

Mehanizmi oštećenja cevi izlaznog međupregrejača pare nastali nakon 200.000 časova eksploatacije

VLADIMIR D. PAVKOV, Univerzitet u Beogradu,

Institut za nuklearne nauke „Vinča“, Institut
od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju, Beograd
ORCID: 0000-0002-9799-8713

GORDANA M. BAKIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Mašinski fakultet, Beograd
ORCID: 0000-0003-2171-0063

VESNA M. MAKSIMOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Institut za nuklearne nauke „Vinča“, Institut
od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju - Beograd
ORCID: 0000-0002-8326-4938

BRATISLAV M. RAJIČIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Mašinski fakultet, Beograd
ORCID: 0000-0002-6841-9989

ALEKSANDAR M. MASLAREVIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Mašinski fakultet, Beograd
ORCID: 0000-0002-3822-8145

NENAD Z. MILOŠEVIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Mašinski fakultet, Beograd
ORCID: 0000-0002-0301-3398

Originalni naučni rad

UDC: 620.1:621.181

DOI: 10.5937/tehnika2504403P

Toplotnostojani čelik klase 12H1MF već dugo godina se koristi u našim postrojenjima za izradu elemenata termoelektronskog sistema. Čelik 12H1MF se koristi za izradu posuda pod pritiskom, koje su izložene istovremenom dejstvu povišene temperature, kao i unutrašnjem i spoljašnjem pritisku. U ovom radu je izvršeno eksperimentalno ispitivanje koje se odnosi na vizuelnu i dimenzionu kontrolu, merenje tvrdoće, hemijsku analizu, kao i mikrostrukturnu karakterizaciju cevnog luka izrađenog od čelika 12H1MF. Cevni luk je dobijen hladnim savijanjem cevi izlaznog međupregrejača pare nakon 200.000 časova eksploatacije na temperaturi od 540°C i maksimalnom radnom pritisku od 4,6 MPa. Na osnovu dobijenih eksperimentalnih rezultata može se potvrditi da je cevni luk oštećen usled dejstva gasne korozije, kao i da je došlo po pojave razugljeničenja površinskog sloja materijala na spoljašnjoj površini cevi izloženoj dejstvu dimnih gasova, dok do degradacije materijala nije došlo i pored dugotrajne eksploatacije. Ispitivanjem je utvrđeno da nije došlo do pojave puzanja materijala što potvrđuje da nije narušen integritet ove cevi.

Ključne reči: toplotnostojani čelik, 12H1MF, gasna korozija, razugljeničenje

1. UVOD

Stanje i svojstva metalnih materijala od kojih su izrađene posude pod pritiskom za dugotrajni rad zahte-

vaju poseban nadzor i kontrolu. Oštećenja cevi kotla predstavljaju jedan od glavnih uzroka iznenadnih otkaza i zastoja termoelektrana čak i u najnaprednijim zemljama. To je zbog veoma složene međusobne povezanosti konstrukcionog rešenja i istorije rada svake pojedinačne kotlovske jedinice [1-3]. Iz tog razloga, strukturni integritet kotlovskih cevi predstavlja glavni cilj u savremenim programima održavanja termoelektrana.

Niskolegirani čelici, tipa Cr-Mo-V, se široko koriste za izradu komponenata u termoelektranama širom

Adresa autora: Vladimir Pavkov, Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke „Vinča“, Institut od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju, Beograd, Mike Petrovića Alasa 12-14

e-mail: pavkow@vin.bg.ac.rs

Rad primljen: 01.07.2025.

Rad prihvaćen: 21.07.2025.

sveta, kao što su Kina, Indija, Poljska, Rusija i zemalja bivšeg Sovjetskog Saveza poput Ukrajine, Litvanije i drugih, pa i u zemljama bivše Jugoslavije. Cevovodi termoelektrana su uglavnom napravljeni od toplotno-postojanog nisko legiranog čelika, u čiju grupu se svrstava i čelik klase 12H1MF koji se u literaturi označava i kao 1Cr0.3Mo0.25V [4, 5].

Komponente napravljene od niskolegiranog čelika 12H1MF imaju dobru otpornost na puzanje i nisu podložne stvaranju oksida, pa je ovaj čelik našao široku primenu u proizvodnji delova termoelektrana koji rade do 560°C i pod pritiskom do 20 MPa [6, 7]. Zbog složenosti radnih uslova, cevovodi su izloženi procesima različitih oštećenja, tj. postepene degradacije materijala, pa samim tim i smanjenju pouzdanosti.

Nepovoljne kombinacije dva osnovna činioca, materijal i radna sredina, izazivaju pojavu i odvijanje korozivnih procesa. Korozija, kao jedan od dominantnih mehanizama oštećenja, skraćuje vek trajanja opreme, smanjuje proizvodne kapacitete, poskupljuje održavanje, uzrokuje zastoje, havarije i nesreće. Iz tog razloga, problemu korozionog oštećenja i razaranju metalnih materijala, a naročito čelika, već godinama se posvećuje velika pažnja.

Hemijska korozija se odvija u neelektrolitima, usled čega nastaju jedinjenja metala sa nemetalima odnosno oksidi, sulfidi kao i druga jedinjenja u čvrstom stanju. Jedan od najvažnijih tipova hemijske korozije koji može da nastane u vrućim gasovima, kao što su dimni gasovi u kotlu termoelektrane, naziva se gasna korozija [8-10]. Ovaj tip korozije je posebno intenzivan kada su u dimnim gasovima prisutna sumporna jedinjenja SO_x kao posledica sagorevanja uglja u termoelektrani [11, 12]. Visoka koncentracija SO_2 u dimnim gasovima ne samo da igra ključnu ulogu u gasnoj koroziji, već i utiče na koroziju kondenzovane faze stvaranjem visoko korozivnih sumpornih kiselina [12].

Razugljeničenje, kao mehanizam oštećenja, predstavlja promenu u kvalitetu materijala pri čemu može da nastane kako u oksidacionoj tako i redukcionalnoj atmosferi [13-18]. Razugljeničenje je povezano sa mikrostrukturom materijala, a samim tim i sa njegovim svojstvima. Glavne posledice razugljeničenja su: smanjenje površinske tvrdoće, zatezne čvrstoće, otpornosti na habanje i zamor zbog gubitka ugljenika sa površine radnog dela izrađenog od čelika [19-21]. Međutim, prisustvo legirajućih elemenata kao što su: hrom (Cr), molibden (Mo), vanadijum (V) i volfram (W) značajno smanjuju brzinu razugljeničenja u čeliku [22].

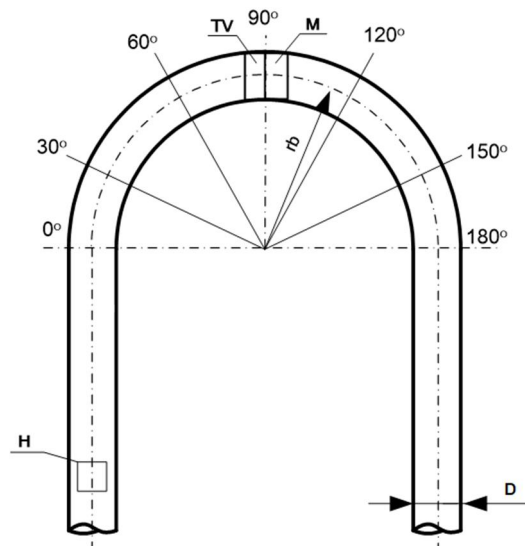
Cilj ovog naučnog rada je izvršiti eksperimentalno ispitivanje, koje se sastoji od vizuelne i dimenzione kontrole, merenja tvrdoće, hemijske analize i

mikrostrukturne karakterizacije cevnog luka izrađenog od cevi izlaznog međupregrejača pare, čelik klase 12H1MF, nakon 200.000 časova eksploatacije kako bi se utvrdilo mesto, vrsta i stepen oštećenja, odnosno definisali svi mehanizmi oštećenja i procenio integritet ove cevi.

2. MATERIJAL I METODE

Čelik 12H1MF je po svojim osnovnim svojstvima svrstan u niskolegirane toplotnopoostojane čelike sa feritno-perlitno-beinitnom strukturom [23], a prevažno je namenjen za izradu elemenata termoelektrani, kao i ostalih postrojenja. Čelik klase 12H1MF se pokazao kao izrazito pouzdan materijal tokom dugog vremena eksploatacije. Dimenzije cevnog luka, korišćenog u eksperimentu, predstavljene su u naučnom radu pod nazivom „Eksperimentalno i numeričko ispitivanje cevnog luka urađenog od cevi izlaznog međupregrejača pare nakon eksploatacije“ [24].

Karakterizacija cevnog luka se sastojala od: vizuelne kontrole, dimenzione kontrole, merenja tvrdoće, hemijske analize i analize mikrostrukture. Na slici 1 prikazan je tehnički crtež cevnog luka sa naznačenim mestima uzimanja uzoraka i ispitivanja, gde oznaka *M* predstavlja uzorak za metalografsko ispitivanje (poprečno i podužno), oznaka *TV* predstavlja uzorak za ispitivanje tvrdoće, dok oznaka *H* predstavlja uzorak za hemijsku analizu, a prikazani uglovi od 0 do 180°, sa korakom od 30°, korišćeni su kao mesta za dimenzionu kontrolu.



Slika 1 - Tehnički crtež cevnog luka sa naznačenim mestima za eksperimentalno ispitivanje i kontrolu

Dimenziona kontrola, odnosno merenje spoljašnjeg prečnika cevnog luka izvršeno je uz pomoć digitalnog kljunastog pomičnog merila (IP 60, Mitutoyo,

Japan) u cilju utvrđivanja ovalnosti cevi. Ovalnost cevi je merena na uglovima 0°, 30°, 60°, 90°, 120°, 150° i 180°. Na osnovu izmerenih vrednosti na cevnom luku: maksimalni spoljašnji prečnik cevi nakon savijanja D_{max} , minimalni spoljašnji prečnik cevi nakon savijanja D_{min} i nominalni spoljašnji prečnik cevi D izračunata je ovalnost cevnog luka prema jednačini (1) [25-27]:

$$Ovalnost = \frac{(D_{max} - D_{min})}{D} \cdot 100 [\%] \quad (1)$$

Jedan od važnih postupaka na području određivanja mehaničkih svojstava materijala je merenje tvrdoće. Merenje tvrdoće je izvršeno statičkom metodom ispitivanja, odnosno Vickersovom metodom. Vickersova metoda je univerzalna i primenjuje se za tvrde i meke materijale kao i materijale male debljine, što omogućava ovoj metodi široku primenu. Priprema površine za merenje tvrdoće se sastojala od čišćenja, odmašćivanja, brušenja i poliranja. Merenje tvrdoće je izvršeno pomoću Vickersovog uređaja (Buehler Identamet 1114, Germany). Merenje markotvrdoće po Vickersovoj metodi izvedeno je u skladu sa standardom SRPS EN ISO 6507-1:2023 [28] pri opterećenju 98,07 N (HV 10) i vremenu utiskivanja od 15 s.

Kvalitativna i kvantitativna hemijska analiza cevnog luka urađena je rendgenskom fluorescentnom spektrometrijom - XRF (eng. X-Ray Fluorescence Spectrometry) [29]. Hemijska analiza je izvršena na standardnom XRF uređaju (ED 2000, Oxford Instruments). XRF analiza nije destruktivna, ima veliku brzinu ispitivanja, mogućnost analize različitih materijala u različitim agregatnim stanjima, visoka preciznost i tačnost uz mogućnost istovremenog određivanja više elemenata, što svrstava ovu analizu u jednu od najprimenjivijih za ovaj eksperiment.

Da bi se utvrdili mehanizmi kao i stepen oštećenja kotlovske cevi tokom eksploatacije, izvršena je detaljna mikrostrukturalna karakterizacija. Mikrostrukturalna karakterizacija izvršena je na uzorku isečenom iz cevi uz pomoć optičke mikroskopije (eng. Light Microscopy) [30]. Mikrostrukturalna karakterizacija optičkom mikroskopijom analizirana je primenom optičkog mikroskopa (Axiovert 25, Carl Zeiss, Nemačka) opremljenog digitalnim fotoaparatom (WV-CD50, Panasonic, Japan). Mikrostrukturno ispitivanje obuhvatilo je posmatranje na cevnom luku, duž ose cevi i u poprečnom pravcu. Pre mikrostrukturne karakterizacije, uzorak je prebrušen i ispoliran, a potom nagrižen. Za nagrizanje je korišćeno sredstvo koje sadrži 3% rastvora azotne kiseline u alkoholu (3% Nital).

3. REZULTATI I DISKUSIJA

Na slici 2 je prikazano teme cevnog luka sa vidljivim površinskim oštećenjima u vidu kratera. Krateri na

površini cevnog luka su različitog oblika, veličine i dubine, a nastali su kao posledica dejstva gasne korozije tokom eksploatacije. Ova oštećenja predstavljaju mesta za inicijaciju prslina koja mogu da ugroze integritet cevnog sistema, a samim tim i celog postrojenja.



Slika 2 - Oštećenja na temenu cevnog luka u vidu kratera usled dejstva gasne korozije

U tabeli 1 predstavljeni su rezultati dimenzione kontrole, odnosno merenja ovalnosti cevnog luka u rasponu od 0° do 180°, slika 1. S obzirom da je spoljašnji prečnik ravne deonice cevnog luka 45 mm [24], nominalni prečnik, na temenu cevnog luka dolazi do odstupanja od te vrednosti. Najveći spoljašnji prečnik cevi D_{max} od 45,6 mm i najmanji spoljašnji prečnik cevi D_{min} od 42,5 mm se javljaju na temenu cevnog luka, odnosno na poziciji merenja od 90°. Ova dimenziona odstupanja se javljaju iz dva razloga: prvi, jer usled hladnog savijanja cevi, u cilju formiranja cevnog luka, dolazi do maksimalnog savijanja na temenu i zatezanja, dok je drugi usled neravnomernog smanjenja debljine zida cevi usled gubitka materijala izazvanog dejstvom gasne korozije.

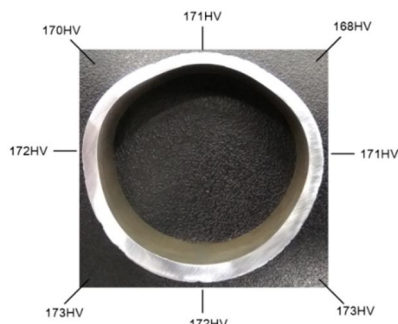
Tabela 1. Ovalnost cevnog luka

Mesto merenja	D_{max} [mm]	D_{min} [mm]	Ovalnost [%]
0°	44,9	43,7	2,67
30°	45,4	43,5	4,22
60°	45,6	43,0	5,78
90°	45,6	42,5	6,89
120°	45,3	43,0	5,11
150°	45,1	43,1	4,44
180°	45,0	43,5	3,33

Ukoliko se posmatraju rezultati ovalnosti cevnog luka, prikazani u tabeli 1, može se videti da su najmanje vrednost na uglovima 0° i 180° koje iznose 2,67% i 3,33% respektivno, dok se vrednosti povećavaju ka temenu cevnog luka dostižući maksimalnu vrednost od 6,89% na temenu 90°. S obzirom da je cev bila izložena dejstvu maksimalnog unutrašnjeg pritiska od 4,6 MPa tokom 200.000 časova, prema ASME standardu za cevni luk podložen unutrašnjem pritisku, ovalnost ne bi smela da prelazi 8% [26], što zadovoljava

ispitani cevni luk na svim uglovima merenje. Cevovodi koji su savijeni u cevni luk izvan tolerancijske ovalnosti mogu dovesti do pucanja ili ograničavanja protoka fluida što može narušiti integritet sistema.

Opšte je poznato da se tvrdoća čelika tokom eksploatacije smanjuje, jer materijal prolazi kroz niz različitih stepena degradacije mikrostrukture. Na slici 3 prikazano je teme cevnog luka sa naznačenim vrednostima Vickersove tvrdoće nakon 200.000 časova eksploatacije, gde se jasno vidi da cev nije savršenog kružnog poprečnog preseka. Minimalna vrednost tvrdoće iznosi 168 HV, dok maksimalna vrednosti iznosi 173 HV. U poređenju sa vrednostima tvrdoće iz standarda TY 14-3-460-2003 [31] koje su u opsegu od 137-199 HV za čelik 12H1MF, može se potvrditi da su vrednosti tvrdoće ovog čelika nakon eksploatacije i dalje u prihvatljivim granicama.



Slika 3 - Vrednosti Vickersove tvrdoće na temenu cevnog luka

U tabeli 2 prikazan je sadržaj hemijskih elemenata i njihov procentualni maseni udeo u čeliku 12H1MF nakon 200.000 časova eksploatacije. U poređenju sa vrednostima hemijskih elemenata za isti čelik iz standarda TY 14-3P-55-2001 [23], može se potvrditi da su vrednosti svih hemijskih elemenata u zadovoljavajućim granicama.

Tabela 2. Hemijska analiza čelika 12H1MF nakon 200.000 časova eksploatacije

Element	Uzorak [mas.%]	Standard [23] [mas.%]
Mn	$0,58 \pm 0,041$	$0,40 \div 0,70$
Cr	$1,02 \pm 0,036$	$0,90 \div 1,20$
Mo	$0,25 \pm 0,009$	$0,25 \div 0,35$
Ni	$0,13 \pm 0,024$	$\leq 0,25$
V	$0,18 \pm 0,027$	$0,15 \div 0,30$
Fe	$96,39 \pm 0,097$	ostatak

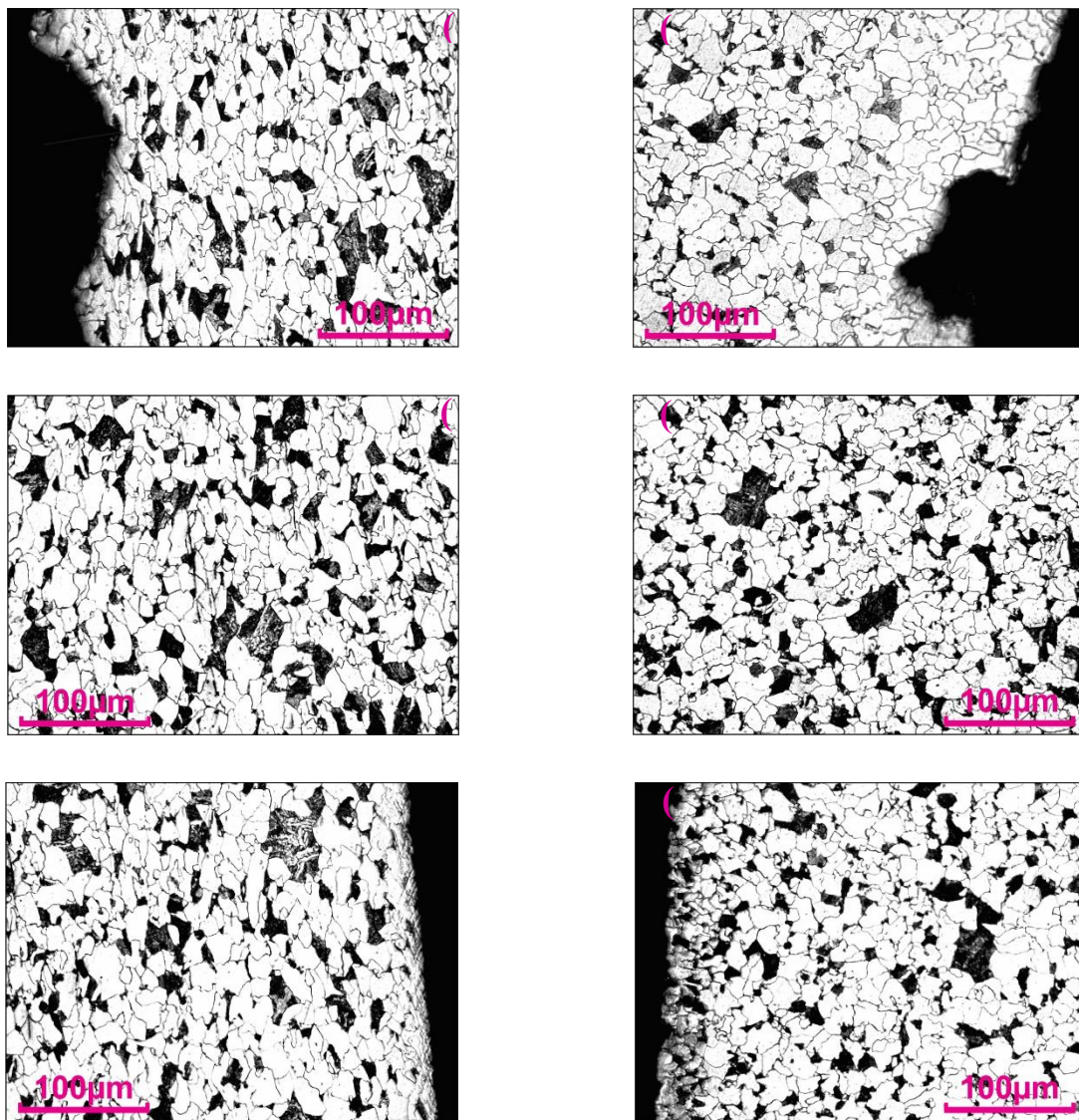
Optička mikroskopija korišćena je za sveobuhvatnu mikrostrukturnu karakterizaciju kotlovske cevi. Na slici 4 predstavljena je mikrostruktura cevi izlaznog međupregrejača pare nakon 200.000 časova rada pri radnoj temperaturi od 540°C i maksimalnom radnom pritisku od 4,6 MPa. Ova metoda sprovedena je u podužnom i poprečnom preseku uzorka cevi, na spoljašnjem, središnjem i unutrašnjem delu. Spoljašnji

deo se odnosi na površinu izloženu dejstvu dimnih gasova, dok se unutrašnji deo odnosi na površinu izloženu dejstvu pregrejane pare.

Na slici 4a prikazana je mikrostruktura spoljašnjeg dela uzorka na podužnom preseku. Na spoljašnjoj površini se jasno uočava veliki krater dubine oko 60 μm , kao posledica dejstva gasne korozije. Gasna korozija u ovom slučaju predstavlja oksidaciju čelika 12H1MF u atmosferi suvih gasova na visokoj temperaturi tokom eksploatacije. Radni uslovi koji dovode do pojave gasne korozije mogu se predstaviti kroz tri faktora: temperatura metala (povećanjem temperature, korozija je intenzivnija, oksidacija je jača, a difuzija brža), temperatura dimnog gasa (povećanje temperature gasa uzrokuje povećanje temperature metala, intenzivira se proces korozije, kontroliše se isparavanje korozionih jedinjenja) i višak vazduha (kontrolisana brzina razaranja metala, na taj način što nizak nivo viška vazduha sprečava obrazovanje korozionih produkata, odnosno oksida kao što su: SO_x , V_2O_5 , Fe_2O_3 , P_2O_5 , NiO_2 , itd.) [32]. Takođe, taloženje veoma agresivnog letećeg pepela na površini cevi međupregrejača pare, usled procesa sagorevanja uglja, ubrzava dejstvo gasne korozije.

Na slici 4b prikazana je mikrostruktura spoljašnjeg dela uzorka na poprečnom preseku. Na spoljašnjoj površini se jasno uočava veliki krater dubine oko 80 μm , kao posledica dejstva gasne korozije. Međutim, pored oštećenja usled gasne korozije uočava se i razugljeničenje površinskog sloja materijala, čija dubina iznosi približno 120 μm . Kao posledica zagrevanja čelika dolazi do razugljeničenja površinskog sloja materijala, odnosno do osiromašenja površinskog sloja ugljenikom. Potpuno razugljeničenje je poznato i kao „slobodni ferit“ [33], jer se feritni sloj transformiše na površini cevi u nedostatku ugljenika i jasno se raspoznaje po karakterističnoj beloj boji, što se jasno uočava na slici 4b. Tokom eksploatacije usled promena mikrostrukture može da dođe do smanjenja mehaničkih svojstava materijala i pojave prslina, što u ovom uzorku nije potvrđeno.

Na slici 4c koja prikazuje mikrostrukturu središnjeg dela uzorka na podužnom preseku, kao i slika 4d koja prikazuje mikrostrukturu središnjeg dela uzorka na poprečnom preseku, nisu uočeni mehanizmi oštećenja. Takođe, na slici 4e koja prikazuje mikrostrukturu unutrašnjeg dela uzorka na podužnom preseku, kao i slika 4f koja prikazuje mikrostrukturu unutrašnjeg dela uzorka na poprečnom preseku, nisu uočeni mehanizmi oštećenja. Mikrostrukturnom karakterizacijom čelika 12H1MF je potvrđeno da nije došlo do pojave puzanja materijala u izlaznom međupregrejaču pare tokom 200.000 časova eksploatacije, pri radnoj temperaturi od 540°C i maksimalnom radnom pritisku od 4,6 MPa.



Slika 4 - Mikrostruktura cevi izlaznog međupregrejača pare nakon 200.000 časova eksploatacije: a) podužni presek - spoljašnji deo uzorka, b) poprečni presek - spoljašnji deo uzorka, c) podužni presek - središnji deo uzorka, d) poprečni presek - središnji deo uzorka, e) podužni presek - unutrašnji deo uzorka, f) poprečni presek - unutrašnji deo uzorka

4. ZAKLJUČAK

Mnogi mašinski elementi, a naročito posude pod pritiskom, su tokom eksploatacije izloženi različitim mehanizmima oštećenja koji dovode do promene u strukturi materijala kao i mogućnosti narušavanja integriteta. Teški uslovi u kojima rade vitalni elementi kotla, zahtevaju da se materijali koji se koriste u kotlogradnji detaljno ispituju i kontrolišu kako bi mogli da ispune veoma visoke zahteve kvaliteta. Dugotrajno izlaganje cevi izlaznog međupregrejača pare, izrađenog od čelika klase 12H1MF, tokom 200.000 časova eksploatacije na povišenoj temperaturi od 540°C i maksimalnom unutrašnjem pritisku od 4,6 MPa, može da uzrokuje mikrostrukturne promene i oštećenja.

Na osnovu eksperimentalnog ispitivanja toplotno-postojanog čelika 12H1MF za date uslove rada, može se zaključiti sledeće:

- Vizuelnom kao i dimenzionom kontrolom uočena su spoljašnja površinska oštećenja na cevi različitog oblika, veličine i dubine, kao posledica dejstva gasne korozije tokom eksploatacije;
- Vrednosti Vickersove tvrdoće su u zadovoljavajućim granicama u skladu sa vrednostima iz standarda;
- Sadržaj hemijskih elemenata i njihove vrednosti su takođe u prihvatljivim granicama u poređenju sa standardnim vrednostima;
- Potvrđena je mikrostrukturna promena i oštećenja usled dejstva gasne korozije i razugljeničenje na

spoljašnjoj površini cevi, koja je izložena dimnim gasovima, dok središnji deo kao i unutrašnji deo cevi, izložen pregrejanoj pari, nisu pretrpeli mikrostrukturne promene i oštećenja;

- Na osnovu mikrostrukturne karakterizacije je potvrđeno da nije došlo do pojave puzanja materijala tokom eksploatacije.

Proces korozije nije moguće zaustaviti već samo kontrolisati i na taj način usporiti. U cilju kontrolisanja gasne korozije preporuka je da se koristi gorivo, u ovom slučaju ugalj, sa nižim sadržajem korozivnih agenasa, prvenstveno sumpornih jedinjenja.

Na osnovu sveobuhvatnih eksperimentalnih istraživanja, koja se odnose na vizuelnu i dimenzionu kontrolu, mehanička svojstva, hemijsku analizu i mikrostrukturnu karakterizaciju materijala, izvršenih kako u ovom radu tako i u publikovanom naučnom radu [24], može se sa sigurnošću potvrditi da integritet cevi izlaznog međupregrejača pare nije narušen, čak ni posle 200.000 časova rada, što još jednom potvrđuje zbog čega je čelik klase 12H1MF našao široku primenu u svetu za izradu kotlovskih cevi termoenergetskih postrojenja.

LITERATURA

- [1] Dooley R. B, McNaughton W. P. Boiler Tube Failures: *Theory and Practice: Water-Touched Tubes*, EPRI, Palo Alto, 1988.
- [2] Fontana M. G. *Corrosion engineering*, McGraw Hill International Editions, Singapore, 1987.
- [3] Sijacki Zeravcic V, Radovic M, Stamenic Z, Bakic G, Djukic M, Matic M. Types of Corrosion Damages on Domestic Power Plants, *Energy-Economy-Ecology*, Vol. 3, No. 1, p. 223, 1999.
- [4] Bakić G. M, Šijački Žeravčić V. M, Đukić M. B, Maksimović S. M, Plešinac D. S, Rajičić B. M. The thermal history and stress state of a fresh steam-pipeline influencing its remaining service life, *Thermal Science*, Vol. 15, No. 3, pp. 691-704, 2011.
- [5] Bakić G, Šijački-Žeravčić V, Đukić M, Maksimović V, Rajičić B. Material characterization of 1Cr0.25Mo0.25V power plant steel after prolonged service, in *First Metallurgical & Materials Engineering Congress of South-East Europe 2013*, Belgrade, Serbia, pp. 387-393, 2013.
- [6] Bugaj N. V, Berezina T. G, Trunin I. I. *Service ability and Longtime Behaviour of Metal at Thermal Power Plants*, Ehnergoatomizdat, Moscow, 1994.
- [7] Krutasova E. I. *Metal Reliability at Thermal Power Plants*, Ehnergoatomizdat, Moscow, 1981.
- [8] Gribelja V. I. Tehnika borbi s korrozijem, *Hemija*, Leningrad, 1978.
- [9] Mladenović S, Petrović M, Rikovski G. *Korozija i zaštita materijala*, IRO „Rad“, Beograd, 1985.
- [10] Chandler K. A. *Marine and Offshore Corrosion*, Butterworths, London, 1985.
- [11] Brkić Lj, Živanović T. *Parni kotlovi*, Mašinski fakultet, Beograd, 1999.
- [12] Zeng Y, Li K, Hughes R, Luo J-L. Corrosion Mechanisms and Materials Selection for the Construction of Flue Gas Component in Advanced Heat and Power Systems, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 56, pp. 14141-14154, 2017.
- [13] Thielsch H. *Defects and Failures in Pressure Vessels and Piping*, Reinhold Publishing Corporation, New York, 1965.
- [14] Tajra S, Otani R. T teorija vysokotemperaturnoj procenosti materiaow, *Mietaurgija*, Moskwa, 1986.
- [15] Guljajev A. P. Metallovedenie, *Mietaurgija*, Moskwa, 1986.
- [16] Hertsberh R. V. Deformatsiia i mekhanika ruinuvannia konstruksiiynykh materialiv, *Mietaurgija*, Moskwa, 1989.
- [17] Karastojković Z, Kovačević Z. Metalografsko ispitivanje delovanja kotlovske vode i vodene pare na koroziju kotlovskih cevi, *Međunarodno savetovanje „Industrijske vode“*, Pančevo, Srbija, pp. 173-178, 1995.
- [18] VGB Technischen Vereinigung der Grosskraftwerksbetreiber, Guideline for the Assessment of Microstructure and Damage Development of Creep Exposed Materials for Pipes and Boiler Components, Essen, pp. 8-88, 1992.
- [19] Pimenta C. D, Silva M. B, Ribeiro R. B, Silva Marins FA. Research on Decarburization of Steel Wire SAE 51B35 during Heat Treatment, *International Journal of Innovative Research and Development* (ISSN 2278-0211), Vol. 6, No. 3, pp. 48-53, 2017.
- [20] Šijački Žeravčić V, Bakić G, Đukić M, Anđelić B. Failures at elevated temperatures, in Sedmak S. and Radakovic Z. (Ed.), *The Challenge of Materials and Weldments, Structural Integrity & Life Assessment*, International Monograph from 9th Int. Frac. Mech. School, DIVK, TMF, Goša, Zlatni Pjasci, Bulgaria, pp.183-202, 2008.
- [21] Voort GFV. Understanding and measuring decarburization: Understanding the forces behind decarburization is the first step toward minimizing its detrimental effects, *Advanced Materials and Processes*, Vol. 173, No. 2, pp. 22-27, 2015.
- [22] ASM Handbook. Steel Heat Treating Technologies, ASM International, *Materials Park*, OH, Vol. 4B, 2014.
- [23] ТУ 14-3Р-55-2001. Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов, 2001.
- [24] Pavkov V. D, Bakić G. M, Maksimović V. M, Petrović A. Lj, Mitrović N. R, Mišković Ž. Z. Eksperimentalno i numeričko ispitivanje cevno luka ura-

- denog od cevi izlaznog međupregrejača pare nakon eksploatacije, *Hemijska Industrija*, Vol. 74, No. 1, pp. 51-63, 2020.
- [25]Randhawa K. Ovality in Pipes, *International Journal of Latest Technology in Engineering, Management & Applied Science*, Vol. VI, No. VIIS, pp. 44-46, 2017.
- [26]ASME B31.1-2022. Power Piping, 2022.
- [27]Kemp D, Finneran S, Gossard J, Bratton J. Evaluating pipeline ovality acceptability criteria for straight pipe sections, in *11th International Pipeline Conference - IPC2016*, Calgary, Alberta, Canada, pp. 1-7, 2016.
- [28]SRPS EN ISO 6507-1:2023. Metalni materijali – Ispitivanje tvrdoće po Vickersu – Deo 1: Metoda ispitivanja, 2023.
- [29]Shackley S. M. *X-Ray Fluorescence Spectrometry (XRF) in Geoarchaeology*. Springer, 2011.
- [30]Murphy D. B, Davidson M. W. *Fundamentals of Light Microscopy and Electronic Imaging*. 2nd ed, John Wiley & Sons, New Jersey, 2013.
- [31]ТУ 14-3-460-2003. Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов, 2003.
- [32]Filipović N. Analiza oštećenja termoeenergetske opreme korozijom. *Structural Integrity and Life* Vol. 7, No.2, pp. 121-128, 2007.
- [33]Rothleutner L. How to keep decarburization in check, *Thermal processing*, Vol. 8, No. 5, pp. 20-21, May 2019.

SUMMARY

DAMAGE MECHANISMS OF A STEAM INTER-HEATER OUTPUT TUBE AFTER 200,000 HOURS OF EXPLOITATION

Heat-resistant steel grade 12H1MF has been used for many years in domestic thermal power plants for the production of elements within the thermal energy system. Steel 12H1MF is used for manufacturing pressure vessels, which are exposed to the simultaneous effect of elevated temperature and internal and external pressure. In this study, an experimental investigation was conducted, including visual and dimensional control, hardness testing, chemical analysis, and microstructural characterization of a U-bend tube made of 12H1MF steel. The U-bend tube was formed by cold bending a steam inter-heater output tube after 200,000 hours of exploitation at a temperature of 540 °C and a maximum working pressure of 4.6 MPa. Based on the obtained experimental results, it can be confirmed that the U-bend tube was damaged due to the effect of gas corrosion, as well as that there was decarburization of the surface layer of the material on the outer surface of the tube exposed to the impact of flue gases, while the degradation of the material did not occur despite long-term exploitation. The examination determined that there was no material creep, which confirms that this tube's integrity was not damaged.

Key Words: heat-resistant steel, 12H1MF, gas corrosion, decarburization