

Eksperimentalno i numeričko ispitivanje cevnog luka urađenog od cevi izlaznog međupregrejača pare nakon eksploatacije

Vladimir D. Pavkov¹, Gordana M. Bakić², Vesna M. Maksimović¹, Aleksandar Lj. Petrović², Nenad R. Mitrović² and Žarko Z. Mišković²

¹Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke Vinča, Beograd, Srbija

²Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, Srbija

Izvod

Jedan od važnih zadataka procene integriteta mašinskih elemenata i konstrukcija je određivanje lokalnih mehaničkih svojstava. U ovom radu izvršeno je eksperimentalno i numeričko ispitivanje mehaničkih svojstava cevi, izlaznog međupregrejača pare, izrađenog od toplotnopoštojanog čelika 12H1MF, nakon 200.000 h rada. Cev izlaznog međupregrejača pare je isečena iz cevnog sistema tokom remonta termoelektrane, a potom hladno deformisana savijanjem, u cilju dobijanja cevnog luka, za potrebe eksperimenta. Namenski je konstruisan držač za ispitivanje takvog uzorka. Eksperimentalno istraživanje je bazirano na primeni 3D metode korelacije digitalnih slika, dok je metoda konačnih elemenata primenjena u numeričkoj simulaciji. Metoda 3D korelacije digitalnih slika predstavlja optičku i beskontaktnu eksperimentalnu metodu koja omogućava merenje polja pomeranja i deformacija geometrijski kompleksnih struktura. Za eksperimentalnu analizu kao i verifikaciju numeričkog modela korišćen je sistem Aramis, baziran na metodi korelacije digitalnih slika. Na osnovu dobijenih rezultata i uporedne analize eksperimentalnih i numeričkih vrednosti, koje se odnose na fon Mizesove deformacije na temenu cevnog luka, javlja se odstupanje od oko 18 %. Ovo odstupanje nastaje kao rezultat korišćenih metoda koje imaju bitne razlike u njihovim početnim uslovima ispitivanja.

Ključne reči: čelik 12H1MF; gasna korozija; korelacija digitalnih slika; metoda konačnih elemenata.

Dostupno na Internetu sa adrese časopisa: <http://www.ache.org.rs/HI/>

NAUČNI RAD

UDK: 519.63:(621.184.3+620.193.22)

Hem. Ind. 74(1) 51-63 (2020)

1. UVOD

Jedan od najodgovornijih elemenata savremenih parnih kotlova predstavljaju pregrejači pare. Da bi se smanjila grejna površina pregrejača pare i pojeftinila investicija za njihovu izgradnju, oni se postavljaju u oblasti najviših temperatura gasova u kojima je najveća neravnomernost temperaturnog polja. Iz tog razloga, pregrejači pare predstavljaju grejne površine koje rade u najnepovoljnijim radnim uslovima. Konvektivni pregrejači pare smešteni su u gasnom kanalu i sastoje se od cevni zmijski priključenih na ulazni i izlazni kolektor.

Radni uslovi cevovoda su takvi da statička, dinamička i toplotna opterećenja nastaju od radnog pritiska, povišene temperature, sopstvene težine, spoljašnjeg opterećenja kao i perioda uključenja i isključenja bloka u termoelektrani [1]. Zbog složenosti radnih uslova, cevovodi su izloženi procesima postepene degradacije, pa samim tim i smanjenju radnih performansi i pouzdanosti.

U eksploataciji termoenergetskih postrojenja, bespovratni gubici metala nastali kao posledica dejstva korozije, mogu prouzrokovati havarijska isključenja postrojenja, pa samim tim i značajne materijalne gubitke. S obzirom na gubitke materijala, veliki značaj ima gasna korozija u atmosferi suvih gasova usled visoke temperature [2]. Kod termoenergetskih postrojenja, gasna korozija može da bude izražena kod cevni sistema kotla, usled prisustva sumpornih jedinjenja u

Korespondencija: Vladimir D. Pavkov, Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke Vinča, Beograd, Srbija

E-mail pavkow@vin.bg.ac.rs

Rad primljen: 05. septembar 2019.

Rad prihvaćen: 18. februar 2020.

<https://doi.org/10.2298/HEMIND190905005P>



dimnim gasovima [3]. Iz tog razloga, treba imati u vidu da na spoljašnjoj površini cevi izlaznog međupregrejača pare tokom eksploatacije deluju različiti mehanizmi oštećenja, a jedan od njih je i gasna korozija koja izaziva gubitak materijala i obezbeđuje lokaciju za iniciranje i širenje prsline, naročito na mestima velike koncentracije napona poput cevno luka.

Glavni cevovodi za paru, kroz koju se pregrejana para napaja iz kotla u turbinu, klasifikuju se kao posebno opasni i kritični elementi energetskih blokova termoelektrana, pri čemu se obično izrađuju od legiranih čelika otpornih na toplotu. Čelici za rad na povišenim temperaturama koriste se za izradu delova koji su tokom eksploatacije izloženi visokom opterećenju i temperaturi u dužem vremenskom periodu (cevi pregrejača pare, parovodi, parni kolektori itd.). U Evropi je bilo zapaženo da se određeni čelici sa ruskog tržišta, koji po svom hemijskom sastavu nemaju pandan na evropskom tržištu, kao što je čelik 12H1MF, koriste pouzdano tokom veoma dugih vremena eksploatacije. Od toplotnopoostojanih čelika korišćenih za energetska postrojenja i opremu, u istočnim zemljama pa i u R. Srbiji, zastupljen je čelik 12H1MF koji se dobro pokazao prilikom dugotrajne eksploatacije opreme koja radi na temperaturama do 560 °C i pri pritiscima do 20 MPa [4,5].

Danas se merenje deformacije može vršiti na različite načine u inženjerskoj praksi, pri čemu se tehnike merenja deformacije mogu podeliti u dve velike grupe: kontaktne i beskontaktne. Beskontaktne metode merenja deformacije su se ubrzano razvijale poslednjih decenija, a jedna od njih je metoda korelacije digitalnih slika.

Metoda 3D korelacije digitalnih slika (*engl.* Digital Image Correlation – DIC) [6-9] prevazilazi ograničenja konvencionalnih eksperimentalnih metoda, kao što su merne trake, i tako omogućava potpuno merenje polja pomeranja i deformacije. Jedno eksperimentalno merenje omogućava prikupljanje velikog broja podataka koji zamenjuju veliki broj mernih traka, što utiče na smanjenje vremena pripreme eksperimenta, pa samim tim i troškova. Trodimenzionalna DIC metoda ima veliku preciznost (do 1 µm) i može da se koristi za ispitivanje različitih materijala [10-15], ispitivanje strukture [16-23], verifikaciju modela [23-27], mehaniku loma [28-30] itd. Metoda je takođe pogodna i za analizu nepravilnih geometrija objekata izrađenih od različitih materijala [31]. Merenje, primenom DIC metode, se zasniva na upoređivanju serije uzastopnih slika dobijenih u vremenskom intervalu tokom ispitivanja.

S druge strane, metodom konačnih elemenata - MKE (*engl.* Finite Element Method - FEM) mogu da se izračunaju polja pomeranja i deformacije ispitanog uzorka, a potom se može izvršiti verifikacija numeričkog modela poređenjem sa eksperimentalnim rezultatima predstavljenim na isti način.

Cilj ovog rada je ispitati cevni luk, izlaznog međupregrejača pare, nakon 200.000 h provedenih u eksploataciji gde je bio izložen gasnoj koroziji, usled dejstva spoljašnjeg pritisknog opterećanja, primenom eksperimentalne 3D DIC metode i numeričke analize MKE, kao i proceniti njihovu pouzdanost.

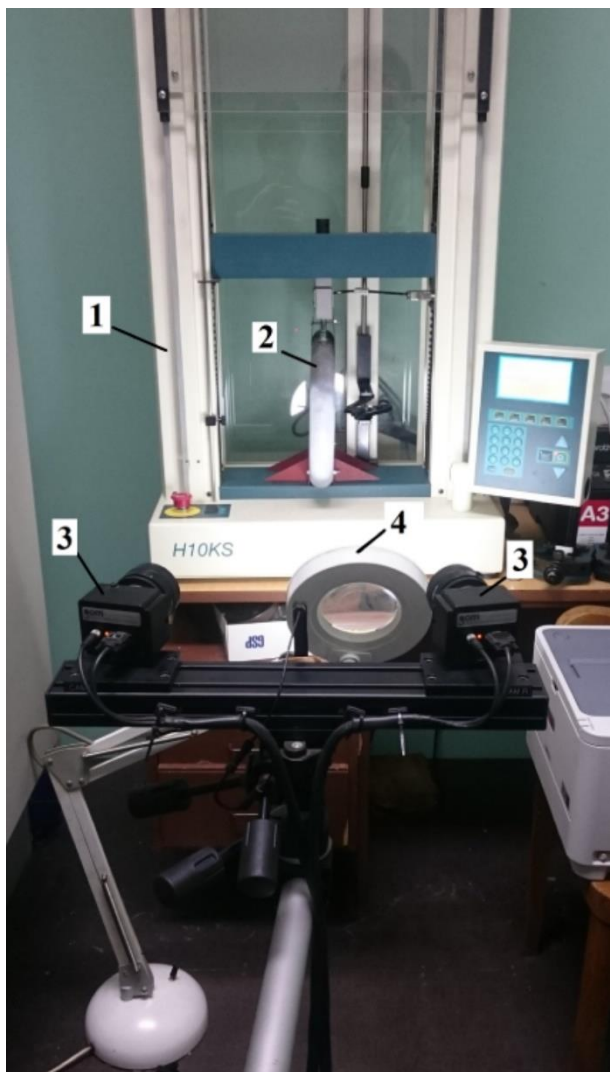
2. MATERIJALI I METODE

U ovom radu je ispitana cev izlaznog međupregrejača pare iz termoelektrane snage 210 MW. Cev je bila u eksploataciji 200.000 h pri radnoj temperaturi od 540 °C i maksimalnom radnom pritisku od 4,6 MPa. Za potrebe eksperimenta, cev je savijena procesom hladne deformacije, pri čemu je dobijen cevni luk. Grejna površina koja je bila na raspolaganju za ispitivanje nije imala nijedan cevni luk sa uglom od 180° koji je neophodan za eksperiment, jer je grejna površina sačinjena od cevnih lukova od 90° koji su povezani ravnim deonicama. To je razlog zašto je cevni luk izrađen od prave deonice cevi. Cevni luk je napravljen od niskolegiranog Cr-Mo-V čelika za rad na povišenim temperaturama, klase 12H1MF (u literaturi se može naći pod oznakom 12X1MΦ po ruskom standardu ili 12KH1MF na engleskom govornom području [32]). Na slici 1.a prikazan je cevni luk nakon eksploatacije i savijanja, dok su na slici 1.b prikazane dimenzije cevno luka, sa tri otvora namenjena za vijke, za potrebe eksperimenta.

Za realizaciju eksperimenta namenski je napravljen držač za cevni luk koji je izrađen od konstrukcionog čelika S235 (EN 10025) i sastoji se od dva oslonca i četiri stopice. Dimenzije oslonca su 267×2×290 mm, sa četiri otvora prečnika 5,5 mm. Dimenzije stopice su 100×2×50 mm. Stopice su procesom zavarivanja elektrolučnim postupkom spojene sa osloncem, pri čemu su dve stopice zavarene za jedan oslonac. Držač je uz pomoć četiri vijka, dimenzije M5×60 mm, pričvršćen za cevni luk. Tri vijka, koja se nalaze u istoj ravni, prolaze kroz cevni luk, dok je četvrti vijak postavljen 15 mm

koji su korišćeni za merenje deformacije cevnog luka, su: sočiva kamere 50 mm, udaljenost kamere od mernog objekta 800 mm, kalibraciona ploča CP 20/90/D07210, veličina merne zapremine 105/80/55 mm, ukupan broj slika (po jednom merenju) 77, odstupanje kalibracije 0,033.

Eksperimentalna postavka, koju čine: mikrokidalice, cevni luk sa držačem, kamere i LED osvetljenje prikazani su na slici 4.



Slika 4. Eksperimentalna postavka (1 - mikrokidalice, 2 - cevni luk sa držačem, 3 - kamera, 4 - LED osvetljenje)

Figure 4. A photograph of the experimental set-up (1 - Mechanical dynamic and static material testing machine, 2 - U-bend tube with the holder, 3 - Camera, 4 - LED lighting)

Nakon eksperimentalnog ispitivanja cevnog luka, primenom metode korelacije digitalnih slika, a pre numeričke analize, koja je sprovedena korišćenjem metode konačnih elemenata u softverskom paketu *Abaqus*, izvršeno je ispitivanje mehaničkih svojstava čelika 12H1MF nakon 200.000 h eksploatacije. Zahtevana mehanička svojstva čelika 12H1MF na sobnoj temperaturi, prema standardu [33,34], su: napon tečenja 274 MPa, zatezna čvrstoća 441 - 637 MPa, procentualno izduženje 21 %, modul elastičnosti 210 GPa i Poasonov koeficijent 0,3.

U cilju upoređivanja eksperimentalne i numeričke analize temena cevnog luka, kao i poređenja mehaničkih svojstava čelika 12H1MF nakon eksploatacije sa vrednostima iz standarda [33,34], neophodno je sprovesti ispitivanje zatezanjem. Ispitivanje jednoosnim zatezanjem je sprovedeno na hidrauličnoj kidalici (P50, ZIM, SSSR). Standard za ispitivanje zatezanjem je ISO 6892-1:2016, metoda B. Ispitivanje je izvršeno na sobnoj temperaturi, bez ekstenzometra. Epruveta je isečena iz pravog dela cevnog luka. Tip epruvete je proporcionalna (standardna) epruveta sa koeficijentom proporcionalnosti $k = 5,65$ [35]. Položaj epruvete u odnosu na pravac izrade cevi je uzdužni. Dimenzije epruvete su date u tabeli 1, gde je: a_0 – debljina zida cevi, b_0 – širina uzdužne trake uzete iz cevi, D_0 – spoljašnji prečnik cevi na kome je

isečena epruveta, S_0 – početna površina poprečnog preseka, L_0 – početna merna dužina epruvete i L_u – dužina epruvete posle kidanja.

Tabela 1. Dimenzije epruvete (5,65) za jednoosno ispitivanje zatezanjem
Table 1. Dimensions of the sample (5,65) for the uniaxial tensile test

| a_0 / mm | b_0 / mm | D_0 / mm | S_0 / mm | L_0 / mm | L_u / mm |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 3,00 | 15,00 | 44,50 | 46,04 | 40,00 | 51,60 |

2. 1. Eksperimentalni postupak

Kao posledica složene prostorne konfiguracije parnog cevovoda, naponsko stanje u pojedinim elementima može biti veoma teško za izračunavanje bez znanja promenljivih koje se mogu meriti, poput deformacije [36].

Korišćenjem sistema za optičko merenje pomeranja i deformacija, definisane su i razvijene odgovarajuće procedure ispitivanja. Eksperiment je sproveden prema sledećoj proceduri:

1. *Priprema uzorka.* S obzirom da je cev bila u eksploataciji, što se jasno vidi sa slike 1.a, neophodno je očistiti spoljašnju površinu uzorka kako bi imala dobar kontrast u cilju jasne raspodele piksela na slikama kamere. Nakon čišćenja, prvo se na površinu nanosi beli sloj, a potom crna stohastična šara, pri čemu se crne tačke koriste kao referentne za analizu Aramis sistemom. Na slici 5.a je prikazan cevni luk sa stohastičnom šarom pričvršćen za držač. Sa slike se uočava da je površina cevnog luka oštećena, naročito u zoni izloženoj zatezanju, dok je prelaz iz luka u pravcu cevi pravilan. Površinska oštećenja, gubitak materijala sa površine i izražena hrapavost, su posledica gasne korozije u kotlu termoelektrane, gde se cev nalazila tokom 200.000 h rada. Na slici 5.b je prikazano teme cevnog luka sa kraterima na površini usled dejstva gasne korozije.



Slika 5. Teme cevnog luka pričvršćenog na držač: a) fotografija stohastične šare; b) krateri i hrapavost na temenu cevnog luka kao posledica gasne korozije

Figure 5. Top of the U-bend tube attached to the holder: a) a photograph of the stochastic pattern; b) craters and roughness on the top of the tube as a result of gas corrosion

2. *Izbor merne zapremine.* Izbor merne zapremine je u funkciji veličine uzorka i oblasti od interesa na uzorku, što je u ovom slučaju teme cevnog luka.

3. *Kalibracija sistema.* Pre eksperimenta, izvršena je kalibracija Aramis sistema prema izabranoj mernoj zapremini uz pomoć kalibracione ploče CP 20/90/D07210. Tokom procesa kalibracije, određuje se konfiguracija senzora, što se odnosi na određivanje međusobne udaljenosti i orijentacije kamera.

4. *Pozicioniranje uzorka.* Uzorak, cevni luk sa držačem, postavljen je normalno na osu kretanja čeljusti mikrokidalice, dok je spoljašnja površina temena cevnog luka okrenuta prema kamerama. Rastojanje od početka cevnog luka do ose čeljusti mikrokidalice, u ovom slučaju vijka, iznosi 190 mm. Ovo rastojanje je primenjeno iz dva razloga: prvo, zbog maksimalnih dimenzija radnog postolja mikrokidalice, a drugo da bi tokom ispitivanja cevni luk bio u oblasti linearne elastičnosti.

5. *Merenje.* Merenje je izvedeno nakon uspešne kalibracije. Cevni luk je postepeno opterećivan silom koja je imala brzinu pomeranja 1 mm/min. Maksimalno eksperimentalno opterećenje je bilo 4922 N. Maksimalna sila korišćena u eksperimentalnoj analizi je u funkciji ograničenja mikrokidalice. Digitalne slike su automatski snimljene, pre opterećenja, na svakih 5 s tokom opterećanja i odmah nakon rasterećenja uzorka. Prvi snimljeni par slika, pre dejstva sile, je referentan za obradu podataka. Broj snimljenih parova slika iznosi 77.

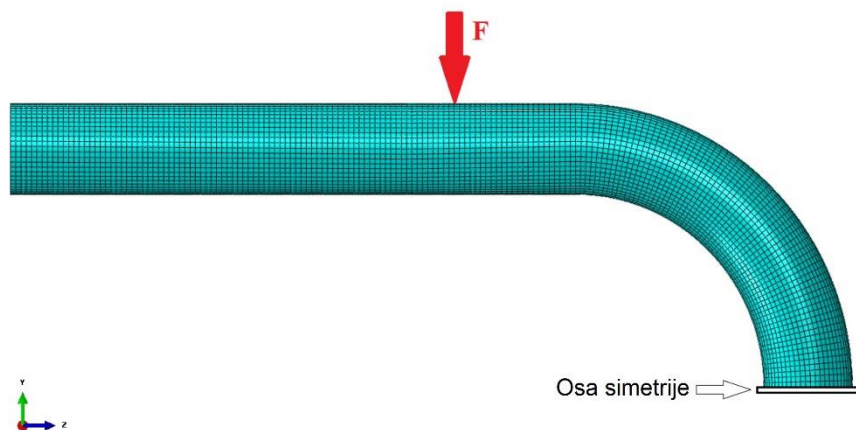
6. *Obrada podataka.* Nakon rasterećenja uzorka, proračun je izvršen korišćenjem softvera Aramis. DIC oprema i softver Aramis 2M koji se koriste u ovom radu imaju preciznost deformacije od 0,01 % [37].

2. 2. Numerički model

Strukturalna analiza parnog cevovoda najčešće se vrši primenom namenskog računarskog softvera, sa jednostavnim matematičkim modelom i numeričkim rešavanjem sistema jednačina. Analiza naponskog stanja cevovoda može se napraviti modeliranjem zida cevi konačnim elementima tipa ljuste ili 3D konačnim elementima. Modeliranje konačnim elementima tipa ljuste primenjuje se u situaciji kada se zidovi cevovoda mogu smatrati tankim ljustkama.

Metoda konačnih elemenata (MKE) je korišćena kao alat za numeričku analizu ponašanja cevnog luka usled dejstva pritisknog opterećenja. MKE je primenjena da bi se proverilo da teme cevnog luka, pri maksimalnoj sili od 4922 N dobijenoj na mikrokidalici tokom eksperimenta, nije u oblasti plastične deformacije, kao i da se proceni pouzdanost dobijenih rezultata ovom metodom u cilju upoređivanja sa eksperimentalnim rezultatima. Programski paket za MKE koji je korišćen u ovom radu je *Abaqus* [38-44].

Numerički model teži da bude što približniji eksperimentalnim uslovima. Pošto su model i primenjena geometrija opterećenja simetrični, samo je jedna polovina modela analizirana i prikazana, dok je držač zanemaren, slika 6. Držač je imao značaja u eksperimentu, kako bi se onemogućilo pomeranje donje polovine uzorka, pričvršćenog sa tri vijka, duž x i z osa i tako izbeglo potencijalno pomeranje i obrtanje cevnog luka oko sopstvene ose, dok je njihovo prisustvo u numeričkoj analizi nepotrebno. Tokom numeričke analize, sila dejstva utiskivača od 4922 N je u tački, na rastojanju 190 mm od početka cevnog luka.



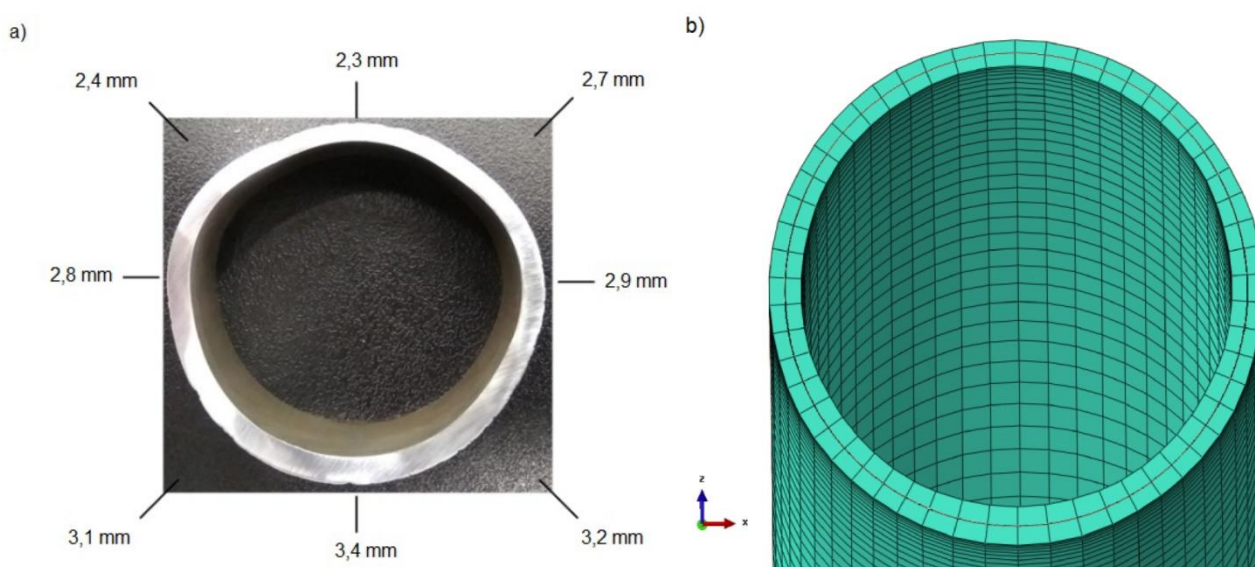
Slika 6. Numerički model korišćen u analizi

Figure 6. Numerical model used in the analysis

Mreža je generisana tako da se problem simulira što je bliže moguće eksperimentu. Za ispitivanje cevnog luka u softveru *Abaqus* korišćen je tip konačnog elementa S8R [45], slika 6, kako bi se preciznije odredilo naponsko stanje, koje

potiče od spoljašnjeg opterećenja. Tip konačnog elementa S8R je strukturni element koji pripada debelim ljuskama, odnosno to je četvorougao ni dvodimenzionalni element sa 8 čvorova po elementu. Broj tačaka integracije po debljini elementa je 5. Model se sastoji od 9396 elemenata i 28296 čvorova. Svi čvorovi smešteni na ravni simetrije imaju ograničeno pomeranje u pravcu x ose.

Nakon završenog eksperimentalnog ispitivanja, primenom DIC metode, a u cilju izrade što tačnijeg modela za numeričku analizu, cevni luk je presečen na temenu, odnosno na mestu ose simetrije, slika 6. Na slici 7.a je prikazana promena debljina zida cevi na temenu cevnog luka. Sa slike se jasno vidi da ja na mestu zatezanja cevnog luka, oblast koja se ispituje, najmanja vrednost debljine zida cevi, koja iznosi 2,3 mm, dok je na mestu pritiska cevnog luka vrednost debljine zida cevi najveća i iznosi 3,4 mm. Uzrok ovakve raspodele debljine, na temenu cevnog luka, je obrada hladnom deformacijom tj. savijanjem cevi za potrebe eksperimenta, kao i drugih uticajnih faktora poput korozije, abrazije i sl.. Usled formiranja cevnog luka iz ravne deonice cevi, tokom procesa savijanja u hladnom stanju, uneti su zaostali naponi. Međutim, tokom numeričke simulacije oni nisu uzeti u obzir. Na slici 7.b je prikazano teme cevnog luka na numeričkom modelu, sa usvojenim vrednostima debljine zida cevi prema realnom uzorku, koji će biti korišćen u daljoj analizi.



Slika 7. Promena debljine zida cevi na temenu cevnog luka a) eksperimentalne vrednosti; b) numerički model sa usvojenim izmerenim vrednostima

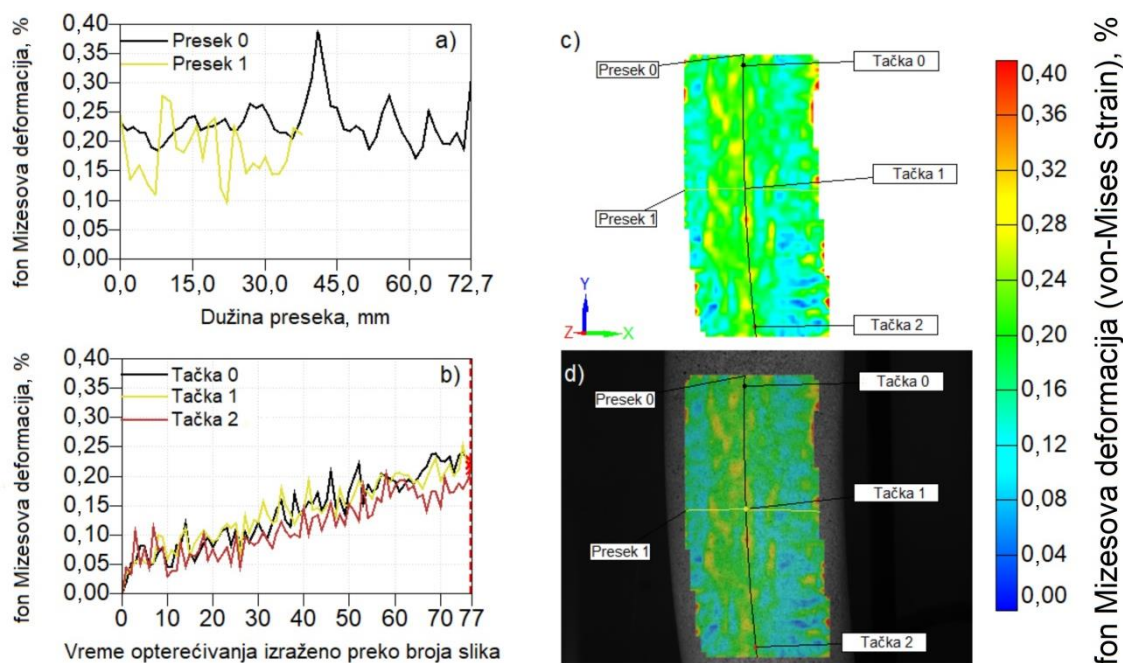
Figure 7. Variations in the thickness of the tube wall at the top of the U-bend tube: a) experimental values; b) numerical model with adopted measured values

Mehanička svojstva čelika 12H1MF, od kojeg je izrađen cevni luk, a koja su korišćena u analizi MKE su: modul elastičnosti 210 GPa i Poasonov koeficijent 0,3 s obzirom da je ispitivanje obavljeno u oblasti linearne elastičnosti.

3. REZULTATI I DISKUSIJA

Rezultati fon Mizesove deformacije za maskimalnu silu od 4922 N predstavljeni su na slici 8. Deformaciono polje je analizirano korišćenjem Preseka 0 i Preseka 1, kao i Tačke 0, Tačke 1 i Tačke 2, slika 8. Presek 0 je postavljen vertikalno (crna linija) i njegova dužina iznosi 72,7 mm, dok je Presek 1 (žuta linija) postavljen horizontalno i njegova dužina je 37 mm. Sve tri posmatrane tačke (Tačka 0 – crna, 1 – žuta, 2 – crvena) su postavljene na Presek 0, dok je Tačka 1 pozicionirana na preseku osa, odnosno na temenu cevnog luka. Međusobno rastojanje između posmatranih tačaka je oko 35 mm.

3D fon Mizesovo deformaciono polje na površini uzorka (slike 8.c i 8.d) pokazuje najveće vrednosti (crvena boja), na ivicama i u blizini središta temena cevnog luka. Vrednosti fon Mizesove deformacije su date grafički kao funkcije dužine preseka, slika 8.a, i posmatranih tačaka u funkciji vremena opterećivanja izraženog preko broja slika, slika 8.b. Oštri vrhovi na Presecima 0 i 1, slika 8.a, odgovaraju poziciji središta temena cevnog luka, pri čemu najveća vrednost deformacije iznosi 0,39 % na Presecu 0, dok je najveća vrednost deformacije 0,27 % na Presecu 1. Posmatrane Tačke 0-2, slika 8.b, imaju isti trend rasta deformacije sa povećanjem opterećenja i njihove najveće vrednosti su oko 0,20 %.



Slika 8. Eksperimentalno određena fon Mizesova deformacija za maksimalnu silu od 4922 N. a) Vrednosti fon Mizesove deformacije u funkciji dužine preseka, b) vrednosti fon Mizesove deformacije u funkciji vremena opterećivanja izraženog preko broja slika, c) polje fon Mizesovih deformacija, d) fotografija uzorka sa fon Mizesovom deformacijom

Figure 8. Experimental von Mises strain for the maximum force of 4922 N. a) von Mises strain as a function of the Section length, b) von Mises strain as a function of the Strain stage, c) von Mises strain field, d) a sample photograph with the overlaying von Mises strain field

3D metoda digitalne korelacije slika ima neka ograničenja. S obzirom da se 3D računanje mernih tačaka zasniva na pikselima koji treba da se vide sa desne i leve kamere uz individualni obrazac fasete (male površine), tako ispravan 3D proračun i izračunavanje deformacija nije moguće za ivice uzorka, cevnog luka. Iz tog razloga, velike vrednosti deformacije (crvena boja), koje se mogu jasno videti na ivicama deformacionog polja (slike 8.c i 8.d) predstavljaju sistemske greške i ne uzimaju se u obzir.

Takođe, može se primetiti da postoje iznenadne promene deformacionih zona (slike 8.c i 8.d), kao i da se ne može napraviti logična zavisnost promene deformacionih polja. Do ovih rezultata dolazi usled šuma na slikama polja deformacije. Šum je manifestovan u obliku malih žutih i crvenih polja, odnosno polja koja imaju znatno veće vrednosti deformacije od realnih. Do nastanka šuma dolazi kada kamere, usled hrapavosti površine temena cevnog luka izazvane gubitkom materijala dejstvom gasne korozije i promene položaja senki na nepravilnoj površini, nisu u mogućnosti da prate promene na fasetama. Iz tog razloga, vrednosti deformacije na slikama 8.c i 8.d, označene žutom i crvenom bojom, predstavljaju greške merenja DIC metode i neće biti uzete u obzir u daljoj analizi i poređenju sa numeričkim modelom.

Po celoj dužini Preseka 0 i 1 (slika 8.a) prisutni su krateri različitih veličina i oblika koji dovode do velikih promena vrednosti deformacije na malim rastojanjima kod oba preseka. Zbog toga, ne može se uzeti u razmatranje najveća vrednost deformacije 0,39 % na Preseku 0 kao i najveća vrednost deformacije 0,27 % na Preseku 1 jer upravo ta mesta, gde su najveće deformacije, predstavljaju kratere na temenu cevnog luka kao posledica gasne korozije. Na osnovu svega navedenog, može se zaključiti da lokalno nije došlo do plastične deformacije.

Za razmatranje je usvojena vrednost deformacije od oko 0,20 % koja odgovara svim posmatranim Tačkama 0-2 (slika 8.b) na središtu temena cevnog luka i kod kojih se jasno vidi linearno povećanje deformacije sa povećanjem opterećenja cevnog luka, što je očekivano. Iz ovog razloga, za poređenje sa numeričkim modelom su usvojene vrednosti posmatranih tačaka, kao merodavne.

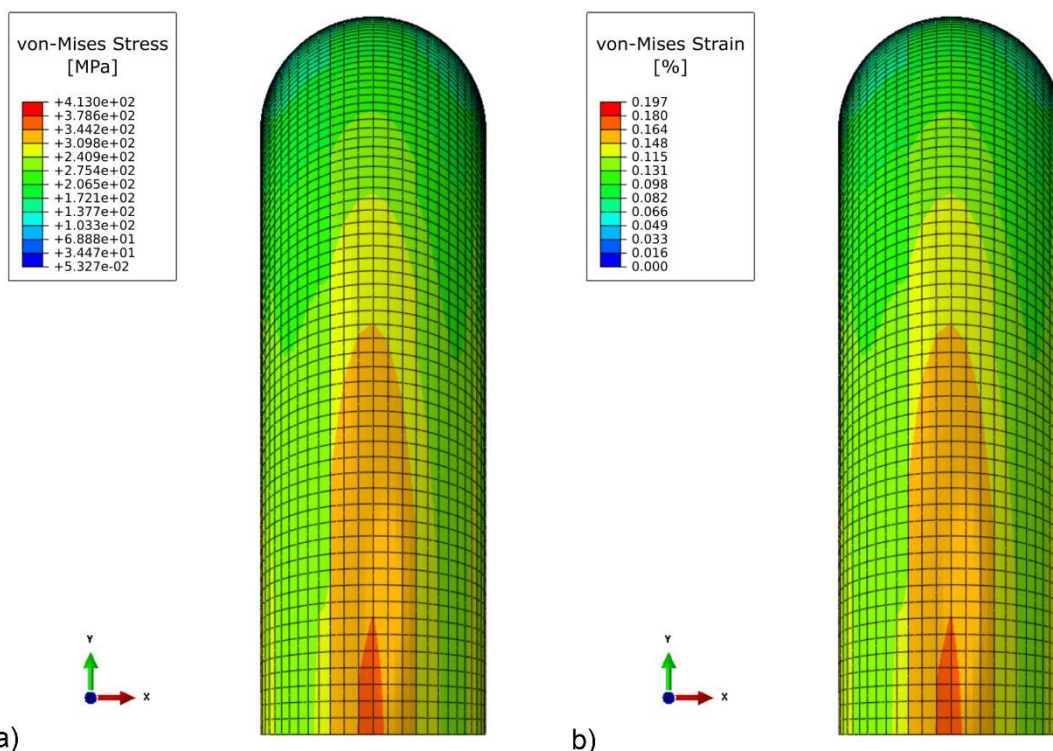
Na osnovu ispitivanja zatezanjem nakon eksperimenta, dobijene su vrednosti mehaničkih svojstava čelika 12H1MF nakon 200.000 h eksploatacije, tabela 2, gde je: $R_{0,2}$ – napon tečenja, R_m – zatezna čvrstoća i A – procentualno izduženje.

Tabela 2. Mehanička svojstva čelika 12H1MF nakon 200.000 h eksploatacije
 Table 2. Mechanical properties of 12H1MF steel after 200.000 h of exploitation

| $R_{0,2}$ / MPa | R_m / MPa | A / % |
|-----------------|-------------|---------|
| 413,9 | 536,8 | 29,0 |

U poređenju sa vrednostima iz standarda [33,34], eksperimentalno izmeren napon tečenja od 413,9 MPa, je znatno veći od standardne vrednosti (274 MPa), zatezna čvrstoća od 536,8 MPa je još uvek u zadovoljavajućim granicama prema standardu (441 - 637 MPa), kao i procentualno izduženje od 29 % koje je veće od minimalno zahtevane standardne vrednosti (21 %). Treba napomenuti da se dobijene vrednosti mehaničkih svojstava čelika, odnose na deo cevnog luka koji nije savijen. Međutim, na mestu savijanja cevnog luka, usled obrade hladnim deformisanjem, dolazi do promene u strukturi čelika, što prouzrokuje promene mehaničkih svojstava, odnosno dovodi do deformacionog ojačavanja materijala. Deformaciono ojačavanje materijala je praćeno povećanjem čvrstoće i tvrdoće, kao i smanjenjem žilavosti i plastičnosti [46-52]. Na osnovu svega navedenog može se zaključiti da će napon tečenja i zatezna čvrstoća biti veći na temenu cevnog luka u odnosu na deo cevnog luka koji nije hladno deformisan i ukoliko nije došlo do prevelikog smanjenja debljine zida cevi i oštećenja usled korozije.

Slika 9 prikazuje numeričke rezultate dobijene primenom MKE u oblasti od interesa, teme cevnog luka, za maksimalnu silu od 4922 N sa rastojanjem 190 mm od početka cevnog luka. Na ordinatni grafika na slici 9.a je prikazano fon Mizesovo naponsko polje. Najveća vrednost napona je na temenu cevnog luka, čija vrednost iznosi 346 MPa i značajno je ispod izmerenog napona tečenja (≈ 414 MPa) za čelik 12H1MF. Na ordinatni grafika na slici 9.b je prikazano fon Mizesovo deformaciono polje. S obzirom da je cevni luk ispitan u oblasti linearne elastičnosti, za najveću vrednost napona od 346 MPa dobija se deformacija od 0,164 %.



Slika 9. Rezultati numeričke analize za teme cevnog luka: a) raspodela naponskog stanja; b) raspodela deformacionog polja
 Figure 9. Results of the numerical analysis of the top of the U-bend tube: a) von Mises stress field, b) von Mises strain field

Maksimalna vrednost deformacije dobijena eksperimentalnom analizom, a koja je merodavna i može se uzeti za poređenje sa numeričkom analizom, je oko 0,20 %, dok maksimalna vrednost deformacije dobijena numeričkom analizom, za iste uslove ispitivanja, iznosi 0,164 %. Razlika između eksperimentalne i numeričke analize je oko 18 %.

Konačno, ako se uzme u obzir uporedna analiza rezultata dobijenih DIC metodom i MKE, jasno se vidi da MKE daje vrednosti deformacije koje su manje od onih dobijenih DIC metodom. Uzrok manjeg deformacionog polja, dobijen numeričkom analizom, je posledica nepotpune geometrije modela usled deformacije koja je nastala u zoni savijanja cevnog luka, gubitka materijala i površinskih oštećenja na cevi usled uticaja gasne korozije tokom 200.000 h rada. Tokom 200.000 h rada u eksploataciji, nije došlo do pojave puzanja materijala na cevi izlaznog međupregrejača pare izrađenog od toplotnopoostojanog čelika 12H1MF, a kao dokaz urađena su metalografska ispitivanja.

4. ZAKLJUČAK

U ovom radu je analiziran cevni luk izlaznog međupregrejača pare nakon 200.000 h provedenih u eksploataciji, koji je izložen dejstvu spoljašnjeg pritisknog opterećenja, uz primenu eksperimentalne (DIC) i numeričke (MKE) metode. Važno je naglasiti da je polje deformacije mereno samo na temenu cevnog luka, u zoni zatezanja, jer ono predstavlja kritično mesto za inicijaciju i propagiranje prslina tokom rada pregrejača.

Različiti procesi u eksploataciji su uzrok promene mehaničkih svojstava materijala i njegove degradacije što se u ovom slučaju ogleda u smanjenju debljine zida cevi. Metode koje ne uzimaju u obzir činjenicu da se karakteristike materijala menjaju tokom vremena eksploatacije, da dolazi do gubitka površinskih slojeva materijala, što utiče na promenu prečnika cevi, ne mogu dati adekvatne rezultate.

Rezultati dobijeni u ovom radu pokazuju da je veoma važno razumevanje mehaničkog opterećenja i ponašanje cevnog luka tokom eksploatacije, s obzirom da je reč o posudama pod pritiskom visokog rizika. Na osnovu rezultata eksperimentalnih i numeričkih istraživanja može se zaključiti sledeće:

- Eksperimentalni (DIC) i numerički (MKE) rezultati koji se odnose na deformaciono polje temena cevnog luka razlikuju se za oko 18 %. Ove razlike nastaju kao rezultat metoda koje imaju bitne razlike u njihovim početnim uslovima.
- Ovim istraživanjem je pokazano da MKE nije adekvatna i merodavna metoda za procenu deformacionog stanja realnih posuda pod pritiskom, kao što je ispitani cevni luk, koji je imao oštećenja na površini nakon 200.000 h rada, a koja ne mogu da se modeliraju. Jedan od ključnih nedostataka metode konačnih elemenata je taj što model koji se koristi u proračunu konačnih elemenata predstavlja idealni model strukture.
- Primena DIC metode je veoma korisna za lokalna merenja deformacije cevnog luka tokom statičkog ispitivanja pritisnim opterećenjem, međutim mora se tokom ispitivanja obratiti posebna pažnja na hrapavost površine kako ne bi navela na pogrešne rezultate.

Na osnovu eksperimentalnog ispitivanja može se potvrditi da cevni luk, izrađen od cevi izlaznog međupregrejača pare, posle 200.000 h rada u datim radnim uslovima i usled dejstva sile od 4922 N na rastojanju 190 mm od početka cevnog luka može da ostane u eksploataciji iako je vidno oštećen usled dejstva gasne korozije. Kako analize u ovom radu pokazuju da vidna oštećenja od gasne korozije u ovom trenutku ne ugrožavaju integritet cevi, međutim sa daljom njenom eksploatacijom ovo stanje će se promeniti. Ocenu daljeg napredovanja gasne korozije moguće je izvršiti metalografskim ispitivanjima na uzorcima cevi koji se uzorkuju periodično sa grejne površine, kao i analizom sastava produkata korozije. Rezultati periodičnih ispitivanja, koja kao rezultat imaju određivanje oblika i dubine prodiranja korozionog oštećenja i korelacije sa sastavom korozionih produkata, su podloga za određivanje kinetike napredovanja korozije, a uz detaljnu naponsku analizu i osnova za određivanje vremena do loma, kao i perioda pravovremene zamene cele grejne površine ili pojedinih njenih delova.

Dalja istraživanja će biti usmerena u dva pravca. Prvi će se odnositi na ispitivanje mehaničkih i hemijskih svojstava materijala, kao i mikrostukturnih karakteristika čelika 12H1MF nakon 200.000 h eksploatacije, dok će drugi biti usmeren na ispitivanje cevnog luka u elasto-plastičnoj oblasti.

Zahvalnica: Ovaj rad proistekao je iz rezultata istraživanja na projektu Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije TR 35024.

LITERATURA

- [1] Viswanathan R. *Damage Mechanisms and Life Assessment of High Temperature Components*. ASM International; 1989.

- [2] Gribelja VI. *Tehnika borbi s korrozijem*. Leningrad, Himija; 1978.
- [3] Brkić Lj, Živanović T. *Parni kotlovi*. Beograd, Mašinski fakultet; 1999.
- [4] Bugaj NV, Berezina TG, Trunin II. *Serviceability and Longtime Behaviour of Metal at Thermal Power Plants*. Moscow, Energoatomizdat; 1994.
- [5] Krutasova EI. *Metal Reliability at Thermal Power Plants*. Moscow, Energoatomizdat; 1981.
- [6] Orteu J. 3-D computer vision in experimental mechanics. *Opt Lasers Eng*. 2009; 47: 282-291.
- [7] Pan B, Wu D, Yu L. Optimization of a three-dimensional digital image correlation system for deformation measurements in extreme environments. *Appl Opt*. 2012; 51: 440-449.
- [8] Sutton M, Orteu J, Hubert W. *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements: Basic Concepts, Theory and Applications*. Berlin, Springer; 2009.
- [9] Wang DZ, Mottershead JE. Measurement Precision and Spatial Resolution with Kriging Digital Image Correlation. *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering* 2016; 62(7-8): 419-429.
- [10] Vautrot M, Balland P, Hopperstad OS, Tabourot L, Rajol-Veillé J, Toussaint F. Experimental Technique to Characterize the Plastic Behaviour of Metallic Materials in a Wide Range of Temperatures and Strain Rates: Application to a High-Carbon Steel. *Exp Mech*. 2014; 54: 1163-1175.
- [11] Wang P, Pierron F, Thomsen OT. Identification of Material Parameters of PVC Foams using Digital Image Correlation and the Virtual Fields Method. *Exp Mech*. 2012; 53: 1001-1015.
- [12] Subhash G, Liu Q, Moore DF, Ifju PG, Haile MA. Concentration Dependence of Tensile Behavior in Agarose Gel Using Digital Image Correlation. *Exp Mech*. 2011; 51: 255-262.
- [13] Turton N, Jin SY, Majumder A, An H, Vijayan V, Altenhof W, Green D. Experimentally Observed Strain Distributions Near Circular Discontinuities of AA6061-T6 Extrusions During Axial Crush. *Exp Mech*. 2011; 51: 111-129.
- [14] Lee D, Tippur H, Bogert P. Dynamic fracture of graphite/epoxy composites stiffened by buffer strips: An experimental study. *Compos Struct*. 2012; 94: 3538-3545.
- [15] Milošević M, Milošević N, Sedmak S, Tatić U, Mitrović N, Hloch S, Jovičić R. Digital image correlation in analysis of stiffness in local zones of welded joints. *Technical Gazette (ISSN 1330-3651)*. 2016; 23: 19-24.
- [16] Čolić K. *Fracture Behaviour Analysis of Artificial Hip Biomaterials*. Belgrade, University of Belgrade, D.Sc. thesis; 2012. (in Serbian)
- [17] Sedmak A, Milošević M, Mitrović N, Petrović A, Maneski T. Digital Image Correlation in Experimental Mechanical Analysis. *Structural Integrity and Life (ISSN 1451-3749)*. 2012; 12(1): 39-42.
- [18] Gubelj N. Application of Stereometric Measurement on Structural Integrity. *Structural Integrity and Life (ISSN 1451-3749)*. 2006; 6(1-2): 65-74.
- [19] Rončević B, Bakić A, Kodvanj J. Numerical and experimental analysis of a frictionless receding contact between cylindrical indenter, layer and substrate. *Transactions of FAMENA (ISSN 1849-1391)*. 2016; 40(2): 1-18.
- [20] Tihaček-Šojić Lj, Milić-Lemić A, Tanasić I, Mitrović N, Milošević M, Petrović A. Compressive strains and displacement in a partially dentate lower jaw rehabilitated with two different treatment modalities. *Gerodontology*. 2012; 29: 851-857.
- [21] Tanasić I, Milić-Lemić A, Tihaček-Šojić Lj, Stančić I, Mitrović N. Analysis of the compressive strain below the removable and fixed prosthesis in the posterior mandible using a digital image correlation method. *Biomech Model Mechanobiol*. 2012; 11: 751-758.
- [22] Sztefek P, Vanleene M, Olsson R, Collinson R, Pitsillides A, Shefelbine S. Using digital image correlation to determine bone surface strains during loading and after adaptation of the mouse tibia. *J Biomech*. 2010; 43: 599-605.
- [23] Machado G, Favier D, Chagnon G. Membrane Curvatures and Stress-strain Full Fields of Axisymmetric Bulge Tests from 3D-DIC Measurements. Theory and Validation on Virtual and Experimental results. *Exp Mech*. 2012; 52: 865-880.
- [24] Ahn B, Kim J. Measurement and characterization of soft tissue behavior with surface deformation and force response under large deformations. *Med Image Anal*. 2010; 14: 138-148.
- [25] Sadowski T, Marsavina L, Craciun EM, Kneć M. Modelling and experimental study of parallel cracks propagation in an orthotropic elastic material. *Comput Mater Sci*. 2012; 52: 231-235.
- [26] Hu JJ, Chen GW, Liu YC, Hsu SS. Influence of Specimen Geometry on the Estimation of the Planar Biaxial Mechanical Properties of Cruciform Specimens. *Exp Mech*. 2014; 54: 615-631.
- [27] Balać M, Grbović A, Petrović A. Numerical predictions of crack growth in a pressure vessel with welded nozzles. *Structural Integrity and Life (ISSN 1451-3749)*. 2015; 15: 55-61.
- [28] Zhang R, He L. Measurement of mixed-mode stress intensity factors using digital image correlation method. *Opt Lasers Eng*. 2012; 50: 1001-1007.
- [29] Lin Q, Labuz JF. Fracture of sandstone characterized by digital image correlation. *Int J Rock Mech Min Sci*. 2013; 60: 235-245.
- [30] Čolić K, Sedmak A, Gubelj N, Burzić M, Petronić S. Experimental analysis of fracture behavior of stainless steel used for biomedical applications. *Structural Integrity and Life (ISSN 1451-3749)*. 2012; 12(1): 59-63.
- [31] Legweel K, Sedmak A, Čolić K, Burzić Z, Gubelj L. Elastic-Plastic Fracture Behaviour of Multiphase Alloy MP35N. *Structural Integrity and Life (ISSN 1451-3749)*. 2015; 15(3): 163-166.
- [32] Baltušnikas A, Levinskas R, Lukošiušis I. Kinetics of Carbide Formation During Ageing of Pearlitic 12X1MΦ Steel. *Mater Sci-Medzg (ISSN 1392-1320)*. 2007; 13(4): 286-292.
- [33] ТУ 14-ЗР-55-2001: Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов. 2001.



- [34] ГОСТ 20072-74: Сталь теплоустойчивая. Технические условия. 2004.
- [35] ISO 6892-1:2016: Metallic materials — Tensile testing — Part 1: Method of test at room temperature. 2016.
- [36] Bakić GM, Šijački Žeravčić VM, Đukić MB, Maksimović SM, Plešinac DS, Rajičić BM. Thermal history and stress state of a fresh steam-pipeline influencing its remaining service life. *Therm Sci.* 2011; 15(3): 691-704.
- [37] ARAMIS, User information, Hardware, 2007.
- [38] Software, Abaqus 6.13, 2013. <http://dsk.ippt.pan.pl/docs/abaqus/v6.13/index.html>. Accessed November 7, 2019.
- [39] Giner E, Sukumar N, Tarancón JE, Fuenmayor FJ. An Abaqus implementation of the extended finite element method. *Eng Fract Mech.* 2009; 76: 347-368.
- [40] Mitrović NR, Petrović ALj, Milošević MS, Momčilović NV, Mišković ZZ, Maneski TDj, Popović PS. Experimental and numerical study of globe valve housing. *Hem Ind.* 2017; 71(3): 251-257.
- [41] AbuBakar AR, Ouyang H. Complex eigenvalue analysis and dynamic transient analysis in predicting disc brake squeal. *Int J Vehicle Noise and Vibration.* 2006; 2(2): 143-155.
- [42] Ioannides AM, Peng J, Swindler JR. ABAQUS model for PCC slab cracking. *Int J Pavement Eng.* 2006; 7(4), 311-321.
- [43] Tchalla A, Belouettar S, Makradi A, Zahrouni H. An ABAQUS toolbox for multiscale finite element computation. *Compos Part B-Eng.* 2013; 52: 323-333.
- [44] Wang G-D, Melly SK. Three-dimensional finite element modeling of drilling CFRP composites using Abaqus/CAE: a review. *Int J Adv Manuf Technol.* 2018; 94(1-4): 599-614.
- [45] Software, Abaqus 6.13, Thick conventional shell elements, 2013. <http://dsk.ippt.pan.pl/docs/abaqus/v6.13/books/usb/default.htm?startat=pt06ch29s06alm16.html>. Accessed November 7, 2019.
- [46] Drobniak Đ. *Fizička metalurgija - Fizika čvrstoće i plastičnosti*. Tehnološko-metalurški fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd; 1986.
- [47] Stojiljković V. *Teorija obrade deformisanjem*. Niš; 1988.
- [48] Vujović V. *Deformabilnost*. Monografija, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad; 1992.
- [49] Prokić-Cvetković R., Popović O. *Mašinski materijali 1*. Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd; 2012.
- [50] Jovanović M., Adamović D., Lazić V., Ratković N. *Mašinski materijali*. Mašinski fakultet u Kragujevcu, Univerzitet u Kragujevcu, Kragujevac; 2003.
- [51] Rešković S. *Teorija oblikovanja deformiranjem*. Metalurški fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Sisak; 2014.
- [52] Musafija B. *Obrada metala plastičnom deformacijom*. IGKRO „SVJETLOST“ OOUR Zavod za udžbenike, Sarajevo; 1979.

SUMMARY**Experimental and numerical analyses of an U-bend tube made of an output inter-heater tube after exploitation**

Vladimir D. Pavkov¹, Gordana M. Bakić², Vesna M. Maksimović¹, Aleksandar Lj. Petrović², Nenad R. Mitrović² and Žarko Z. Mišković²

¹*University of Belgrade, Vinča Institute of Nuclear Sciences, Belgrade, Serbia*

²*University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, Serbia*

(Scientific paper)

One of the important tasks of evaluating the integrity of mechanical process elements and structures is to determine the local mechanical properties. In this paper, experimental and numerical analyses of the mechanical behavior of an output inter-heater tube, made of 12H1MF heat-resistant steel, was performed after 200,000 h of exploitation. During exploitation, the tube was exposed to various mechanisms of damage including gas corrosion. The tube was cut from a pipe system during reparations of a thermal power plant, and then cold-deformed by bending to obtain a U-bend tube, which was then used in the experiment. For this purpose, a specimen holder made of structural steel S235 was specifically designed to test such a sample. The U-bend tube was then exposed to the external compressive load during the experiment. Experimental research was based on the application of the 3D digital image correlation (DIC), while a finite element method (FEM) was applied in numerical simulation performed by using the Abaqus software package. The 3D DIC is an optical and contactless experimental method that allows measurements of displacement fields and deformations of geometrically complex structures. The Aramis system was used for the experimental analysis as well as for verification of the numerical model. During the experiment, the von Mises strain field was measured at the top of the U-bend tube, in the tightening zone, as it represents a critical place for crack initiation and propagation during the work of an inter-heater. Based on the obtained results and a comparative analysis of experimental and numerical values of the von Mises strain field at the U-bend tube, deviation of the model predictions of about 18 % was determined. The FEM predicted smaller values of the von Mises strain field compared to the DIC method. This is the result of an incomplete geometry applied in the model due to deformation that occurred in the bend zone of the U-bend tube, loss of material and the tube surface damage due to the influence of gas corrosion during 200,000 h of exploitation. Experimental analysis has confirmed that the U-bend tube, after 200,000 h of exploitation, can remain in service even if it is damaged due to the effect of gas corrosion.

Keywords: steel 12H1MF; gas corrosion; digital image correlation; finite element method.