

UTICAJ NAPONSKE KOROZIJE NA INTEGRITET Cr-Ni ČELIKA U SAVREMENIM TEHNOLOŠKIM SISTEMIMA / EFFECT OF STRESS CORROSION CRACKING ON THE INTEGRITY OF Cr-Ni STEELS IN MODERN TECHNOLOGICAL SYSTEMS

Prof. dr. Milan Plavšić¹, Prof. dr. Nikola Manojlović¹, Prof. dr. Muhamed Sarvan¹

¹Internacionalni univerzitet Travnik, 72270 Travnik, Aleja konzula – Meljanac bb, BiH
e-mail: milan.plavsic2013@gmail.com, nikolad.manojlovic@gmail.com, muksar@hotmail.com

Izvorni naučni rad

<https://www.doi.org/10.58952/zr20261501427>

UDK / UDC 620.19

Sažetak

Oštećenja metala usljed naponske korozije se prilično često dešavaju. Mehanizmi i procesi naponske korozije su različiti. U radu je istraživana uticaj naponske korozije na mehanička svojstva materijala eksploatisane katalitičke cijevi reformera (reforming peći) od vatrootporne austenitno karbidne legure HK-40. Rezultati laboratorijskih mehaničkih ispitivanja su pokazali da mikrostrukturno stanje materijala cijevi sa austenitnom osnovom uz prisustvo karbidnih segregata u vidu karbidnih traka, smještenih po granicama austenitnih zrna (interkristalna korozija) i prisutni zatezni naponi (naponska korozija) bitno utiču na pad žilavosti materijala ASTM A 297 HK-40, iz koga je izlivena ispitivana katalitička cijev.

Ključne riječi: katalitička cijev, naponska korozija, mehanička svojstva

JEL klasifikacija: O32, O33, L61

Abstract

Metal damage due to stress corrosion cracking (SCC) occurs relatively frequently, involving various mechanisms and processes. This paper investigates the impact of SCC on the mechanical properties of a service-exposed catalytic reformer tube made of heat-resistant austenitic-carbide alloy HK-40. Laboratory mechanical tests indicate that the microstructural state—characterized by an austenitic matrix with carbide segregates in the form of bands along grain boundaries (intergranular corrosion)—combined with tensile stresses, significantly reduces the toughness of the ASTM A297 HK-40 cast material.

Keywords: catalytic tube, stress corrosion, mechanical properties

JEL classification: O32, O33, L61

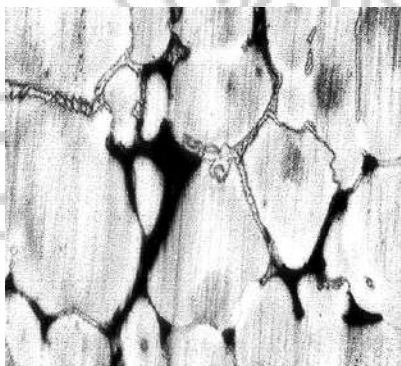
UVOD

Savremena gradnja mašinskih konstrukcija, kao što su postrojenja u procesnoj industriji teško da se može zamisliti bez primjene različitih legiranih čelika, a posebno austenitnih nerđajućih čelika. Međutim, upotreba nerđajućih čelika ograničena je visokom cijenom koja, uglavnom, zavisi od sadržaja nikla i drugih legirajućih elemenata, što ukazuje da je hrom-nikl čelike opravdano primijenjivati samo za izradu konstruktivnih elemenata predviđenih za rad u koroziono jakoj sredini. Mehanizmi oštećenja katalitičkih cijevi (HK-40 ASTM A 297) su različiti. Izražen problem u eksploataciji ovih cijevi je pojava interkristalne korozije, koja u sadejstvu zateznih napona uzrokuje pojavu naponske korozije.

1. O NAPONSKOJ KOROZIJI

Oštećenja metala usljed djelovanja naponske korozije su prilično česta i nerijetko uslovljavaju katastrofalne lomove i havarije praćene potpunim gubitkom funkcije ugrožene komponentne, kao i velikim materijalnim troškovima. Od tri osnovna mehanizma naponske korozije: aktivno rastvaranje, vodonična krtost i cijepanje izazvano prekidom filma, u radu je dat kratak opis mehanizma naponske korozije usljed aktivnog rastvaranja [3]. Ovaj proces se odnosi na ubranu koroziju duž puta veće korozione osjetljivosti nego što je normalna kod masivnog materijala koji je generalno u pasivnom stanju. Najčešći aktivni put je granica zrna u kojoj segregirani elementi nečistoća otežavaju pasivno ponašanje. Taloženje karbida hroma u granicama zrna austenitnog nerđajućeg čelika (senzitivizacija) izaziva lokalno smanjenje koncentracije hroma u zoni granice, usljed čega će ta oblast postati nešto manje pasivna. Kao rezultat toga može da dođe do korozije granica zrna, dok istovremeno samo zrno ostaje u pasivnom stanju. Korozioni proces može da se odvija i u odsustvu napona, u kom slučaju se javlja interkristalna korozija i to uniformno kroz ceo materijal [3].

Na slikama 2.1 i 2.2, prikazan je primjer interkristalne korozije nastale usljed taloženja hromovih karbida $C_{23}C_6$ na granici zrna u materijalu eksploatisane katalitičke cijevi koja je predmet ispitivanja. Mikrostrukturno stanje materijala je austenitno uz prisustvo karbidnih segregata u vidu karbidnih traka, smještenih po granicama austenitnih zrna. Karbidi iz karbidnih segregata bogati su Cr, tako da od osnovne mase s kojom su u dodiru oduzimaju Cr, pri čemu sadržaj Cr u njoj opada ispod granice korozione otpornosti. Usljed toga, a pod dejstvom korozivnih sredstava došlo je do interkristalne korozije.



Slika 1-Uzorak M1 (400x)



Slika 2 - Uzorak M1 (400x)

2. MATERIJAL KATALITIČKE CIJEVI

Materijal od koga je izrađena ispitivana cijev je centrifugalno livena, vatrootporna, austenitno karbidna legura HK-40, prema ASTM A 297 standardu. Cijevi su ukupne dužine 10 m, spoljnog prečnika 125 mm, unutrašnjeg prečnika 100 mm i debljine zida 12,5 mm. Hemijski sastav ispitivane legure definisan je standardima ASTM (A 297, A 351, A 567, A 608) [4], a mehaničke osobine [5]. Analizirani segment cijevi potiče od katalitičke cijevi reformera koji je sastavni dio postrojenja za proizvodnju vodonika. Ispitivana eksploatisana katalitička cijev (oznaka "S") je do pojave prslina radila vrlo kratko vrijeme (cca 5000 h) na temperaturi od 780-810 °C, pri radnom pritisku od 1,4 MPa. Poređenja radi, prosječan eksploatacioni vijek katalitičkih cijevi reformera je oko 100000 sati. Radni fluid koji struji kroz katalitičke cijevi u procesu rada je mješavina gasa raznih ugljovodonika i vodene pare. Uzorci su iz dijela eksploatisane katalitičke cijevi koji se nalazio u zoni najviših radnih temperatura. Radi poređenja, urađena su i mehanička ispitivanja nove cijevi (oznaka "N") od iste legure.

2.1 HEMIJSKI SASTAV UZORAKA, NOVE I EKSPLOATISANE KATALITIČKE CIJEVI

Tabela 1. Hemijski sastav materijala ispitivane nove katalitičke cijevi, legura HK-40 (u masenim %)

<i>Srednja aritmetička vrijednost hemijskog sastava - tri mjerenja</i>																
Legirajući elementi u %	C	Si	Mn	P	S	Cu	Al	Cr	Mo	Ni	V	Ti	Nb	Co	W	Fe
Aritmetička vrijednost	0.436	1.813	0.322	0.019	0.021	0.209	0.007	24.68	0.148	19.76	0.041	0.016	0.251	0.123	0.186	51.98

Tabela 2. Hemijski sastav materijala ispitivane eksploatisane katalitičke cijevi-legura HK-40

<i>Srednja aritmetička vrijednost hemijskog sastava - tri mjerenja</i>																
Legirajući elementi u %	C	Si	Mn	P	S	Cu	Al	Cr	Mo	Ni	V	Ti	Nb	Co	W	Fe
Aritmetička vrijednost	0.521	1.788	0.420	0.018	0.020	0.197	0.003	24.71	0.166	19.61	0.036	0.014	0.063	0.078	0.221	52.14

3. ISPITIVANJE

Mjerenje tvrdoće uzoraka, nove i eksploatisane katalitičke cijevi, urađeno je po Brinellu (HB), na univerzalnom tvrdomjeru "WOLPERT" model Dia Testor 2Rc, i po Rockwelu (HRC) na tvrdomjeru "KARL FRANK" model Mannheim U2. Zatezna ispitivanja epruveta osnovnog materijala nove i eksploatisane katalitičke cijevi su rađena na sobnoj temperaturi od 20°C. Ispitivanja zatezanjem osnovnog materijala na sobnoj temperaturi, kao i geometrija epruveta su definisani standardom EN 10002-1[6], i ASTM ME [7]. Ova ispitivanja su rađena na elektromehaničkoj kidalici SCHENCK-TREBEL RM 100 u kontroli deformacije. Brzina uvođenja opterećenja je bila 5 mm/min. Izduženje je registrovano pomoću dvostrukog ekstenzometra HOTTINGER DD1, i induktivnog davača GS1. Ispitivanje savijanjem udarnim dejstvom sile na epruvetama sa zarezom može da pruži i objašnjenje o ponašanju materijala pri ometanom deformisanju, tj. pri prostornom naponskom stanju. Određivanje rada potrebnog za lom pod utvrđenim uslovima ispitivanja najčešće služi za tekuću kontrolu kvaliteta i homogenosti materijala, kao i njegove obrade.

Udarne ispitivanja epruveta izvađenih iz uzorka nove katalitičke cijevi kao i eksploatisane katalitičke cijevi, čelika HK 40, sa zarezom u osnovnom metalu (OM) su rađena u cilju određivanja ukupne energije udara, kao i komponenti energije stvaranja prsline i energije širenja prsline. Postupak ispitivanja, kao i oblik i dimenzije epruveta je definisan standardom EN 10045-1 [8], odnosno ASTM E23-95 [9]. Ispitivanje epruveta sa prslinom pokazuje lokalno ponašanje materijala oko vrha prsline i polazi od pretpostavke da je materijal oko prsline dovoljno homogen, što znači da se rezultati lokalnog ponašanja mogu tretirati globalno, odnosno da se mogu neposredno prenijeti na odgovarajuću konstrukciju. Žilavost loma pri ravnoj deformaciji, epruveta izvađenih iz cijevi čelika HK 40 rađena su u cilju određivanja kritičnog faktora intenziteta napona, K_{Ic} , odnosno ocjene ponašanja osnovnog metala u prisustvu greške tipa prsline, kao najopasnije od svih grešaka u konstrukcijskim materijalima.

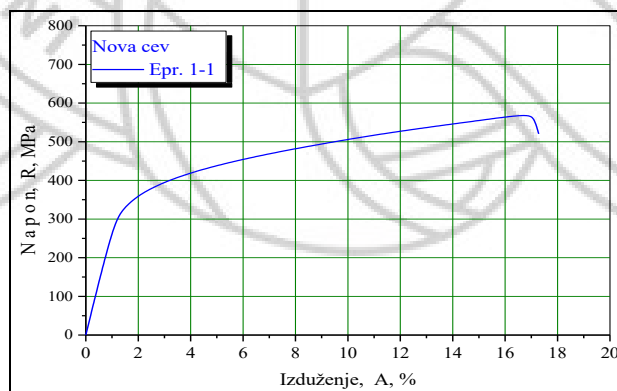
Za ispitivanje je korištena Šarpi epruveta za savijanje u tri tačke-SEB, čija geometrija je definisana standardom ASTM E1820 [10].

4. REZULTATI I DISKUSIJA

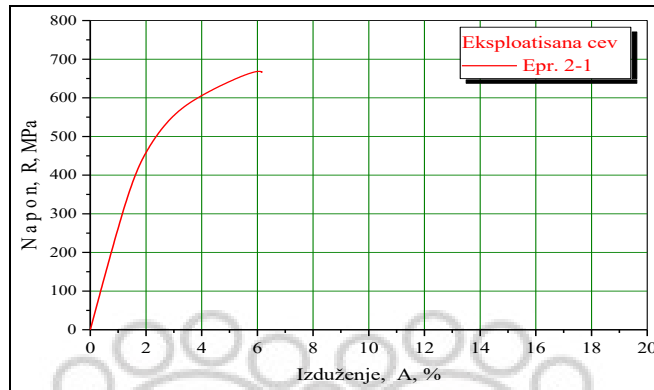
4.1. REZULTATI ISPITIVANJA TVRDOĆE MATERIJALA KATALITIČKE CIJEVI

Prema standardu ASTM A 297 definisana je minimalna vrijednost tvrdoće legure HK-40 iz koje su izliveno katalitičke cijevi, a iznosi 170 HB. Izmjerena tvrdoća po Rockwel-u i po Brinell-u na uzorku eksploatisane katalitičke cijevi je mnogo veća od standardnih vrijednosti za ovaj materijal. Povećanje čvrstoće i tvrdoće materijala HK-40 iznad standardnih vrijednosti, u većoj mjeri, ukazuje da su se u materijalu desile mikrostrukturne promjene i da je materijal postao krtiji, dok na uzorku nove cijevi nije bilo većih odstupanja u tvrdoći, od standardom propisanih. Analizom rezultata mjerenja tvrdoće po Rockwel-u, na uzorku eksploatisane cijevi uočena je veća razlika u tvrdoći po presjeku cijevi, gdje je na površini poprečnog presjeka konstatovana nešto niža tvrdoća uz unutrašnju ivicu zida cijevi. Ovaj pad tvrdoće uz samu unutrašnju ivicu zida cijevi je vjerovatno rezultat razugljeničenja, a porast tvrdoće dalje od unutrašnje ivice zida cijevi je vjerovatno rezultat karbonizacije.

4.2. REZULTATI ISPITIVANJA ZATEZANJEM NA EPRUVETAMA NOVE I EKSPLOATISANE KATALITIČKE CIJEVI



Slika 3. Dijagram napon-izduženje, epruveta nove cijevi



Slika 4. Dijagram napon- izduženje, epruveta eksploatisane cijevi

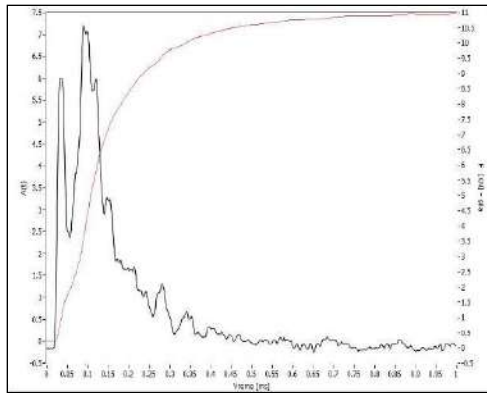
Tabela 3. Ispitivanje zatezanjem na epruvetama nove cijevi

Materijal cijevi ASTM A 297 HK 40			
<i>Podaci o ispitivanju zatezanjem tri epruvete nove katalitičke cijevi (oznaka "N")</i>			
Oznaka epruveta	Napon tečenja $R_{p0,2}$, MPa	Zatezna čvrstoća R_m , MPa	Izduženje A, %
Epr.1-1	323	573	17,3
Epr 1-2	320	525	15,1
Epr 1-3	327	575	18,6

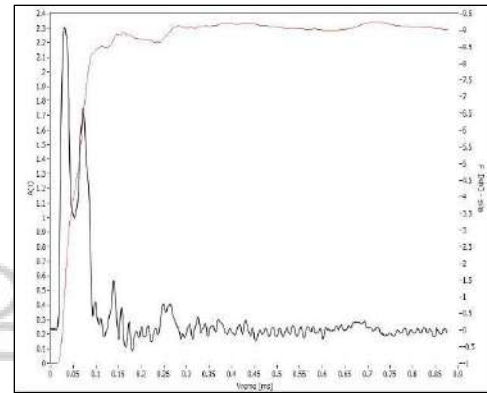
Tabela 4. Ispitivanju zatezanjem na epruvetama eksploatisane cijevi

Materijal cijevi ASTM A 297 HK 40			
<i>Podaci o ispitivanju zatezanjem tri epruvete eksploatisane katalitičke cijevi (oznaka "S")</i>			
Oznaka epruveta	Napon tečenja $R_{p0,2}$, MPa	Zatezna čvrstoća R_m , MPa	Izduženje A, %
Epr.-2-1	439	672	6,2
Epr.-2-2	423	631	3,8
Epr.-2-3	437	670	6,2

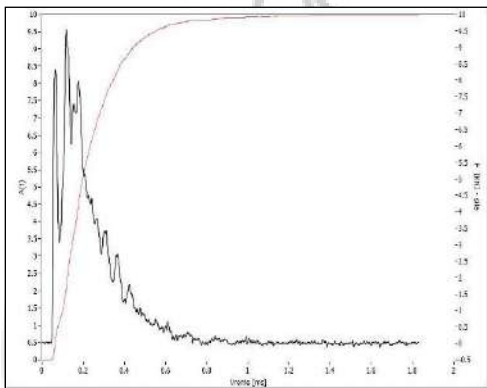
4.3. REZULTATI ISPITIVANJA UDARNE ŽILAVOSTI



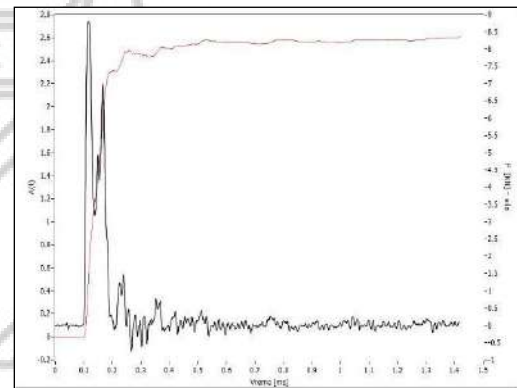
Slika 5 - Dijagram ispitivanja žilavosti epruveta nove cijevi na 20 °C



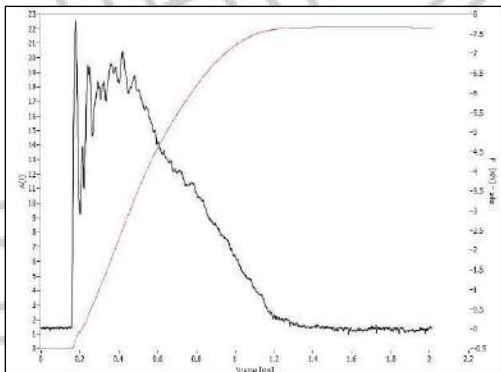
Slika 6 - Dijagram ispitivanja udarne žilavosti, epruveta nove cijevi na 20 °C



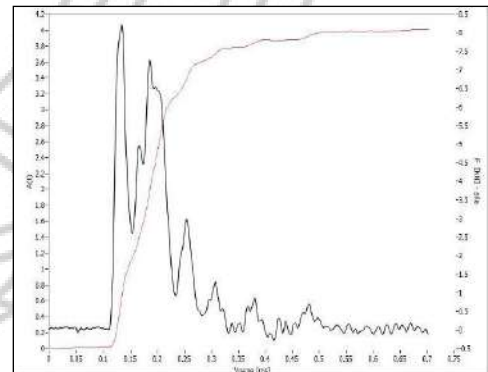
Slika 7 - Dijagram ispitivanja žilavosti, epruveta nove cijevi na 100 °C



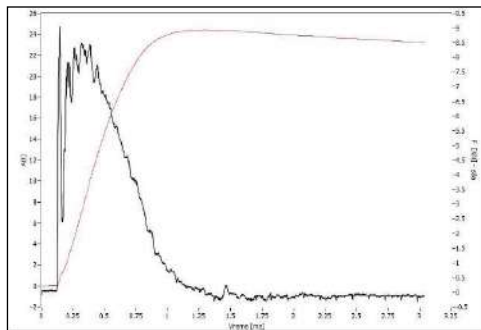
Slika 8 - Dijagram ispitivanja žilavosti, epruveta eksploatisane cijevi na 100 °C



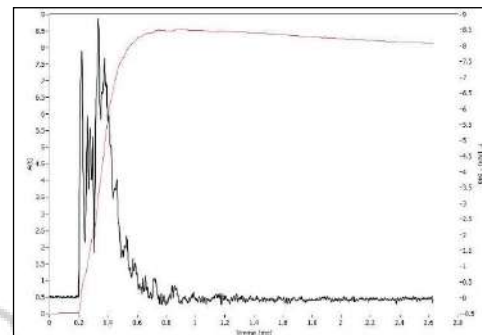
Slika 9 - Dijagram ispitivanja žilavosti, epruveta nove cijevi na 500 °C



Slika 10 - Dijagram ispitivanja žilavosti, epruveta eksploatisane cijevi na 500 °C



Slika 11 - Dijagram ispitivanja žilavosti, epruveta nove cijevi na 900 °C



Slika 12 - Dijagram ispitivanja žilavosti, epruveta eksploatisane cijevi na 900 °C

Tabela 5. Rezultati ispitivanja žilavosti nove katalitičke cijevi

Oznaka epruveta	Temperatura ispitivanja, °C	Ukupna energija udara, A_{uk} , J	Energija stvaranja prsline, A_1 , J	Energija širenja prsline, A_p , J
Nova katalitička cijev				
N-1-1	20	7.5	2.3	5.2
N-1-2		7.2	2.3	4.9
N-1-3		7.9	2.4	5.5
N-2-1	100	9.8	2.7	7.1
N-2-2		10.0	2.1	7.9
N-2-3		11.4	2.2	9.2
N-3-1	500	22.1	9.7	12.4
N-3-2		24.9	10.2	14.7
N-3-3		26.6	10.8	15.8
N-4-1	900	23.2	6.8	16.4
N-4-2		24.6	7.2	17.4
N-4-3		19.3	5.7	13.6

Tabela 6. Rezultati ispitivanja žilavosti eksploat. katalitičke cijevi

Oznaka epruvete	Temperatura ispitivanja, °C	Ukupna energija udara, A_{uk}	Energija stvaranja prsline, A_1 , J	Energija širenja prsline, A_p , J
Eksploatisana katalitička cijev				
S-1-1	20	2.3	0.5	1.8
S-1-2		2.2	0.5	1.7
S-1-3		2.2	0.5	1.7
S-2-1	100	2.6	0.4	2.2
S-2-2		2.4	0.6	1.8
S-2-3		2.5	0.6	1.9
S-3-1	500	4.0	1.6	2.4
S-3-2		4.6	1.9	2.5
S-3-3		4.2	1.4	2.6
S-4-1	900	8.1	3.5	4.6
S-4-2		7.5	3.6	3.9
S-4-3		8.0	3.6	4.0

4.4. MEHANIKA LOMA

Kako su u konkretnom slučaju zadovoljeni uslovi iz jednačine $a; B; \frac{W}{2} \geq 2,5 \cdot \left(\frac{K_Q}{\sigma_T} \right)^2$ i $K_Q = K_{Ic}$.

Izračunate vrijednosti dužine zamorne prsline i kritičnog faktora intenziteta napona (K_{Ic}) su date u tabelama od 7. do 10.

Tabela 7. Dužine zamorne prsline, a_z , iz osnovnog materijala nove katalitičke cijevi

Oznaka epruvete	Temperatura ispitivanja, °C	Dužina zamorne prsline, a_z , mm					Sred. vrij.
		a_{z1}	a_{z2}	a_{z3}	a_{z4}	a_{z5}	a_{zsr} , mm
Nova katalitička cijev							
N - 1		2.36	3.21	4.12	3.30	2.41	3.08
N - 2	20	2.18	3.02	4.01	3.11	2.19	2.90
N - 3		2.24	3.11	4.06	3.09	2.29	2.96

Tabela 8. Vrijednosti K_{Ic} epruveta iz osnovnog nove katalitičke cijevi

Oznaka epruvete	Kritični faktor intenziteta napona; K_{Ic} , MPa m ^{1/2}	Kritična dužina prsline; a_c , mm
Nova katalitička cijev		
N - 1	39	3,7
N - 2	41	4,0
N - 3	37	3,3

Tabela 9. Dužine zamorne prsline, a_z , epruveta iz osnovnog materijala eksploatisane katalitičke cijevi

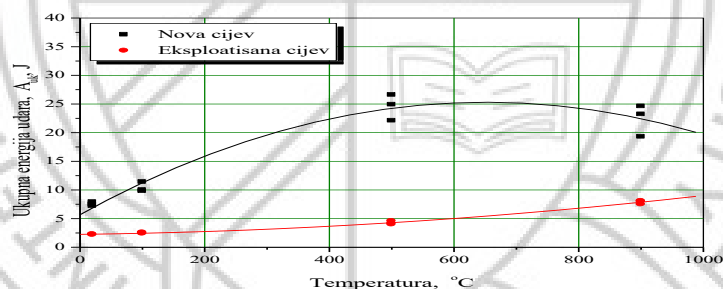
naka Epruvete	Temperatura ispitivanja, °C	Dužina zamorne prsline, a_z , mm					Sred. vrij.
		a_{z1}	a_{z2}	a_{z3}	a_{z4}	a_{z5}	a_{zsr} , mm
<i>Eksploatisana katalitička cijev</i>							
S - 1		2.2 1	3.1 7	3.2 6	3.0 3	2.2 6	2.99
S - 2	20	2.7 2	3.5 2	4.3 5	3.7 3	2.6 5	3.39
S - 3		2.5 8	3.3 1	4.0 3	3.2 0	2.4 6	3.12

Tabela 10. Vrijednosti K_{Ic} epruveta iz osnovnog materijala eksploatisane katalitičke cijevi

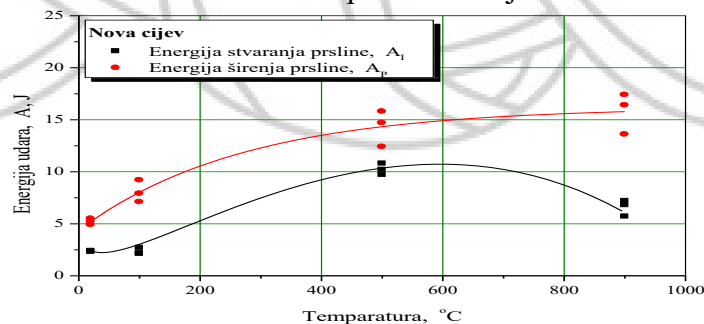
Oznaka epruvete	Kritični faktor intenziteta napona; K_{Ic} , MPa $m^{1/2}$	Kritična dužina prsline; a_c , mm
<i>Eksploatisana katalitička cijev</i>		
S - 1	32	1,4
S - 2	30	1,2
S - 3	33	1,5

4.5. ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA ŽILAVOSTI NOVE I EKSPLOATISANE KATALITIČKE CIJE

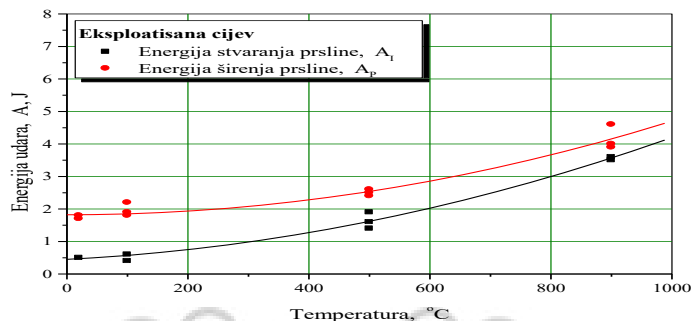
Zavisnost ukupne energije udara, A_{uk} , od temperature ispitivanja, epruveta s V-2 zarezom isječenih iz uzoraka nove i eksploatisane cijevi je data dijagramski na slici 13. Uticaj temperature ispitivanja na vrijednosti energije stvaranja prsline, A_I , i energije širenja prsline, A_P , epruveta isječenih iz OM nove cijevi od čelika HK-40 je data dijagramski na slici 14., a kod epruveta isječenih iz OM eksploatisane cijevi od čelika HK-40 je data na slici 15. Na osnovu dobijenih rezultata udarnih ispitivanja epruveta sa zarezom u OM, isječenih iz nove cijevi, vidi se da s povećanjem temperature ispitivanja dolazi do povećanja ukupne energije udara A_{uk} , do 500 °C, što je prikazano grafički na slici 13. Povećanjem temperature do 900 °C, ukupna energija udara se vrlo malo mijenja (blago opada), odnosno temperatura ispitivanja više nema uticaja na promjenu ukupne energije udara. Kod eksploatisane cijevi je jasna zakonitost, s povećanjem temperature ispitivanja dolazi do povećanja ukupne energije udara.



Slika 13. Promjena A_{uk} u zavisnosti od temperature ispitivanja kod od epruveta sa zarezom u OM nove i eksploatisane cijevi



Slika 14 . Odnos energije stvaranja prsline, A_I , i energije širenja prsline, A_P u ukupnoj energiji udara A_{uk} , kod epruveta isječenih iz OM nove cijevi



Slika 15. Odnos energije stvaranja prsline, A_I , i energije širenja prsline, A_P u ukupnoj energiji udara, A_{uk} . Kod epruveta isječenih iz OM eksploatisane cijevi

Dobijene vrijednosti ukupne energija udara, A_{uk} epruveta isječenih iz nove cijevi, tabela VII, se kreću od 7,5 J dobijenih ispitivanjem na 20 °C do 24,5 J dobijenih ispitivanjem na 500 °C. Učešće energije stvaranja prsline, A_I se kreće od 2,3 J dobijenih na 20 °C do max. 10 J dobijenih na 500 °C. Vrijednosti energije širenja prsline A_P se kreću od 5,2 J dobijenih na 20 °C do 15,7 J dobijenih na 900 °C. Isto tako, dobijene vrijednosti ukupne energija udara, A_{uk} epruveta sa zarezom u OM, eksploatisane cijevi, tabela VIII., se kreću od 2,2 J dobijena ispitivanjem na 20 °C do 7,9 J dobijenih ispitivanjem na 900 °C. Učešće energije stvaranja prsline, A_I se kreće od 0,5 J dobijenih na 20 °C do max. 3,6 J na 900 °C. Dobijene vrijednosti energije širenja prsline, A_P se kreću od 1,7 J dobijenih na 20 °C do 4,2 J na 900 °C. Na bazi mjerenja ukupne energije udara, koja je integralna karakteristika energetskog kapaciteta epruvete u procesu loma, nije moguće saznati kako se s promjenom temperature ispitivanja i promjenom ostalih parametara mijenja energija koja se troši na elastičnu i plastičnu deformaciju uzorka do stvaranja prsline (energija stvaranja prsline A_I) i dalje u procesu širenja prsline do konačnog loma (energija širenja prsline, A_P). Ovaj fundamentalni nedostatak je prevaziđen instrumentiranjem samog procesa ispitivanja, odnosno korištenjem osciloskopa i računara. Prema tome, proces instrumentiranja je riješio značaj ukupne energije udara i njenih komponenti, energije stvaranja prsline i energije širenja prsline. Ispitivanja epruveta s V-zarezom su pokazala da se odnos energije stvaranja prsline, A_I , i energije širenja prsline, A_P , značajno mijenja u zavisnosti od temperature ispitivanja, slike 13 i 14. Na sobnoj temperaturi je odnos krte komponente (energije stvaranja prsline) i duktilne komponente (energija širenja prsline) u ukupnoj energiji udara, 1:1. Karakter krivih: sila - vrijeme i energija - vrijeme dobijenih ispitivanjem epruveta na sobnoj temperaturi odgovara karakteru krutih materijala. S povećanjem temperature od 100 °C do 900 °C ovaj odnos se mijenja, i u konkretnom slučaju kod nove cijevi imamo da nam je učešće duktilne komponente (energija širenja prsline) u ukupnoj energiji udara oko 2,5 puta veće od učešća krte komponente (energije stvaranja prsline). Kod eksploatisane cijevi taj odnos je nešto drugačiji, tako da imamo da nam je učešće duktilne komponente (energija širenja prsline) u ukupnoj energiji udara oko 50% veće od učešća krte komponente (energije stvaranja prsline). Takođe, primjetan je uticaj temperature na vrijednosti maksimalne sile. S povećanjem temperature opada vrijednost maksimalne sile, tako da je ona najveća na sobnoj temperaturi, a najniža na 900 °C. Kao parametar koji definiše prelaznu temperaturu može da se uzme temperatura pri kojoj ukupna energija udara (udarna žilavost) padne na 50% od vrijednosti ukupne energije udara na sobnoj temperaturi. U konkretnom slučaju, dobijene vrijednosti ukupne energije udara su dosta niske, prvenstveno kod eksploatisane cijevi, tako da je vrlo teško definisati prelaznu temperaturu. Pogotovo što je karakter loma i izgled prelomnih površina svih polomljenih epruveta krt.

ZAKLJUČAK

Prisutna naponska korozija uzrokovana interaktivnim djelovanjem interkristalne korozije i napona, ima jako nepovoljan uticaj na mehanička svojstva materijala (ASTM A297 HK40) eksploatisane katalitičke cijevi reformera. Taj uticaj se ogleda u povećanju čvrstoće i tvrdoće uz značajno smanjenje žilavosti, materijal postaje veoma krt i brzo postaje neupotrebljiv. Na metalografskim snimcima, slike 1. i 2. se da uočiti bitan uticaj karbidnih nizova duž granice austenitnog zrna na pad korozijske postojanosti, a što su potvrdili i rezultati mehaničkih ispitivanja tvrdoće, žilavosti i mehanika loma na odabranim temperaturama. Usljed povišenog sadržaja ugljenika (C) u materijalu eksploatacione katalitičke cijevi (iznad 0,45 %, koliko su maksimalno vrijednosti propisane prema standardu ASTM A 351 94a, za ovaj materijal), došlo je do izlučivanja tvrdih karbida (Cr_{23}C_6) i drugih krtih faza, poput intermetalnih jedinjenja po granici austenitnih zrna, pri čemu je došlo do osiromašjenja hromom zone uz granicu zrna i pojave interkristalne korozije. Korozioni procesi u materijalu cijevi su dodatno ubrzani i djelovanjem napona (naponska korozija) i koroziono vrlo agresivnih sredstava (vodonik, metan, ugljendioksid, ugljenmonoksid, parna atmosfera), koji struje kroz katalizator u cijevi reformera.

LITERATURA

- [1] Šuman, H. : Metalografija, prijevod sa njemačkog jezika, Beograd, 1965.
- [2] Plavšić, M.: Istraživanje uzroka nastajanja i širenja prsline na stjenki austenitnih hrom-nikl cijevi katalizatora parne reforming peći, magistarski rad, Banja Luka, 2009.
- [3] Šijacki, Žeravčić, V. :Neka razmatranja o problemima naponske korozije metala, predavanja – "TARA 2007 YUCOR- Vera Sijacki at all- Naponska korozija", 2007.
- [4] www.kubotametal.com/HR/HK40.ht
- [5] Technical specification B14-2M-87R, Kellogg, Sept. 1987
- [6] SRPS EN 10002-1, :Mehanička ispitivanja metala - zatezna ispitivanja; Deo 1: Termini i definicije, 1999.
- [7] ASTM E8-01, "Standard Methods of Tension Testing of Metallic Materials", Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.01, p. 196, 2001.
- [8] SRPS EN 10045-1, "Mehanička ispitivanja metala; Ispitivanje udarom po Šarpiju; Deo 1 i 2" Termini i definicije, Metoda ispitivanja, 1993.
- [9] ASTM E 23-02, "Standard Method for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials", Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.01, 2002.
- [10] RADOVIĆ, A., : Mogućnosti korišćenja kriterijuma mehanike loma u oceni sigurnosti zavarenih spojeva, Letnja škola mehanike loma - Mehanika loma zavarenih spojeva, Arandjelovac, str. 15-43, 1984