojenjima mora biti visokog kvaliteta što se postiže proizvodnjom kvalitetne vode, kontrolisanjem i održavanjem propisanih parametara. Primese u vodi se mogu ukloniti primenom jednog ili više postupaka od niza klasičnih (taloženje, koagulacija, flokulacija, filtriranje), preko jonske izmene, do najsavremenijih metoda membranske separacije (ultrafiltracija i reversna osmoza). Ukoliko se pojedini postupci izostave ili ne primene na adekvatan način, može doći do nepovoljnog uticaja primesa iz vode [1–3]. Primese u vodi se mogu podeliti na mehaničke, koloidne i rastvorene [4,5].

Korozija, kao negativan proces razaranja metala izaziva niz nepovoljnih efekata kao što su: skraćenje veka trajanja opreme, poskupljenje održavanja opreme, smanjenje proizvodnih kapaciteta korodirane opreme, zastoj u radu, havarije, nesreće. Korozija u potpunosti

utiče na smanjenje pouzdanosti rada postrojenja. Štete od korozije termoenergetskih postrojenja nastaju uglavnom od korozije turbinskih postrojenja te je zbog toga potrebno unaprediti vodeno-hemijske režime i poboljšati kvalitet pare [6].

Cilj ovog rada je da pokaže zavisnost pouzdanosti rada kotlovnih (termoenergetskih) postrojenja od kvaliteta vode koja se koristi, kao i da se odrede uzroci koji dovode do pojave korozije cevnog sistema kotla s ciljem smanjenja odnosno otklanjanja njihove ponovne pojave.

### VODA U TERMOENERGETSKIM POSTROJENJIMA

U izvornom značenju parni kotao predstavlja objekat u kome se toplotna energija, dobijena sagorevanjem goriva, preko grejnih površina prenosi na radni fluid koji isparava i čija se para pregreva do određene temperature. Zadatak kotlova je da što efikasnije pretvore vodu u vodenu paru određenog pritiska i temperature. Kao radni fluid (prijemnik toplote) najčešće se koristi voda koja u kotlu isparava i koja se pregreva, tako da se kao konačni produkt dobija suvozasićena ili pregrejana para [7,8].

Iz postrojenja za hemijsku obradu vode dobija se voda različitog kvaliteta i namene: demineralizovana voda za napajanje kotlova (DEMI voda) i dekarbonizovana voda za napajanje rashladnih postrojenja. Zahtevani kvalitet vode postiže se primenom različitih fizičko-hemijskih i tehnoloških postupaka [9]. Primese u vodi/pari izazivaju koroziju delova sistema usled čega dolazi do havarijskih ispada, zastoja i lomova. Zbog toga je neophodno postići visok kvalitet vode koja se koristi u termoenergetskim postrojenjima, a zatim kontrolisati i održavati propisane parametre [1–3,7–10]. Potreban kvalitet vode, demineralizovana voda, za sistem vo-

Autor za prepisku: M.G. Pavlović, IHTM – Centar za elektrohemiju, Njegoševa 12, 11000 Beograd.  
E-pošta: buba@tmf.bg.ac.rs  
Rad primljen: 16. mart 2010.  
Rad prihvaćen: 27. april 2010.

da–para u termoelektranama, prikazan je u tabeli 1, a u tabeli 2, kvalitet omekšane cirkulacione vode u toplana–ma [3,11].

Tabela 1. Vrednost kontrolnih parametara demineralizovane vode za sistem voda–para u termoelektranama [3,11]

Table 1. Control parameter values of demineralized water for the water–vapour system in thermal power plants [3,11]

| Parametar   | Granična vrednost |
|---|-------------------|
| pH vrednost   | 8,8–9,2           |
| Provodljivost, $\mu\text{S}/\text{dm}^3$              | $\leq 0,2$        |
| Sadržaj natrijuma, $\mu\text{g}/\text{dm}^3$          | $\leq 10$         |
| Sadržaj hlorida, $\mu\text{g}/\text{dm}^3$            | $\leq 10$         |
| Sadržaj gvožđa, $\mu\text{g}/\text{dm}^3$             | $\leq 20$         |
| Sadržaj bakra, $\mu\text{g}/\text{dm}^3$              | $\leq 3$          |
| Sadržaj silicijuma, $\mu\text{g}/\text{dm}^3$         | $\leq 20$         |
| Sadržaj masti i ulja, $\mu\text{g}/\text{dm}^3$       | $\leq 100$        |
| Sadržaj organskih materija, $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ | $\leq 3000$       |

Tabela 2. Vrednost kontrolnih parametara omekšane cirkulacione vode u toplana [3,11]

Table 2. Control parameter values of softened circulating water in heating plants [3,11]

| Parametar   | Granična vrednost |
|---|-------------------|
| pH vrednost   | 9,6–10,0          |
| Ukupna tvrdoća, $\text{CaCO}_3$ $\text{mg}/\text{dm}^3$ ( $^\circ\text{dH}$ ) | $<8,9$ ( $<0,5$ ) |
| Provodljivost, $\mu\text{S}/\text{dm}^3$                                      | $<1500$           |
| Sadržaj kiseonika, $\mu\text{g}/\text{dm}^3$                                  | $<0,02$           |
| Sadržaj hlorida, $\mu\text{g}/\text{dm}^3$                                    | $<300$            |
| Sadržaj gvožđa, $\mu\text{g}/\text{dm}^3$                                     | $<0,1$            |
| Sadržaj bakra, $\mu\text{g}/\text{dm}^3$                                      | $<0,02$           |
| Sadržaj masti i ulja, $\mu\text{g}/\text{dm}^3$                               | $<1$              |

Usled neadekvatne pripreme vode u termoenergetskim postrojenjima nastaje čvrsti talog „kamenac“. Kamenac nastaje složenim fizičko-hemijskim procesom, koji se sastoji u izdvajanju (kristalizaciji) rastvorenih soli iz rastvora u čvrstoj fazi. Taloženjem karbonati kalcijuma i magnezijuma povlače za sobom rastvorene soli, tako da se u sastavu kamenca mogu naći i natrijum-hlorid ( $\text{NaCl}$ ), natrijum-nitrat ( $\text{NaNO}_3$ ), kalijum-nitrat ( $\text{KNO}_3$ ) i kalijum-sulfat ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ ). Sadržaj hlorida u kamenju je relativno mali, jer na povišenim temperaturama hloridi disosuju. Sastav kamenca zavisi od hemijskog sastava vode, kao i od fizičko-hemijskih procesa koji se odvijaju u vodi. Prisustvo kotlovskog kamenca štetno je i nepoželjno. Kotlovski kamenac izaziva [4]:

- smanjenje prelaza toplote (što ima za posledicu povećanje potrošnje goriva, povišenje temperature kotlovskog čelika – pregrevanje, smanjenje čvrstoće kotlovskog čelika);

- ometanje pravilnog toka vode usled smanjenja poprečnog preseka;

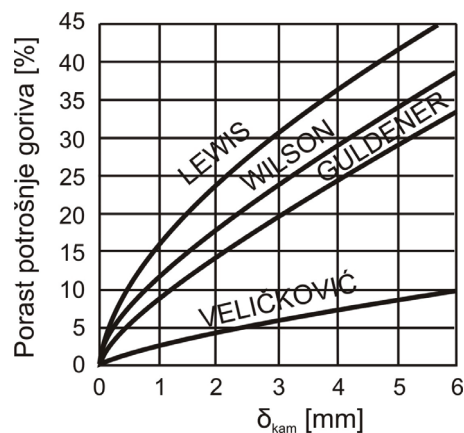
- koroziju;

- smanjenje pogonske bezbednosti;
- povećanje troškova održavanja;
- smanjenje stepena korisnosti i veka trajanja kotlovskog postrojenja.

Dругu grupu kotlovskih taloga čini kotlovski mulj, koji nastaje koagulacijom dela primesa iz vode. Kotlovski mulj sadrži kalcijum-karbonat i mehaničke nečistoće. Stvaranje kotlovskog mulja olakšano je prisustvom koloidnih primesa. U određenim slučajevima može iz kotlovskog mulja nastati kamenac. Kotlovski mulj se odstranjuje iz kotla odmuljivanjem [4].

Korozija metala može nastati na mestima gde kamenac nije u potpunosti prekrpio površinu metala. Na ovim mestima stvaraju se uslovi za mešovitu koncentraciju alkalnih soli i za kontakt sa slobodnim kiseonikom što može da izazove intenzivnu koroziju. Odvojeni delići kotlovskog kamenca mogu izazvati veće „habanje“ pokretnih delova sistema (pumpi, vratila, zaprtivki i sl.).

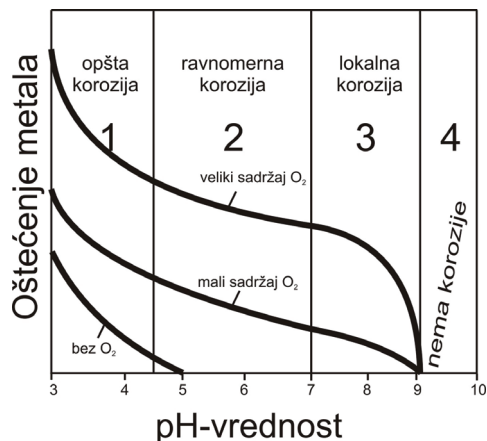
Kamenac stvara izolacioni sloj koji otežava prelaz toplote od produkta sagorevanja na zid cevi, s obzirom da je koeficijent toplotne provodljivosti kamenca znatno manji od koeficijenta toplotne provodljivosti čelika. Ako je kamenac silikatnog sastava, već pri debljini od nekoliko mikrometara, temperatura metala dostiže vrednost od 400–450  $^\circ\text{C}$ , koja je za ugljenične čelike kritična. Na ovim temperaturama dolazi do slabljenja materijala, povećanja brzine korozije i do potencijalne opasnosti od deformacija i eksplozija. Sa porastom debljine naslaga kamenca povećava se i potrošnja goriva (slika 1). Prema podacima iz literature, usled različitog sastava kamenca, za potrošnju goriva se dobijaju različiti podaci [4]. Na primer, pri debljini kamenca od 2 mm, za parne kotlove radnog pritiska do 2,0 MPa, povećanje potrošnje goriva, pri nepromenjenoj proizvodnji pare je oko 4%. Kod kotlova većih snaga (viših radnih pritisa), ove pojave su još više izražene, tako da se sa povećanjem debljine kamenca potrošnja drastično povećava (slika 1) [4].



Slika 1. Povećanje potrošnje goriva u zavisnosti od debljine kamenca [4].

Figure 1. Increase in fuel consumption depending on thickness scale [4].

Od rastvorenih gasova u vodi koroziono deluju kiseonik, ugljen-dioksid i sumpor-vodonik. Rastvoreni kiseonik u vodi predstavlja najveću opasnost s obzirom na to da koroziono deluje u svim sredinama. Zavisnost intenziteta korozije čelika od pH vrednosti i sadržaja kiseonika prikazana je na slici 2 [4].



Slika 2. Zavisnost intenziteta korozije čelika od pH vrednosti i sadržaja kiseonika u vodi [4].

Figure 2. Dependence of steel corrosion intensity on pH value and oxygen content in water [4].

U oblasti 1, koja odgovara području pH vrednosti od 3 do 4,6, dolazi do korozionog delovanja nezavisno od sadržaja kiseonika. Sa porastom sadržaja kiseonika, raste i intenzitet korozionog delovanja. U oblasti 2 (pH vrednost od 4,6 do 7,0) javlja se umerena korozija. Sa slike 2 može se videti da do korozije neće doći pri  $pH > 5$  i u nedostatku kiseonika. U oblasti 3 (pH 7,0–9,2) dolazi do korozionog delovanja ukoliko je kiseonik prisutan. Sa porastom pH vrednosti iznad 9,2, nema mogućnosti korozionog delovanja (oblast 4). U prisustvu rastvorenog kiseonika stvara se hematit ( $Fe_2O_3$ ) umesto zaštitnog sloja magnetita ( $Fe_3O_4$ ), što dovodi do naglog smanjenja debljine, pa time i dužine perioda upotrebe čelika. Kiseonik deluje kao agens korozije i između slojeva nataloženog kamenca i kotlovske materijala. Koroziono delovanje kiseonika posebno se ispoljava tokom zastoja rada kotla.

## MATERIJAL I METOD RADA

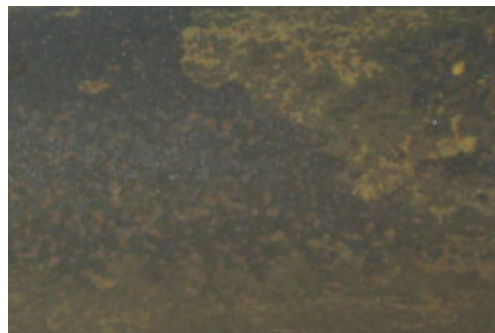
U radu je prikazano stanje ekranskih cevi kotla u TE „Ugljevik“ sa aspekta uticaja korozije na radni vek cevi. Vizuelnim osmatranjem unutrašnjih cevi i analizom vode, mulja i naslaga na unutrašnjoj strani cevi, procenjen je stepen korozije cevi. Sa unutrašnje strane ekranskih cevi kotla je izvedeno elektrolitičko čišćenje – uklanjanje produkata korozije (kamenca i oksida gvožđa), da bi se izvršila njihova analiza. Postupak za uklanjanje produkata korozije sa uzoraka za ispitivanje, izveden je u skladu sa standardom ISO/DIS 8407. Rastvo-

ri za čišćenje uzoraka su pripremljeni od hemikalija čistoće p.a. i destilovane vode. Provodljivost vode je bila manja od  $0,2 \mu S/cm$ , a u skladu sa standardom JUS M.E2.011:1994 (Kotlovska postrojenja. Zahtevi za napojnu i kotlovsku vodu). Katodna gustina struje je bila  $150 A/m^2$ , a kao anoda (kontra elektroda) upotrebljena je elektroda od platine (ukupne površine  $20 cm^2$ ). Rastvor za elektrolitičko uklanjanje korozionih produkata je bio sledećeg sastava (na  $dm^3$  rastvora):  $75 g NaOH + 25 g Na_2SO_4 + 75 g Na_2CO_3$ . Pri tome je korišćena standardna elektrohemijska aparatura za ovu vrstu merenja.

Pri utvrđivanju parametara kvaliteta vode, primenjene su analitičke i hemijske metode, postupci i tehnike za kontrolu kvaliteta i analizu tragova supstanci [3,12,13].

## REZULTATI ISTRAŽIVANJA I DISKUSIJA

U radu je proučavana pojava korozije ekranskih cevi kotla sa strane vode i pare. Vizuelnim osmatranjem i fotografisanjem unutrašnjih površina ekranskih cevi kotla izrađenih od ugljeničnog čelika Č1214 hemijskog sastava: C, maks. 0,17%, Si, 0,10–0,35%, Mn, min. 0,40%, P, maks. 0,050 i S, maks. 0,050%. Utvrđeno je da je cela površina prekrivena naslagama (slika 3). Za snimanje površina korišćen je fotografski aparat Canon A510, 5,2 Mpx.

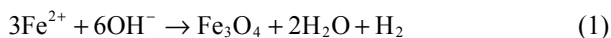


Slika 3. Izgled unutrašnje površine ekranske cevi kotla pre uklanjanja produkata korozije.

Figure 3. View of the inner surface of the screen tube boiler before removal of corrosion products.

Spoljni sloj naslage prema vodi i pari, ukoliko nije sljušten je beličast, a sloj naslage prema površini cevi je crn. Crni sloj predstavlja produkt korozije čelika. Crni sloj naslage nastaje kao rezultat delovanja galvanskog sprega u kome površina metala na granici sa opnom (naslagom) deluje kao anoda, a površina opne na granici sa vodom deluje kao katoda. Opna ima elektronsko-jonsku provodljivost i deluje kao provodnik prve i druge vrste pri čijoj kratkoj vezi radi galvanski spreg [14,15]. U tom spregu kroz crni sloj difunduje vodonik nastao redukcijom vodoničnih jona i dvovalentnih jona gvožđa. Na površini dodira opne sa vodom odigrava se reakcija iz-

među dvovalentnih jona gvožđa na granici opna–voda i hidroksilnih jona, zaostalih u vodi u ekvivalentnoj količini vodoničnih jona, izredukovanih na katodi prema jednačini:



U vodi najvećeg stepena čistoće pri visokim temperaturama nastaje opšta korozija čelika, koja prestaje pokrivanjem cele površine metala magnetitnim slojem. Korozija ovog tipa odvija se bez većih gubitaka metala. Vodoničnik koji nastaje u reakciji odlazi sa parom, a delom se rastvara u metalu i izaziva vodoničnu krutost koju karakterišu prsline koje su uzrok slabljenja čvrstoće čelika (zida cevi).

Spoljni beličasti sloj naslage na unutrašnjoj površini ekranskih cevi je nastao u procesu kristalizacije soli u vodi kada su centri kristalizacije bili na samoj površini magnetitne opne. Sloj je čvrsto vezan za metal i teško se uklanja. Sa unutrašnje površine ekranskih cevi sa naslagom koja je hrapava i neravna, pri kretanju vode i pare, u kojima je zbog isparavanja došlo do koncentrisanja i kristalizacije soli, odnosno do obrazovanja mulja, odvajaju se delovi naslage od cevi usled trenja između čvrste, tečne i gasovite faze. Dolazi do erozije.

Erozija ima za posledicu pojavu raznih neravnina i udubljenja na unutrašnjim površinama ekranskih cevi. Unutrašnje površine ekranskih cevi, sa kojih je odnet sloj naslage pri erozionom delovanju vode, pare i mulja, u neposrednom kontaktu su sa delovima cevi pokrivenim naslagama od oksida gvožđa. U dodiru sa vodom otkriveni deo metala cevi (bez naslage) deluje kao anoda i rastvara se, a delovi metala pokriveni naslagom od oksida gvožđa kao katoda, na kojima teče proces redukcije vodoničnih jona sa otkrivenih delova metala (anode), gradeći magnetit u obliku opne. Opna na visokim temperaturama, zbog nejednakih termičkih koeficijenata opne i metala, prska (dolazi do pucanja), a adhezija za metal slabi i pri kretanju vode, pare i mulja biva sljuštena i odneta uz stvaranje uslova za nastavljavanje procesa korozije, koja se zove eroziona korozija.

Zidovi ekranskih cevi sa unutrašnje strane sa kojih je erozijom odneta nasлага su stanjeni; smanjenje debljine zidova cevi je posledica eroziona korozije. Na slici 4 uočavaju se površine metala ekranskih cevi, koje su podlegle erozionoj koroziji.

Na spoljnoj površini ekranskih cevi raspoznaju se zavarena mesta na metalu (slika 5), na kome je došlo do perforacije usled naponske korozije.

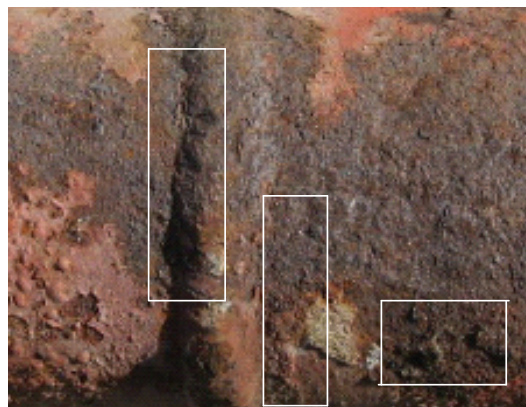
Na pojedinim mestima ekranskih cevi (pre zavarivanja) obrazovao se kamenac, loš prenosilac toplote, pa je zbog toga na visokim temperaturama i pritiscima došlo do pregrevanja i nadimanja metala zida cevi i ponekad prskanja i eksplozije. Prsline su zatvarane zavarivanjem. Opisana oštećenja nastala usled hemijskog,

mehaničkog i termomehaničkog delovanja su rezultat naponske korozije metala ekranskih cevi sa prslinama.



Slika 4. Otkrivena površina metala ekranskih cevi koje su podlegle erozionoj koroziji.

Figure 4. Uncovered surface metal of screen tube which succumbed to erosive corrosion.



Slika 5. Zavarena mesta na ekranskim cevima na kojima je došlo do perforacije usled naponske korozije.

Figure 5. Weld spots on the screen tube where there was a perforation due to stress corrosion.

Na površini ekranskih cevi kotla posle izvedenog uklanjanja kamenca i oksida gvožđa (produkata korozije metala cevi) uočen je veći broj rupica (slika 6). Ove rupice su produkt tačkaste korozije koja nastaje pri jednovremenom delovanju kiseonika i jona hlora u kotlovskoj vodi.

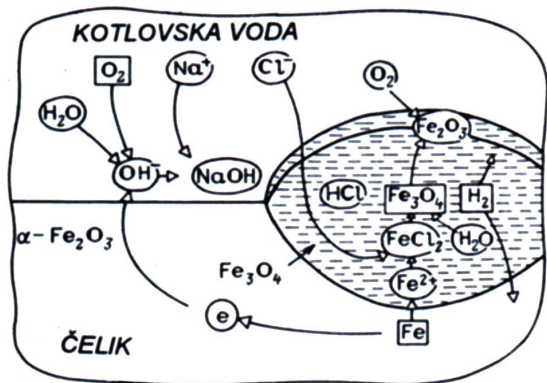
Sadržaj kiseonika u vodi kotla se kreće od 2,7 do 3,0 mg/dm<sup>3</sup>, a Cl<sup>-</sup> od 0,3 do 14,2 mg/dm<sup>3</sup>. Mala udubljenja, prsline, pore, zarezi i ogrebotine na površini metala ili pore u naslagama (oksidi gvožđa, kamenac), takođe na metalu, u koje dospeva elektrolit (voda), deluju kao anode, zbog manjeg sadržaja kiseonika u njima, u odnosu na površinu metala ili naslage koje su bez pora i zazora, a ponašaju se kao katode. Ovu razliku u sadržaju kiseonika u anodnom i katodnom prostoru izaziva slaba izmena elektrolita između anodnog i katodnog prostora. Ta razlika je osnovni uzrok pojave tačkaste

korozije. Slika 7 prikazuje nastajanje tačkaste korozije [15,16].



Slika 6. Ekranska cev nakon uklanjanja kamenca i produkata korozije.

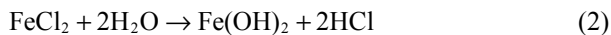
Figure 6. Screen tube after the removal of scale and corrosion products.



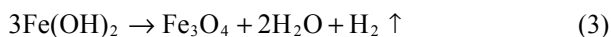
Slika 7. Šema tačkaste korozije [15].

Figure 7. The scheme of pitting corrosion [15].

Sa anodnih mesta u udubljenju, gvožđe se oksidiše do fero jona, a na katodnim mestima redukuje se kiseonik, rastvoren u vodi, do hidroksilnih jona. Nastali ferojoni reaguju sa  $\text{Cl}^-$ , prisutnim u vodi gradeći fero-hlorid koji podleže hidrolizi prema jednačini:



Reakcija (2) neprekidno teče u desno zbog prevođenja  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  u rastresiti  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  i  $\text{H}_2$  prema reakciji:



Kiseonik izaziva koroziju metala. Korozija izazvana prisustvom kiseonika bezopasnija je za čelike, ako je koncentracija kiseonika niža, što zavisi od pripreme vode (hemijaska obrada, degazacija). Slobodna ugljena kiselina odnosno agresivan ugljen-dioksid, prisutan u vodi, može da izazove koroziju uz izdvajanje vodonika, koja je manja ako je sadržaj agresivnog ugljen-dioksida u vodi manji, što zavisi od pripreme vode. Hloridi iz vode deluju kao aktivatori korozije i sprečavaju pasi-

viranje čelika odnosno onemogućuju obrazovanje i obnavljanje pasivnog zaštitnog filma.

Veća tvrdoća vode i veći sadržaj silicijum-dioksida u vodi na povišenoj temperaturi na unutrašnjoj strani cevi mogu stvarati veći sloj kamenca [5,17], koji je čvrsto vezan za metal (teško se skida) i kao takav može naročito na unutrašnjoj strani ekranske cevi, sa plamene strane, dovesti do smanjenja prenosa toplote, povišenja temperature, plastične deformacije i nadimanja čelika i do prskanja cevi. Silicijum-dioksid se smatra kao najnepoželjnija komponenta kotlovske vode [18–20]. Prema tome, u vodi sa debljim slojem kamenca, može se pojaviti naponska korozija čelika sa prslinama.

Ukoliko kvalitet napojne vode za kotlovska postrojenja ne zadovoljava preporučene parametre kvaliteta koji su dati u tabeli 1, nije preporučeno koristiti je u ove svrhe. Na osnovu sastava napojne vode može se zaključiti da se mogu odigravati sledeće vrste korozije:

1. parovodna (pod dejstvom vode i pare);
2. naponska korozija sa prslinama (zbog velike tvrdoće napojne vode);
3. tačkasta korozija (zbog visokog sadržaja  $\text{O}_2$  i  $\text{Cl}^-$  u kotlu);
4. vodonična krtost (zbog difuzije vodonika u masu čelika od kojeg su izrađene ekranske cevi).

Hemijska analiza taloga (kamenac sa produktima korozije), sa unutrašnje strane ekranskih cevi kotla, pokazala je da deponat sadrži više od 66% silikata kalcijuma i magnezijuma, odnosno 30,0%  $\text{SiO}_2$ , 20,2%  $\text{CaO}$  i 16,2%  $\text{MgO}$  (tabela 3). Kamenac na unutrašnjoj površini cevi se sastoji od silikata zemnoalkalnih metala koji su najlošiji prenosioci toplote od cevi ka vodi izazivajući pregrevanje cevi, najviše sa plamene strane, uz jednovremeno nadimanje i prskanje cevi, odnosno izazivajući koroziju sa prslinama. Sadržaj gvožđa od 68,2% u mulju (tabela 4), koji je jedan od uzročnika erozione korozije, pokazuje da čelik u cevnom sistemu kotla podleže koroziji.

Tabela 3. Sastav taloga (kamenca i produkata korozije ekranskih cevi kotla)

Table 3. Composition of the deposit (scale and corrosion products of screen tube boiler)

| Komponenta       | Sadržaj, % |
|------------------|------------|
| $\text{SiO}_2$   | 30,0       |
| $\text{Fe}^{2+}$ | 3,4        |
| Fe, ukupno       | 18,4       |
| $\text{CuO}$     | 0,043      |
| $\text{CaO}$     | 20,2       |
| $\text{MgO}$     | 16,2       |
| $\text{ZnO}$     | 0,026      |
| $\text{SO}_3$    | <0,5       |

Tabela 4. Sastav mulja iz ekranskih cevi kotla  
Table 4. Sludge composition from the screen tube boilers

| Komponenta       | Sadržaj, % |
|------------------|------------|
| SiO <sub>2</sub> | 1,75       |
| Fe <sup>2+</sup> | 8,4        |
| Fe, ukupno       | 68,2       |
| CuO              | 0,035      |
| CaO              | 1,16       |
| MgO              | 0,40       |
| ZnO              | 0,040      |
| SO <sub>3</sub>  | <0,5       |

## ZAKLJUČCI

Usled neadekvatne pripreme vode za termoenergetska postrojenja i prisustva primesa u vodi i pari javlja se korozija svih delova sistema koja izaziva lomove, zastoje, havarije i ispade sistema.

Vizuelnim pregledom su utvrđene sledeće vrste korozije na ekranskim cevima kotla sa strane vode i pare: eroziona, jamasta i naponska sa prslinama. Unutrašnje površine ekranskih cevi sa kojih je odnet („sljušten“) sloj kamenca ukazuju da je usled erozije dolazilo do odnošenja kamenca i produkata korozije, odnosno erozione korozije uz stanjivanje zidova cevi. Prsline (perforacije) na ekranskim cevima koje su zavarene, pokazuju da se odigrala naponska korozija cevi sa obrazovanjem pukotina, odnosno da je došlo do pucanja cevi. Rupice (udubljenja) na unutrašnjoj površini ekranskih cevi, vidljive nakon uklanjanja kamenca i produkata korozije dokaz su da se odigrala tačkasta korozija.

Kamenac na unutrašnjoj površini cevi se sastoji od silikata zemnoalkalnih metala koji su najlošiji prenosioci toplote od cevi ka vodi, izazivajući pregrevanje cevi, najviše sa plamene strane, uz istovremeno nadimanje i prskanje cevi, odnosno izazivajući koroziju sa prslinama.

Sadržaj gvožđa od 68,2% u mulju, koji je jedan od uzročnika erozione korozije, pokazuje da čelik u cevnom sistemu kotla podleže koroziji. Mulj prisutan u ekranskim cevima kotla, koji se sastoji od teško rastvornih jedinjenja u vodi, pri svom kretanju, skida naslagu od kamenca i oksida gvožđa odvajajući je od metala i stvarajući povoljne uslove za koroziju otkrivenog metala uz istovremeno obrazovanje kamenca. Nastali produkti korozije čelika i kamenac mogu da budu sljušteni pod dejstvom mulja i vode, odnosno produžavaju erozionu koroziju.

Neblagovremeno uklanjanje kamenca i odmuljivanja mogu intenzivirati koroziju ekranskih cevi kotla. Ekranske cevi kotla podležu i koroziji sa utroškom kiseonika, odnosno tačkastoj koroziji. Joni jedinjenja rastvornih u vodi (Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, SiO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Na<sup>+</sup>) povećavaju specifičnu električnu provodljivost, čime se ubrzava korozija metala u kotlu, ukoliko je njihova uku-

pna specifična električna provodljivost veća od propisane, 0,2 μS/cm.

Odgovarajuća priprema napojne kotlovske vode i održavanje svih parametara u normiranim granicama, predstavlja osnovni uslov za smanjenje, pa i sprečavanje, korozije kotlovskih postrojenja, čime se istovremeno produžava upotrebnii vek termoenergetskih postrojenja.

## LITERATURA

- [1] F.N. Kemmer, The Nalko Water Handbook, Mc Graw-Hill Book Company, New York, 1988.
- [2] G. Degremont (Ed.), Water Treatment Handbook, 5<sup>th</sup> ed., John Wiley & Sons, 1979.
- [3] Lj. Rajaković, Priručnik za kontrolu kvaliteta vode u sistemu voda-para u termoenergetskim objektima EPS-a, TMF-EPS, Beograd, 1994.
- [4] M.Radovanović, Industrijska voda, Mašinski fakultet, Beograd, 1996.
- [5] V. Korać, Tehnologija vode za potrebe industrije, Udruženje za tehnologiju vode Beograd, 1975.
- [6] S. Vidojković, Integritet i vek konstrukcija 7 (2007) 105–108.
- [7] M. Guličić, Lj. Brkić, P. Perunović, Parni kotlovi, Mašinski fakultet, Beograd, 1996.
- [8] V.N. Rajaković, Lj.V. Rajaković, Hem. ind. 57(7–8) (2003) 307–317.
- [9] E.A.Urlich, Kesselsterin und Korrosionen, Buderus-Lollar Handbuch, Wetzlar, 1965.
- [10] Lj.V. Rajaković, Integritet i vek konstrukcija 2 (2007) 83–88.
- [11] Lj.V. Rajaković, J. Kerečki, Hem. ind. 57(7–8) (2003) 318–325.
- [12] V. Rekalčić, Analiza vazduha i vode, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, 1996.
- [13] ASTM Standards, Part 31, Water, American Society for Testing and Materials, 1980.
- [14] S. Mladenović, M. Petrović, G. Rikovski, Hemijsko-tehnološki priručnik, Korozija i zaštita materijala, VI knjiga, Nenad Radošević (urednik), Rad, Beograd, 1985.
- [15] S. Mladenović, Korozija materijala, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, 1990.
- [16] M. Iovchev, Korroziya teploenergeticheskogo i yadernoenenergeticheskogo oborudovaniya, Energoatomizdat, Moskva, 1988.
- [17] A.F. Belokonova, Vodnokimicheskie reyhimy teploynkh elektrostantsii, Energoatomizdat, Moskva, 1985.
- [18] N.P. Subotina, Vodnyi rezhim khimicheskii kontrolov na tes, Energoatomizdat, Moskva, 1985.
- [19] M.V. Tomić, M.G. Pavlović, G. Tadić, Lj.J. Pavlović, D. Kulić, XI YUCORR, Knjiga radova, SITZAMS, Beograd, Tara, maj 2009, str. 201–207.
- [20] M.V. Tomić, M.G. Pavlović, G. Tadić, Lj.J. Pavlović, Zaštita materijala 50(1) (2009) 51–58.

## SUMMARY

### THE EFFECT OF WATER QUALITY ON RELIABILITY OF BOILER PLANTS PERFORMANCE

Anto S. Gajić<sup>1</sup>, Milorad V. Tomić<sup>2</sup>, Ljubica J. Pavlović<sup>3</sup>, Miomir G. Pavlović<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mines and Power Plants Ugljevik, Ugljevik, Republic of Srpska

<sup>2</sup>Faculty of Technology, University of Eastern Sarajevo, Zvornik, Republic of Srpska

<sup>3</sup>ICTM-Department of Electrochemistry, University of Belgrade, Belgrade, Serbia

(Professional paper)

This paper presents sources and types of corrosion processes of boiler tube system of the Thermal Power Plant "Ugljevik". The main goal in the electric power production is to achieve lower prices, which can only be done by providing low maintenance costs. While it is not possible to completely stop corrosion, it could be slowed down and its effects could be reduced. In order to reduce corrosion to a minimum on thermal power plants' vital equipment, particularly boilers, it is necessary to determine in each particular case the acting mechanism of corrosion and agents that cause it. Damages and failures on thermal power plants are largely caused by the development of various types of corrosion processes. Special attention is given to the preparation of water, considering its importance to the occurrence of corrosion. The following types of corrosion were detected on the screen tube boiler by visual examination on the side of water and steam: erosive, pitting and impact corrosion. The inner surface of screen pipes, from which the scale layer was removed, indicates that the erosive corrosion with the thinning of pipe walls occurs. Perforation of the welded screen pipes shows that stress corrosion occurred on the screen pipe with formation of cracks and that pipe exploded. Pits on the inner surface of the screen pipes, visible after the removal of scale and corrosion products, are proof that pitting corrosion occurred. The causes of corrosion were discovered and proposed measures for their elimination were given.

Ključne reči: Kvalitet vode • Kotao • Termoenergetsko postrojenje • Korozija • Para • Kamenac • Kotlovski mulj

Key words: Water quality • Boiler • Thermal power plant • Corrosion • Steam • Scale • Boiler-mud