



Univerzitet u Novom Sadu  
Tehnički fakultet »Mihajlo Pupin«  
Zrenjanin



**DIJAGNOSTIKA OŠTEĆENJA I PROCENA  
PREOSTALOG ŽIVOTNOG VEKA  
CEVI ETILENSKIH PEĆI**

**Failure diagnostics and remaining life prediction  
of ethylene furnace tube**

- Doktorska disertacija -

**Kandidat:  
Mr Ištvan Kucora**

Zrenjanin, 2016. godine



Univerzitet u Novom Sadu  
Tehnički fakultet »Mihajlo Pupin«  
Zrenjanin



**DIJAGNOSTIKA OŠTEĆENJA I PROCENA  
PREOSTALOG ŽIVOTNOG VEKA  
CEVI ETILENSKIH PEĆI**

**Failure diagnostics and remaining life prediction  
of ethylene furnace tube**

- Doktorska disertacija -

Mentor:

Doc. dr Ljiljana Radovanović

Kandidat:

Mr Ištvan Kucora

Zrenjanin, 2016. godine

*Volim citate jer je to radost otkrića nečijih misli,  
predivno iskazanih od strane nekoga kome sam  
priznala da je mudriji od mene.*

*Marlene Dietrich*

**Univerzitet u Novom Sadu**  
**Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin” Zrenjanin**  
**Ključna dokumentacijska informacija**

<b>Redni broj:</b> <b>RBR</b>	
<b>Identifikacioni broj:</b> <b>IBR</b>	
<b>Tip dokumentacije:</b> <b>TD</b>	Monografska dokumentacija
<b>Tip zapisa:</b> <b>TZ</b>	Tekstualni štampani materijal
<b>Vrsta rada:</b> <b>VR</b>	Doktorska disertacija
<b>Autor:</b> <b>AU</b>	Mr Ištvan Kucora
<b>Mentor:</b> <b>MN</b>	Doc. dr Ljiljana Radovanović
<b>Naslov rada:</b> <b>NR</b>	Dijagnostika oštećenja i procena preostalog životnog veka cevi etilenskih peći
<b>Jezik publikacije:</b> <b>JP</b>	Srpski (latinica)
<b>Jezik izvoda:</b> <b>JI</b>	Srpski / Engleski
<b>Zemlja publikovanja:</b> <b>ZP</b>	Srbija
<b>Uže geografsko područje:</b> <b>UGP</b>	AP Vojvodina
<b>Godina:</b> <b>GO</b>	2016.
<b>Izdavač:</b> <b>IZ</b>	Autorski reprint
<b>Mesto i adresa:</b> <b>MA</b>	Tehnički fakultet “Mihajlo Pupin”, Đure Đakovića b.b., Zrenjanin, Srbija
<b>Fizički opis rada:</b> <b>FO</b>	(br. poglavlja/stranica/slika/tabela/ referenci/priloga) (8,212,81,38,115)
<b>Naučna oblast:</b> <b>NO</b>	Industrijsko inženjerstvo
<b>Naučna disciplina:</b> <b>ND</b>	Tehnička dijagnostika
<b>Predmetna odrednica/ključne reči:</b> <b>PO</b>	Tehnička dijagnostika, životni vek, puzanje, cementacija, mehanizam oštećenja, peći za pirolizu benzina
<b>UDK</b>	

<b>Čuva se:</b> <b>ČU</b>	U Biblioteci Tehničkog fakulteta „Mihajlo Pupin”, Zrenjanin
<b>Važna napomena:</b> <b>VN</b>	
<b>Izvod:</b> <b>IZ</b>	<p>Disertacija je posvećena problemima oštećenja cevi pirolitičkih peći u fabrici etilena, kao i metodima procene preostalog životnog veka cevi peći, uopštava teorijska i praktična istraživanja koja su sprovedena za vreme trajanja doktorskih studija.</p> <p>Peć za pirolizu benzina je uzeta kao tipičan primer za proučavanje preostalog životnog veka na osnovu prikupljenih podataka o cevima peći, kao što su: redukcija debljine zida, povećanje spoljnog prečnika, tvrdoća i metalografska istraživanja, itd., a eksperimentalni rezultati su dobiveni iz pripremljenih isečaka cevi peći.</p> <p>Razmatra se veliki kompleks pitanja povezan sa problemom tačnosti procene životnog veka. Iako otkaz cevi peći nije veliki bezbednosni problem, procena preostalog životnog veka cevi je značajna zbog uštede troškova koji proizilaze iz optimizacije procesnih parametara ili redukcije frekvence ispitivanja i prevazilaženja neplaniranih zastoja.</p>
<b>Datum prihvatanja teme od strane NN veća:</b> <b>DP</b>	26.06.2013.
<b>Datum odbrane:</b> <b>DO</b>	
<b>Članovi komisije: (ime i prezime/titula/zvanje/naziv organizacije/status)</b> <b>KO</b>	<p><b>Predsednik:</b> Prof. dr Živoslav Adamović, redovni profesor, Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin” Zrenjanin</p> <p><b>Član 1:</b> Prof. dr Branko Škorić, redovni profesor, Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu</p> <p><b>Član 2:</b> Prof. dr Slavica Prvulović, redovni profesor, Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin” Zrenjanin</p> <p><b>Član 3:</b> Doc. dr Jasmina Pekez, docent, Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin” Zrenjanin</p> <p><b>Mentor:</b> Doc. dr Ljiljana Radovanović, docent, Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin” Zrenjanin</p>

**University of Novi Sad**  
**Technical faculty „Mihajlo Pupin”, Zrenjanin**  
**Key word documentation**

<b>Acdecession number:</b> ANO	
<b>Identification number:</b> INO	
<b>Document type:</b> DT	Monographic documentation
<b>Type of record:</b> TR	Textual printed material
<b>Contents code:</b> CC	Ph.D.Thesis
<b>Author:</b> AU	Ištvan Kucora, M.Sc.
<b>Mentor:</b> MN	Ljiljana Radovanović, Ph.D. assistant professor
<b>Title:</b> TI	Failure diagnostics and remaining life prediction of ethylene furnace tube
<b>Language of text:</b> LT	Serbian
<b>Language of abstract:</b> LA	English/Serbian
<b>Country of publication:</b> CP	Serbia
<b>Lacality of publication:</b> LP	AP Vojvodina
<b>Publication Year:</b> PY	2016.
<b>Publisher:</b> PU	The author's reprint
<b>Publicatio place:</b> PP	Technical Faculty "Mihajlo Pupin", Đure Đaković b.b., Zrenjanin, Serbia
<b>Physsical description:</b> PD	(chapters /pages/ pictures/tables/ literature/appendix) (8,212,81,38,115)
<b>Scientific field:</b> SF	Industrial engineering
<b>Scientific discipline:</b> SD	Technical diagnostics
<b>Subject/Key Words:</b> SKW	Technical diagnostic, life fraction, creep, cementation, failure mode, gasoline pyrolysis furnace
UC	

<b>Holding Data:</b> <b>HD</b>	In the library of Technical faculty „Mihajlo Pupin”, Zrenjanin
<b>Note:</b> <b>N</b>	
<b>Abstract:</b> <b>AB</b>	<p>The dissertation is devoted to problems of pyrolysis furnace tubes damage in ethylene plant, and methods of assessment of the furnace tube remaining life, generalizes the theoretical and practical research that is conducted during the doctoral studies.</p> <p>Furnace for the gasoline pyrolysis taken as a typical example for the study of the remaining life based on data collected on the furnace tube, such as the reduction of wall thickness, increasing the outer diameter, hardness and metallographic testing, etc., and experimental results were obtained from prepared furnace tube slices.</p> <p>Discusses the major issues associated with the complex problem of the accuracy of life expectancy. Although furnace tube failure isn't a major security problem, the tube remaining life estimation is important because of cost savings resulting from the optimization of process parameters or reducing the frequency of tests and overcome unplanned downtime.</p>
<b>Accepted by the Scientific Board on:</b> <b>AS</b>	26.06.2013.
<b>Defended on:</b> <b>DE</b>	
<b>Thesis defended board: (Title/Name and Surname/Degree/Faculty)</b> <b>DB</b>	<p><b>President:</b> Živoslav Adamović, Ph.D., full time professor, Technical Faculty “Mihajlo Pupin”, Zrenjanin;</p> <p><b>Member 1:</b> Branko Škorić, Ph.D., full time professor, Faculty of Technical science, Novi Sad;</p> <p><b>Member 2:</b> Slavica Prvulović, Ph.D., full time professor, Technical Faculty “Mihajlo Pupin”, Zrenjanin;</p> <p><b>Member 3:</b> Jasmina Pekez, Ph.D., assistant professor, Technical Faculty “Mihajlo Pupin”, Zrenjanin;</p> <p><b>Menthor:</b> Ljiljana Radovanović, Ph.D., assistant professor, Technical Faculty “Mihajlo Pupin”, Zrenjanin;</p>

# S a d r Ź a j

## U V O D

### I P R E T H O D N A R A Z M A T R A N J A

1.1	Dosadašnja istraživanja	4
1.2	Pregled literature o proučavanom problemu	6

### II M E T O D O L O Š K I K O N C E P T

2.1	Problem istraživanja	10
2.2	Predmet istraživanja	12
2.3	Cilj istraživanja	13
2.4	Hipoteze u istraživanju	15
2.5	Način istraživanja	16
2.6	Naučna i društvena opravdanost istraživanja	19
2.7	Organizacija istraživanja	20

### III T E H N I Č K O – T E H N O L O Š K I A S P E K T I P E Ć I Z A P I R O L I Z U B E N Z I N A

3.1	Peći za pirolizu benzina	21
3.1.1	Hemija procesa	23
3.1.2	Parametri reaktora	25
3.1.3	Vreme zadržavanja	26
3.1.4	Temperatura reakcije	27
3.1.5	Pritisak reakcije	28
3.1.6	Inertnost	28
3.1.7	Matematički model	29
3.1.8	Opšti podaci o fabrici etilena i prikaz peći	30
3.2	Pregled materijala za cevi peći	34
3.2.1	Karakteristike materijala za cevi peći	34
3.2.1.1	<i>Otpornost na puzanje</i>	34
3.2.1.2	<i>Otpornost na koroziju</i>	35
3.2.1.3	<i>Postojanost karakteristika</i>	36
3.2.1.4	<i>Otpornost na formiranje koksa</i>	36
3.2.1.5	<i>Otpornost na naugljeničenje – cementaciju</i>	37
3.2.1.6	<i>Otpornost na krunjenje metala</i>	37
3.2.1.7	<i>Otpornost na nitraciju</i>	37



3.2.1.8	<i>Zavarljivost i izradljivost</i>	37
3.2.1.9	<i>Raspoloživost</i>	38
3.2.1.10	<i>Cena</i>	39
3.2.2	Razvoj materijala za cevi peći	40
3.3	Mehanizmi oštećenja cevi peći	48
3.3.1	Formiranje koksa	48
3.3.2	Gubitak elastičnosti	52
3.3.3	Termički zamor	53
3.3.4	Krt lom	53
3.3.5	Erozija	55
3.3.6	Pregrevanje	56
3.3.7	Ljudski faktor	58
3.3.8	Puzanje	58
3.3.9	Naugljeničenje – Cementacija	62
3.3.10	Oksidacija	66
3.3.11	Nitracija	67
3.3.12	Dehromizacija	68
3.4	Tehnička dijagnostika cevnih snopova peći za pirolizu benzina	69
3.4.1	Destruktivne metode	70
3.4.1.1	<i>Metalografska ispitivanja</i>	70
3.4.1.2	<i>Ispitivanje penetrantima</i>	76
3.4.1.3	<i>Ispitivanje tvrdoće</i>	77
3.4.1.4	<i>Ispitivanje puzanja</i>	78
3.4.1.5	<i>Procena degradacije putem merenja električne otpornosti</i>	79
3.4.2	Nedestruktivne metode	81
3.4.2.1	<i>Vizuelni pregledi</i>	82
3.4.2.2	<i>Ispitivanje malih uzoraka materijala za površine</i>	82
3.4.2.3	<i>Metalografska ispitivanja na licu mesta</i>	82
3.4.2.4	<i>Ultrazvučna ispitivanja</i>	83
3.4.2.5	<i>Merenje debljine oksidnih naslaga</i>	84
3.4.2.6	<i>Ispitivanje vrtložnim strujama</i>	84
3.4.2.7	<i>Akustična emisija</i>	84
3.4.2.8	<i>Holografija i tačkasta interferometrija</i>	85
3.4.2.9	<i>Laserska profilometrija</i>	85
3.4.2.10	<i>Termografija</i>	86
3.4.2.11	<i>Gamagrafska ispitivanja</i>	88
3.5	Optimalno preventivno održavanje	89

#### **IV TEORIJSKA ISTRAŽIVANJA**

4.1	Preporuke standarda zemalja EU za temperaturna oštećenja materijala	92
4.2	Procena preostalog životnog veka prema API RP 530 (ISO 13704)	102
4.3	Procena preostalog životnog veka prema API RP 579	106
4.4	Komparacija rezultata procene životnog veka dobivenih metodom	

Omega, API 530 i API 579	110
4.5 Primena API RP 581 standarda na cevi peći	125
4.5.1 Analiza verovatnoće	125
4.5.2 Određivanje verovatnoće pojave oštećenja usled puzanja tokom dužeg vremenskog intervala	127
4.5.3 Određivanje verovatnoće pojave oštećenja usled puzanja tokom kraćeg vremenskog intervala	128
4.5.4 Analiza konsekvenci	129
4.5.5 Određivanje rizika	133
4.5.6 Intervali pregleda	134
4.5.7 Analiza standarda API 581	134
4.6 Novi model pouzdanosti pirolititičkih peći sa interaktivnim otkazima komponenti	136

## **V EMPIRIJSKA ISTRAŽIVANJA**

5.1 Procena zamora materijala cevi peći usled puzanja	145
5.1.1 Analiza pravila životne frakcije (LFR)	151
5.1.2 Analiza metoda particionisanja istežanja (SRP)	153
5.1.3 Komparacija LFR i SRP metoda	156
5.2 Analiza mikrostrukturnih promena materijala cevi peći	158
5.2.1 Analiza mikrostrukturnih promena kod cevi	159
5.2.2 Analiza mikrostrukturnih promena kod kolena	164
5.3 Stohastički model oštećenja cevi peći	168
5.3.1 Verifikacija determinističkog rešenja	172
5.3.2 Stohastički model oštećenja usled puzanja	173
5.3.3 Verifikacija predloženog stohastičkog modela	181
5.4 Procena zakona raspodele verovatnoće životnog veka cevi	183
5.4.1 Opis modela	185
5.4.2 Metoda najmanjeg kvadrata	186
5.4.3 Metoda maksimalne verovatnoće	189

## **VI REZULTATI ISTRAŽIVANJA**

6.1 Sopstveni rezultati istraživanja	195
6.2 Vrednovanje rezultata istraživanja za nauku i praktičnu primenu	204

<b>VII ZAKLJUČCI</b>	
7.1 Dokazivanje glavne hipoteze	207
7.2 Naučni doprinos disertacije	208
7.3 Pitanja koja disertacija otvara	209
<b>VIII PREDLOZI DALJIH ISTRAŽIVANJA</b>	210
<b>LITERATURA</b>	212

# U V O D

Proizvodnja olefina je treći po veličini sektor posle proizvodnje amonijaka i prerade nafte. Olefini predstavljaju osnovu za proizvodnju polimera i elastomera ili se prevode u derivate kao što su aldehidi, alkoholi, glikoli, itd. Olefini se prvenstveno dobijaju krekovanjem velikih molekula ugljovodonika pomoću pare. Ovaj proces je takođe poznat pod imenom piroliza. Piroliza je reakcija u gasnoj fazi na veoma visokim temperaturama. Pošto je reakcija krajnje endotermna, izvodi se u cevnim snopovima u pećima. Danas postoje različite konstrukcije peći mada su fundamentalni principi slični.

Dizajn peći za pirolizu benzina je značajno poboljšan u proteklih 30 godina. Razvijene su nove legure i proces proizvodnje da bi se izašlo u susret surovim uslovima eksploatacije cevi u radijacionoj sekciji peći. Istovremeno postojali su trendovi u povećanju kapaciteta proizvodnje, tj. u smanjenju vremena zadržavanja u pećima, što za sobom povlači porast temperature i pritiska usled porasta protoka.

Cevni snopovi u pirolitičkim pećima su izloženi veoma oštrim uslovima eksploatacije, temperature se kreću i do 1150 °C (to je praktično krajnja gornja granica za većinu termootpornih legura koje se komercijalno izrađuju), oštri startovi / zaustavljanja, ciklusi dekoksovanja, oksidacija i nitracija loživog gasa sa spoljne strane cevi, a cementirajuća sredina sa unutrašnje strane nemilosrdno utiče na životni vek. U proizvodnji etilena procesuirani materijal (etan, propan, benzin, gas, itd.) se termički krekuje (kidanje ugljovodoničnih veza) u prisustvu pare na niskom pritisku i temperaturama od 780÷ 850°C.

Radijacioni cevni snopovi imaju ograničen životni vek a otkazi su prouzrokovani mnoštvom faktora, od kojih su mnogi povezani sa radom peći. Međutim svaka fabrika ima specifične režime rada i svojstvenu filozofiju rukovanja. Zbog toga svaka fabrika ima i tipične uzroke za otkaze što je od značaja za operatere u cilju analize i razumevanja tipičnog mehanizma otkazivanja.

Cevi se projektuju za nominalni životni vek od 100.000 radnih sati (11.4 godine) prema preporukama American Petroleum Institute (API). Međutim u praksi, koristan životni vek ovih cevi varira od 30.000 do 150.000 sati u zavisnosti od aktuelnih režima eksploatacije i karakteristika pojedinih materijala.

Vremenski interval zamene cevi je od izuzetne važnosti u smanjenju troškova i održavanju produktivnosti. Konzistentna preuranjena zamena cevi peći može jednu rafineriju srednje veličine koštati oko milion dolara godišnje. Optimizacija planiranja zamene cevi peći se može postići uvođenjem seta realnih kriterijuma koji su zasnovani na inženjerskim analizama. Kriterijum zamene cevi se zahteva za svaku vrstu peći ponaosob, a takođe i za svaku vrstu materijala.

Pocena životnog veka cevi je dugo bila problem za petrohemijsku i rafinerijsku industriju. Iako otkaz cevi peći nije veliki bezbednosni problem, procena preostalog životnog veka cevi je značajna zbog uštede troškova koji proizilaze iz optimizacije procesnih parametara ili redukcije frekvence ispitivanja i prevazilaženja neplaniranih zastoja. Idealno je da se zamena cevi odloži do sledećeg planskog zastoja. Međutim postoje određene poteškoće u proceni preostalog životnog veka cevi usled nedostatka tačnih podataka za početne vrednosti proračuna. Pošto se cevi peći proračunavaju na pužanje, iskustvo je pokazalo da stvarni životni vek cevi može biti daleko kraći od projektovanog.

Industrijski standardi za predviđanje preostalog životnog veka cevi su opisani u preporukama American Petroleum Institute 530 (API, 1988), a usvojeni su u ISO13704:2001 standardu. Razvoj standarda u drugim državama se kretao u sličnim smerovima i u mnogim slučajevima metodologija je pozajmljena iz prethodno raspoloživih pravilnika drugih zemalja. Rani pokušaji procene preostalog životnog veka delova izloženih uticaju visoke temperature poseduju metodologiju koja se zasniva na standardima bez otkaza. Na primer ASME N-47i Francuski RCC-MR koji imaju mnogo sličnosti, zasnovani su na proceni životnog veka neoštećenih struktura. Daleko savremenije metode izvode procenu preostalog životnog veka uz prisustvo oštećenja. Na primer, Nemački pristup na osnovu osnovnih prosečnih šupljina (FBH) razmatra otkrivanje prskotina i karakterisanje, a dokse Nemački dvokriterijumski metododnosi na stvaranje prskotina kao značajan faktor za procenu životnog veka i ne odnosi se na režime širenja prskotina. Naprednije tehnike odnose se na oštećenja izazvana interakcijom puzanje– zamoru smislu inicijalizacije i rasta oštećenja, a to su: Britanski R5, Francuski A16i BS-7910 koji imaju jasne sličnosti u pogledu metodologije.

Međutim, tačnost procene preostalog životnog veka zavisi od aktuelnih uslova eksploatacije cevi kao što su: temperatura, pritisak, vlažnost i stopa korozije. Na raspolaganju nam stoje pojednostavljene jednačine koje će pomoći u prvom pokušaju aproksimacije, međutim moraju se prevazići mnoge neodređenosti dok se ne dođe do realne procene životnog veka. Neodređenosti obuhvataju izbor reprezentativne ili efektivne temperature, pouzdano određivanje pada pritiska duž cevni zmijs, i usvajanje prosečnog tj. minimalnog napona na granici kidanja prilikom puzanja. Poteškoće koje ne mogu biti tako očigledne su: dozvoljeno odstupanje srednjeg prečnika, korišćenje odgovarajućeg vremenskog intervala za određivanje preostalog životnog veka kada visoka stopa korozije uzima svoj danak, i procena redukcije otpornosti materijala na puzanje kada nastupa oštećenje. Tačna procena preostalog veka ne zahteva samo tačne kalkulacije, nego već i potpunu procenu svih raspoloživih dokaza uključujući proširenje prečnika, tvrdoću, kao i stanje mikrostrukture.

Svrha ovog rada je da razvije pristup zasnovan na pouzdanosti za procenu srednjeg preostalog životnog veka cevi peći izloženih datim uslovima rada. Pristup takođe determiniše optimalane radne uslove za cevi tako da se ukupni troškovi minimiziraju. Predstavljena je i metodologija za determinisanje optimalnih intervala aktivnosti održavanja.

Doktorska disertacija pored uvoda sadrži i osam delova.

**Prvi deo rada** obuhvata kratak pregled prethodnih istraživanja izvedenih kako u svetu tako i na prostorima bivših republika SFRJ. Predstavljen je i pregled značajnijih radova o proučavanom problemu.

**Drugi deo rada** se odnosi na metodološki koncept istraživanja u okviru kojeg je definisan problem, predmet, cilj, hipoteze, način, naučna i društvena opravdanost, kao i organizacija istraživanja.

**Treći deo rada** predstavlja tehničko – tehnološke aspekte peći za pirolizu benzina gde su predstavljene izvedbe pirolitičkih peći i data hemija procesa, zatim je dat pregled materijala za cevi peći kao i mehanizmi oštećenja, a takođe i tehnička dijagnostika cevni snopova za pirolizu benzina i optimalni model preventivnog održavanja.

**Četvrti deo rada** predstavlja teorijska istraživanja i odnosi se na metode procene preostalog životnog veka. U okviru ovog poglavlja dat je pregled evropskih (RCC-MR, R5, A16 i BS-7910) i američkih standarda (API RP 530, 579, 581) koji se bave procenom životnog veka cevi peći koje rade u režimu puzanja. Izvršeno je poređenje rezultata procene životnog veka dobivenih različitim metodama. Prikazan je postupak primene standarda API 581 na cevi peći koje nisu obuhvaćene standardom i izveden je model pouzdanosti pirolitičkih peći sa interaktivnim otkazima komponenti.

**Peti deo rada** predstavlja empirijska istraživanja u okviru kojih su izvedena istraživanja procene zamora materijala HK40 usled puzanja i urađena je analiza mikrostrukturnih promena materijala HK40 nakon eksploatacije. Stohastički model oštećenja cevi peći usled puzanja i procena zakona raspodele verovatnoće životnog veka cevi su dati na kraju petog dela.

**U šestom delu rada** su predstavljeni rezultati istraživanja, dok su u **sedmom** izneti zaključci, a u **osmom** su dati predlozi za dalja istraživanja.

# Prvi deo

## PRETHODNA RAZMATRANJA

### 1.1 Dosadašnja istraživanja

Radovi Grant-a i Bucklin-a [39], Larson-a i Miller-a [64], kao i Robinson-a [90] su najznačajniji rani radovi u ovoj oblasti. Neki od njih se i danas uveliko primenjuju. Metoda za procenu preostalog životnog veka cevi simulacijom radnih uslova je prezentovana od strane Simonen-a i Jaske-a [96] i privlači velika interesovanja u inženjerskim krugovima. Bez sumnje, njihov rad igra značajnu ulogu u proučavanju karakteristika puzanja materijala i u rešavanju problema sigurnosti i procene životnog veka opreme izložene visokim temperaturama.

Larson i Miller su 1952. dali prve studije koje su se odnosile na vreme do oštećenja materijala na povišenim temperaturama eksploatacije:

$$\frac{1}{t} = Ae^{-Q/RT} \quad (\text{za konstantna opterećenja}) \quad (1.1)$$

gde je:  $t$  - vreme jednako vremenu do pojave oštećenja,

$A$  - konstanta,

$Q$  - aktivaciona energija procesa,

$R$  - gasna konstanta, i

$T$  – apsolutna temperatura.

Kada se odrede konstante  $A$ ,  $Q$  i  $R$  koristeći podatke iz eksploatacije ili laboratorijskih eksperimenata, onda je već lako proceniti vreme do pojave oštećenja za bilo koju radnu temperaturu. Robinson je 1952. godine a Grant i Bucklin su 1965. godine došli do sličnih izraza ali za slučajeve sa varijacijama temperature. Simonen i Jaske su 1985. razvili model simulacije predviđanja preostalog životnog veka cevi peći koji je od velikog značaja za projektante.

Njihov pristup je praktičan, međutim ne obezbeđuje preciznu ili tačnu procenu vremena do oštećenja ili preostalog životnog veka cevi.

Preporuke API RP 530 od strane American Petroleum Institute od 1988. godine koriste Larson – Miller – ov pristup iz 1952. godine. Obe Larson – Miller – ove krive (za minimalno i prosečno vreme) se koriste za temperaturne opsege između 565 ÷ 676°C. Larson – Miller – ove krive predstavljene u API RP 530 su ekstrapolirane iz viših regiona krive opterećenja. Ekstrapolacija će smanjiti tačnost u regionima sa manjim opterećenjem.

Preporuke API RP 530 su široko rasprostranjene u upotrebi za predviđanje preostalog životnog veka, mada su rezultati njene procene daleko od tačnih vrednosti, većinom zbog nepouzdanosti parametara.

Material Properties Council (MPC) industrije spojeva razvio je 1993. godine bržu, daleko tačniju, i industrijski prihvaćenu metodu za određivanje preostalog životnog veka procesne opreme nakon dužeg perioda eksploatacije. Metoda nazvana kao „Omega metoda” zasniva se na stepenu deformacije i koristi podatke nastale u okviru ispitivanja puzanja na temperaturama i naprezanjima što je moguće bliže eksploatacionim uslovima. Metodologija je rezultovala novom bazom podataka za procenu preostalog životnog veka. Koraci omega metode su:

- prvi korak: primena „Omega tabela i baza podataka” za determinisanje stanja opreme, tj. da li se oprema nalazi u „bezbednoj” zoni,
- drugi korak: pročešljavanje podataka i proračuna napreznja, i vraćanje na prvi korak,
- treći korak: prioritizacija pregleda determinisanjem stepena za dostizanje 1% napredovanja deformacije ili 20% preostalog veka, i
- četvrti korak: vađenje uzorka i sprovođenje testova za zateznu čvrstoću (kidanje materijala) u cilju dobijanja tačnih podataka potrebnih za Omega tabelu da bi se odredio (procenio) preostali životni vek.

Sa izuzetkom Dai-a koji je 1995 ÷ 1996 godine, koristio metodu ekstrema fuzzy funkcija za predviđanje preostalog životnog veka cevi peći, sve prethodne studije i teorije su se zasnivale na determinističkoj analizi. Takve studije nisu odražavale nepravilnosti u proizvodnji, uslovima eksploatacije, i karakteristikama materijala u različitim okruženjima.

Gong i saradnici su 1999. godine doveli u vezu taloženje karbida na zidove cevi i oštećenje materijala, tako da su razvili polukvantitativni model za predviđanje preostalog životnog veka cevi na osnovu oštećenja:

- a. Bez naslaga. Primarni karbidi se talože duž granice zrna. Odgovarajući procentualni deo životnog veka je u okviru 20% od preostalog životnog veka.
- b. Pojavljuje se nešto naslaga na granicama zrna s unutrašnje strane zidova cevi. Odgovarajući procentualni deo životnog veka je u okviru 20 ÷ 40 % od preostalog životnog veka.
- c. Nizovi naslaga se nalaze duž granice zrna. Porozni delovi formiraju mikropukotine. Odgovarajući procentualni deo životnog veka dostiže 40 ÷ 60 % od preostalog životnog veka.
- d. Porozni delovi se povezuju stvarajući mikropukotine. Neke mikropukotine su povezane sa pukotinama prouzrokovanim cementacijom sa unutrašnje površine cevi. Odnos životnog veka je oko 60 ÷ 75 % od životnog veka cevi.
- e. Mikropukotine su međusobno povezane, formiraju makropukotine ka spoljnoj površini. Dužina pukotina je oko 2/3 od debljine. Cev se hipotetički smatra istrošenom.



Industrijski standardi za predviđanje preostalog životnog veka cevi su opisani u preporukama American Petroleum Institute 530 (API, 1996)<sup>(1)</sup>, a usvojeni su u ISO 13704 : 2001 standardu. Razvoj standarda u drugim državama se kretao u sličnim smerovima i u mnogim slučajevima metodologija je pozajmljena iz prethodno raspoloživih pravilnika drugih zemalja. Rani pokušaji procene preostalog životnog veka delova izloženih uticaju visoke temperature poseduju metodologiju koja se zasniva na standardima bez otkaza. Na primer ASME N-47 i Francuski RCC-MR koji imaju mnogo sličnosti, zasnovani su na proceni životnog veka neoštećenih struktura. Daleko savremenije metode izvide procenu preostalog životnog veka uz prisustvo oštećenja. Na primer, Nemački pristup na osnovu osnovnih prosečnih šupljina (FBH) razmatra otkrivanje prskotina i karakterisanje, a Nemački dvokriterijumski metod se odnosi na stvaranje prskotina kao značajan faktor za procenu životnog veka i ne odnosi se na režime širenja prskotina. Naprednije tehnike odnose se na oštećenja izazvana interakcijom puzanje - zamor u smislu inicijalizacije i rasta oštećenja, a to su: Britanski R5, Francuski A16 i BS-7910 koji imaju jasne sličnosti u pogledu metodologije.

Doktorska disertacija predstavlja značajan doprinos, mogu slobodno reći i veliki poduhvat kod nas, jedne nedovoljno istražene oblasti. Istraživanja sprovedena u okviru bivših granica SFRJ a koja delom dotiču i temu doktorata u smislu mehanizma oštećenja i mikrostrukturnih promena nastalih kod cevi pirolitičkih peći bila su izvedena u SR Hrvatskoj 1989., a zatim po raspadu 1994. i 1997. godine od strane Dr Filetin Tomislava (redovni profesor na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu) i saradnika Kovačićek Franje i Lisjak Dragutina, dok su istraživanja novijeg datuma sprovedena 2010. godine u federaciji BIH od strane Mr Milana Plavšića.

## 1.2 Pregled literature o proučavanom problemu

Istražujući materiju iz predmetne oblasti došao sam do saznanja o sledećim istraživanjima drugih autora koje ću ukratko izložiti po hronološkom redu. Moram samo da napomenem da je bilo i ranijih radova, međutim oni su se samo delom doticali teme ili su po pitanju tačnosti metoda bili veoma konzervativni, tako da sam se odlučio za dole navedene:

M. Prager, **Development of the MPC Omega Method for Life Assessment in the Creep Range**, Pressure Vessels and Piping Conference, Minneapolis, Minnesota, June 19-23, 1994.

Metodologija koja je u ovom radu razvijena za karakterizaciju i procenu karakteristika materijala nakon upotrebe u režimu puzanja je primenjena na široki opseg materijala i komponenata. Obuhvata rezultate relativno kratkotrajnih ispitivanja i unapređuje bazu podataka o karakteristikama materijala. Suština metoda je definicija karakteristika materijala koje je autor označio sa grčkim slovom  $\Omega_p$ . Ovaj koeficijent efektivno predstavlja stepen na kome je sposobnost materijala da pruža otpor opterećenju

---

<sup>1</sup> American Petroleum Institute, Calculation of Heater-Tube Thickness in Petroleum Refineries, API Recommended Practice 530, 3rd Edition, Washington D.C., 1996.

degradirana deformacijom. Pošto je  $\Omega_P$  funkcija napona, temperature, i vrste opterećenja te je pogodna za parametarsku prezentaciju, i zbog toga je korisna u proceni životnog veka i akumulirane deformacije. Pokazano je da su vreme do otkaza i ukupno akumulirana deformacija konsekvence karakterizacije stepena deformacije, koje su ovde definisane, i odgovarajuće  $\Omega_P$  za određene režime rada i geometriju. Akumulirana deformacija, buduća deformacija, trenutni stepen puzanja, preostali životni vek, ukupno oštećenje, i stepen oštećenja su vrednosti koje se lako određuju. Metoda obuhvata koncepte Larson-Miller-a, Monkman-Grant-a, Robinson-a, Theta projection, Kachanov-a, i Norton-a.

Filetin T., Kovačiček F., Lisjak D., **Analiza mikrostrukturnih promjena u materijalu cijevi peći za pirolizu**, Tehnički vijesnik 4(1, 2) 13-17 (1997), Slavonski Brod, 1997.

Analizirane su cevi koje su bile u eksploataciji jedan duži vremenski period. Ispitivanja su pokazala pad istegljivosti usled mikrostrukturnih promena. Otkrivene su radijalne mikropukotine koje napreduju po granicama zrna gde su lančano izdvojeni karbidi. Polazna austenitna struktura mestimično je promenila karakteristike, došlo je do pojave delta ferita i sigma faze, koji zajedno s karbidima unutar i po granicama zrna smanjuju duktilnost materijala. Predlaže se primena vatrootpornih livova boljih karakteristika od postojećeg.

C.J. Moss, P. Barrien, A. Walczynski, **Life management of refinery furnace tubing**, International Journal of Pressure Vessels and Piping 77 (2000) 105-112.

Izvršena su ubrzana ispitivanja materijala cevi peći koja su naizgled imala najlošije karakteristike. Procena životnog veka u pećima je izvedena na osnovu izmerenih vrednosti temperature, pritiska, dimenzija cevi i izračunatog naprežanja primenom jednostavnih formula. Informacije dobivene iz studije procene životnog veka su uključene u program pregleda na osnovu rizika i date su maksimalne vrednosti temperatura da bi se postigao još jedan ciklus rada do ponovnog izvođenja peći iz upotrebe.

Dai Shu-Ho, **Methodology for predicting damage to structural materials and remaining life of process equipment**, International Journal of Pressure Vessels and Piping 78 (2001) 515-520.

U ovom radu je predložena nova tehnika za procenu oštećenja strukturalnih materijala i procenu preostalog životnog veka, zasnovana na setu fuzzy teorije i podršci kvantitativne metalografije pomoću tehnika prepoznavanja strukture. Termin „preostali životni vek” ovde odgovara terminu „mogući životni vek” koje ima neodređeno značenje. Tako da je predložena metoda ekstrema Fuzzy funkcije.

A.A. Kaya, P. Krauklis, D.J. Young, **Microstructure of HK40 alloy after high-temperature service in oxidizing / carburizing environment**, Materials Characterization 49 (2002) 23-34.

Autori su istraživali širenje prskotina i pojavu oksidacije tokom eksploatacije cevi od legure HK40 u etilenskim pećima. Materijal je analiziran primenom elektronskog mikroskopa, difrakcijom X – zraka i tehnikama mikroanalize nakon određenog perioda provedenog u eksploataciji (oko 25.000 h). Makropukotina u jednom od uzoraka omogućila je priliku za proučavanje mehanizma širenja pukotina i sekvence oksidacije konstitutivnih elemenata materijala. Istraživanja su otkrila da segregacija silicijuma tokom ukрупnjavanja karbida prethodi (tj. nagoveštava) širenju pukotina. Takođe, primećena je transformacija eutektoidnih karbida  $M_{23}C_6$  uz povećanje zrna u karbide  $M_7C_3$  sa teško oštećenom strukturom. Zapažena transformacija karbida nastaje iz normalnog stanja pomoću mehanizma i rezultuje  $\gamma$  taloženjem u  $M_7C_3$ . Hemijski sastav mikrostrukturalnih činilaca je dobiven pomoću mikroanalize i razvrstavanjem legirajućih elemenata prisutne faze primenom analize pomoću X zraka.

Wallace R. Blischke, D. N. Prabhakar Murthy, **Case Studies in Reliability and Maintenance** John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey 2003.

U delu knjige pod nazivom „*Part E. Cases with emphasis on operations optimization and reengineering*” u 22. poglavlju predstavljen je rad od autora Elsayed A. Elsayed, pod nazivom „*Mean Residual Life and Optimal Operating Condition for Industrial Furnace Tubes*”. Autor je u ovom radu predstavio pristup baziran na inženjersvu pouzdanosti za determinisanje srednjeg preostalog životnog veka cevi peći. Pristup polazi od primene rezultata dobivenih ubrzanim ispitivanjem i dovode se u vezu sa normalnim uslovima rada. Nakon toga je izveo izraz za funkciju pouzdanosti i procenio prosečni preostali životni vek za proizvoljne temperature iz radnog opsega. Pored toga determinisao je funkciju pouzdanosti i srednje vreme do otkaza za temperaturni interval rada.

Kaishu Guan, Hong Xu, Zhiwen Wang, **Analysis of failed ethylene cracking tubes**, Engineering Failure Analysis 12 (2005) 420–431.

Analizirano je oštećenje cevi etilenskih peći na visini od 5m u radijacionoj sekciji nakon jedne godine eksploatacije. Rezultat su ispuččenja i prskotine po obimu usmerene u pravcu dejstva brenera. Istraživanje je obuhvatilo ispitivanje zatezanjem, optičkim mikroskopom, elektronskim mikroskopom (SEM), spektroskopija disperzije energije (EDS), i analiza difrakcije X-zraka (XRD). Istraživanje se odnosi na otkrivena oštećenja cevi prouzrokovana pregrevanjem cevi usled neadekvatnog sagorevanja podnog brenera. Zapažen je značajan rast taloga karbida u zoni oštećenja što je dovelo do drastične redukcije istegljivosti materijala. Ispuččena mesta su takođe prikazala loptastu formu zrna. Krivljenje cevi, usled ograničenog rasta za vreme temperaturnih dilatacija izaziva prskotine.

Tito Luiz da Silveira and Iain Le May, **Reformer furnaces: materials, damage mechanisms, and assessment**, The Arabian Journal for Science and Engineering, Volume 31, Number 2C, December 2006., Dhahran, Saudi Arabia, 2006.

U ovom radu je obrađena metodologija procene oštećenja, i razvijen je koncept karakterističnih krivi za procenu oštećenja koji će pružiti pojednostavljene procedure za realniju procenu stepena oštećenja i preostalog životnog veka cevi reformerskih peći. Kao primer data je procena preostalog životnog veka za slučaj kada se otkriju pukotine kroz zid hедера peći primenom nelinearnog pristupa mehanike loma.

Mr Milan Plavšić, **Mogućnost stabiliziranja senzibilizirane i naprsle strukture materijala katalitičkih cijevi reforming peći**, doktorska disertacija Mašinski fakultet, Istočno Sarajevo, 2010.

U radu se analizira prekomerno naugljeničenje materijala eksploatisane katalitičke cevi i uzroci pojave naponske korozije. Težište istraživanja je usmereno na mogućnost stabiliziranja jako senzibilizirane strukture materijala katalitičke cevi, kako bi ponovnim zavarivanjem „zdravih” segmenata katalitičkih cevi s potpuno stabiliziranom strukturom katalitičkoj cevi produžili eksploatacioni vek.

# Drugi deo

## METODOLOŠKI KONCEPT

### 2.1 Problem istraživanja

Tehnološki razvoj vodi ka sve većoj pouzdanosti tehničkih sistema, i čini da tehnički sistemi postaju sve složeniji po konstrukciji i nameni. Zahtevi za sigurnost funkcionisanja tehničkih sistema predstavljaju bitnu osnovu za planiranje i praktičnu realizaciju kvalitetnih i neophodnih postupaka tehnologije održavanja. Da bi se održao zahtevani nivo sigurnosti funkcionisanja tehničkih sistema potrebno je obraćati i sve više pažnje poklanjati njihovom održavanju i organizaciji eksploatacije.

U procesnim postrojenjima i elektranama, veliki značaj i uticaj na ekonomičnost poslovnog sistema imaju:

- raspoloživost objekta,
- pogonska sigurnost, i
- vek trajanja podsistema i njihovih komponenti.

Neplanirani otkazi procesne opreme (peći, turbine, generatori...) imaju za posledicu:

- značajne gubitke u procesu proizvodnje,
- havarije koje ugrožavaju zaposlene i prouzrokuju materijalne štete, i
- velike troškove opravke.

Iskustva u eksploataciji su pokazala da najveći deo radnih sredstava ne gubi svoje funkcionalne karakteristike odjednom, već je to kontinuiran proces. Nagoveštaji oštećenja, otkaza i havarije se pojavljuju ranije. Da bi se smanjili otkazi procesne opreme i izbegle havarije, potrebno je pravovremeno prepoznati promene stanja sistema. To je moguće ostvariti nadzorom zaposlenih i primenom metoda tehničke dijagnostike.

Veliki broj opreme i druge inženjerske strukture u nuklearnim elektranama, kotlarnicama, hemijskoj, petrohemijskoj i ostalim procesnim industrijama su istovremeno izložene dejstvu opterećenja i visoke temperature. Novi trendovi u povećanju radne temperature su stavili veliki praktični značaj na predviđanje preostalog životnog veka i starenje materijala na povišenim temperaturama, kao i na garanciju pouzdanosti opreme koja će udovoljiti ovim trendovima.

U disertaciji će se akcenat staviti na dijagnostiku oštećenja i procenu preostalog životnog veka cevi etilenskih peći, tj. peći za pirolizu benzina.

Cevni snopovi u pirolitičkim pećima su izloženi veoma oštrim uslovima eksploatacije, temperature se kreću i do 1150 °C (to je praktično krajnja gornja granica za većinu termootpornih legura koje se komercijalno izrađuju), oštri startovi /

zaustavljanja, ciklusi dekoksovanja, oksidacija i nitracija loživog gasa sa spoljne strane cevi, a cementirajuća sredina sa unutrašnje strane nemilosrdno utiče na životni vek. U proizvodnji etilena procesuirani materijal (etan, propan, benzin, gas, itd.) se termički krekuje (kidanje ugljovodoničnih veza) u prisustvu pare na niskom pritisku i temperaturama od  $780 \div 850$  °C.

Puzanje materijala je primarni uzrok oštećenja cevi peći. Obično počinje unutar zida cevi na oko 2/3 od spoljašnje površine, što je nemoguće utvrditi metalografskim ispitivanjem na licu mesta. Ova pojava je u suprotnosti sa pojavama koje se javljaju kod pregrejača pare i sabirnika gde se puzanje javlja na spoljašnjoj površini cevi što je očigledno i lakše otkriti. Ostala oštećenja cevi nastaju usled cementacije, termalnih šokova, kao i rekristalizacije koja nastaje usled neželjenih pregrevanja cevi. Ove vrste oštećenja mogu biti određene primenom destruktivnih metalografskih metoda. Oštećenje se otkriva pravljenjem preseka cevi i pažljivim poliranjem, a zatim se vrši obeležavanje oštećenja i vrste.

Cevi se projektuju za nominalni životni vek od 100.000 radnih sati (11.4 godine) prema preporukama American Petroleum Institute (API). Međutim u praksi, koristan životni vek ovih cevi varira od 30.000 do 150.000 sati u zavisnosti od aktuelnih režima eksploatacije i karakteristika pojedinih materijala.

Vremenski interval zamene cevi je od izuzetne važnosti u smanjenju troškova i održavanju produktivnosti. Konzistentna preuranjena zamena cevi peći može jednu rafineriju srednje veličine koštati oko milion dolara godišnje. Optimizacija planiranja zamene cevi peći se može postići uvođenjem seta realnih kriterijuma koji su zasnovani na inženjerskim analizama. Kriterijum zamene cevi se zahteva za svaku vrstu peći ponaosob, a takođe i za svaku vrstu materijala.

Za zamenu cevi, vrednosti izduženja se uopšteno kreću u granicama od  $3 \div 8$  % u zavisnosti od vrste materijala cevi. U većini slučajeva je kriterijum od 3% izduženja u prečniku (proširenje) za sve cevne materijale u različitim primenama nepotrebno konzervativan. Čak i skromna poboljšanja u realnosti kriterijuma zamene mogu imati dramatične efekte prilikom redukcije troškova opreme. Da dodamo još, da su kriterijumi koji se širom primenjuju za sve peći suviše konzervativni za većinu peći dok su nekonzervativni za peći koje spadaju u određene kategorije. Cevi peći koje bivaju oštećene prilikom eksploatacije mehanizmom cementacije postaju krte, tako da mogu otkazati i pri manjem poprečnom izduženju od 3% dok je debljina zida cevi nešto malo manja od vrednosti nove cevi. Izuzetno je važno zbog toga imati kriterijume za zamenu cevi koji nisu samo zasnovani na konzistentnoj i realističnoj inženjerskoj analizi, nego već takođe da uzimaju u obzir i razlike u primeni peći.

Procena životnog veka cevi je dugo bila problem za petrohemijsku i rafinerijsku industriju. Iako otkaz cevi peći nije veliki bezbednosni problem, procena preostalog životnog veka cevi je značajna zbog uštede troškova koji proizilaze iz optimizacije procesnih parametara ili redukcije frekvence ispitivanja i prevazilaženja neplaniranih zastoja. Idealno je da se zamena cevi odloži do sledećeg planskog zastoja. Međutim postoje određene poteškoće u proceni preostalog životnog veka cevi usled nedostatka tačnih podataka za početne vrednosti proračuna. Pošto se cevi peći proračunavaju na puzanje, iskustvo je pokazalo da stvarni životni vek cevi može biti daleko kraći od projektovanog.

Najkritičnije odluke po pitanju menadžmenta životnog veka cevi peći su:

- Kada se peć treba pregledati ?
- Kada se trebaju zameniti cevi ?

- Da li je produženje životnog veka date peći moguće ?
- Kakav uticaj imaju naslage u cevima na životni vek ?

Međutim, tačnost procene preostalog životnog veka zavisi od aktuelnih uslova eksploatacije cevi kao što su: temperatura, pritisak, vlažnost i stopa korozije. Na raspolaganju nam stoje pojednostavljene jednačine koje će pomoći u prvom pokušaju aproksimacije, međutim moraju se prevazići mnoge neodređenosti dok se ne dođe do realne procene životnog veka. Neodređenosti obuhvataju izbor reprezentativne ili efektivne temperature, pouzdano određivanje pada pritiska duž cevni zmijsa, i usvajanje prosečnog tj. minimalnog napona na granici kidanja prilikom puzanja. Poteškoće koje ne mogu biti tako očigledne su: dozvoljeno odstupanje srednjeg prečnika, korišćenje odgovarajućeg vremenskog intervala za određivanje preostalog životnog veka kada visoka stopa korozije uzima svoj danak, i procena redukcije otpornosti materijala na puzanje kada nastupa oštećenje. Tačna procena preostalog veka ne zahteva samo tačne kalkulacije, nego već i potpunu procenu svih raspoloživih dokaza uključujući proširenje prečnika, tvrdoću, kao i stanje mikrostrukture.

## 2.2 Predmet istraživanja

Ovaj rad je posvećen problemima oštećenja cevi pirolitičkih peći u fabrici etilena, kao i metodima procene preostalog životnog veka cevi peći, uopštava teorijska i praktična istraživanja koja su sprovedena za vreme trajanja doktorskih studija. Samim naslovom istraživanja, njegovom temom, preliminarno je određen predmet istraživanja.

Peć za pirolizu benzina je uzeta kao tipičan primer za proučavanje preostalog životnog veka na osnovu prikupljenih podataka o cevima peći, kao što su: redukcija debljine zida, povećanje spoljnog prečnika, tvrdoća i metalografska istraživanja, itd., a eksperimentalni rezultati su dobiveni iz pripremljenih isečaka cevi peći.

Razmatra se veliki kompleks pitanja povezan sa problemom tačnosti procene životnog veka. Ubrzavanje ispitivanja postiže se korišćenjem prilaza koji obezbeđuju dobijanje potrebne količine informacija u najkraćem roku u odnosu na predviđene uslove i režime eksploatacije tehničkih sistema.

Proizvođači cevi obično primenjuju ubrzana ispitivanja za procenu životnog veka materijala izloženih oštećenjima usled puzanja. Podaci dobiveni iz ovih ispitivanja uključuju temperaturu, opterećenje i vreme do loma. Podaci iz ovih ispitivanja se koriste za procenu raspodele životnog veka materijala. Stručnjaci su tokom godina dolazili do raznih izraza koje su predlagali za predstavljanje odnosa između ovih promenljivih. Korišćenje temperaturno-vremenskog parametra (TTPs) za predstavljanje i ekstrapolaciju podataka o puzanju na visokim temperaturama se koristilo tokom dugog niza godina. TTPs je u osnovi funkcija korelacije varijabli prilikom ispitivanja oštećenja izazvanih puzanjem, tj. opterećenja, temperature i vremena.

Predmet istraživanja su metode i modeli procene preostalog životnog veka koji se zasnivaju na teoriji pouzdanosti. Međutim svi problemi vezani za njihovu praktičnu primenu potiču od činjenice da pomenuta materija, ne predstavlja oblast tako blisku inženjerima i tehničarima. Ispituje se primenljivost Larson - Miller-ovog parametra na

procenu zakona raspodele životnog veka u funkciji od temperature i opterećenja. Nelson [76] navodi da se tehnike za ubrzana ispitivanja životnog veka mogu koristiti za procenu različitih procenata životnog veka komponentata primenom Larson – Miller-ovog parametra. On takođe tvrdi da se disperzija životnog veka često zapostavlja u metalurškim studijama. Statističku raspodelu životnog veka usled puzanja ne navode proizvođači, a nisu je dali ni Jaske i Simonen [96] u svom radu. Metod regresije najmanjeg kvadrata je korišten od Jaske i Simonen-a [96] radi pronalaženja konstanti materijala koje se dobijaju iz analize ubrzanih ispitivanja životnog veka na puzanje, i dali su pretpostavku za  $\log t_r$  koja je promenljiva, da sledi normalnu raspodelu. Međutim, autori nisu prodiskutovali validnost ove pretpostavke, što je potrebno uraditi jel se dešava da se polazi od pogrešnih pretpostavki po pitanju raspodela verovatnoće. Izraz  $\log t_r$  može veoma dobro slediti i neke druge raspodele, kao npr. Weibull-ovu.

Takođe će se predstaviti način na koji treba da se koristi metoda najmanjeg kvadrata i maksimalne verovatnoće tako da odgovara svim statističkim raspodelama koje mogu slediti životni vek usled puzanja.

## 2.3 Cilj istraživanja

Napredak tehnike čini da tehnički sistemi postaju sve složeniji po konstrukciji i nameni. Zato je potrebno obraćati i sve više pažnje poklanjati njihovom održavanju i organizaciji eksploatacije. Tehnološki razvoj vodi ka sve većoj pouzdanosti tehničkih sistema, ali je sada zbog novih, hidropneumatskih, komponentata i elektronike u njima, tehnologija održavanja tehničkih sistema znatno složenija. Zbog toga se zahteva, i viši nivo znanja i timski rad radnika u sistemu održavanja.

Sve veća složenost sredstava i sistema i sve veći troškovi njihovog razvoja, proizvodnje i eksploatacije u prvi plan ističu značaj pouzdanosti kao bitnog faktora kvaliteta i raspoloživosti. Ovo je značajno ne samo za profesionalne, namenske uređaje i sisteme, od kojih zavisi funkcionisanje velikih tehničko tehnoloških celina, već i za rad običnih kućnih aparata, saobraćajnih sredstava, opreme i uređaja najšire primene. Vrlo je važno da sve što služi čoveku radi bez zastoja, sa što manje otkaza, pouzdano, da uređaji i sistemi budu što manje van funkcije, da im je raspoloživost za upotrebu, tokom celog životnog veka što veća. Otuda je povećanje pouzdanosti uređaja i čitavih sistema imperativ za sve učesnike u procesu razvoja, proizvodnje i održavanja tehničkih sistema.

Sigurno je da svaki rukovodilac održavanja, bez obzira na mesto i ulogu koje ima u datom procesu, želi da obezbedi pouzdan i bezbedan rad sistema uz minimalne materijalne troškove i utroške energije, i ovaj rad predstavlja doprinos tim naporima. Duboko sam ubeđen da prvi korak ka tom cilju predstavlja razumevanje i usvajanje znanja iz teorije verovatnoće i matematičke statistike, koje predstavljaju „azbuku" teorije pouzdanosti tehničkih sistema.

Zahtevi za visokom pouzdanošću koji se postavljaju pred savremene tehničke sisteme imaju za posledicu da su njihova ispitivanja za ocenu preostalog životnog veka u uslovima realne eksploatacije povezana sa velikim utroškom vremena, materijala i sredstava. Zato se intenzivno istražuju i dobijaju praktičnu primenu različiti postupci



ubrzanih ispitivanja čiji je krajnji cilj smanjenje troškova ispitivanja i povišenje efektivnosti tehničkih sistema.

Postupci ispitivanja za ocenu preostalog životnog veka cevi imaju poseban značaj jer oni, s jedne strane, predstavljaju jedinstvene izvore polaznih podataka koji se koriste za analitički proračun ili stohastičko modeliranje. S druge strane, ispitivanje je u većini slučajeva osnovni način utvrđivanja ili potvrde stanja cevi.

U okviru istraživanja će se razviti pristup zasnovan na pouzdanosti za procenu srednjeg preostalog životnog veka cevi peći izloženih datim uslovima rada. Pristup takođe determiniše optimalane radne uslove za cevi tako da se ukupni troškovi minimiziraju. Predstavljena je i metodologija za determinisanje optimalnih intervala aktivnosti održavanja.

Cilj ovog rada je da obezbedi seriju alata za donošenje odluka koji će omogućiti inženjerima da optimizuju preporuke za zamenu cevi prema njihovim planovima proizvodnje i održavanja. Sve fabrike imaju usvojene procedure za zamenu cevi, neke ih menjaju prema naviknutoj praksi a neki prema preporuci iz projekta. Kriterijum zamene cevi se izvodi iz game determinističkih proračuna životnog veka API 530 metodologije (jedna vrednost za temperaturu i pritisak) za fiksnu vrednost debljine zida. Kriterijum zamene u našim istraživanjima se uopšte kreće od fiksne vrednosti nekoliko puta manje nego prema preporukama iz API standarda, sa jedne strane, i minimalne debljine zida preporučene od strane proizvođača, s druge strane. Mnoge fabrike priznaju da cevi peći otkazuju u velikoj meri zbog puzanja i korozije na visokim temperaturama tako da one koriste dvojni kriterijum za zamenu cevi koji se sastoji od promene prečnika i debljine zida cevi. Cev se menja ako je jedan od kriterijuma zadovoljen. Procena izduženja ili smanjenja debljine zida je poželjna za svaki naredni ciklus rada peći (od uvođenja pa do izvođenja peći iz rada).

Istraživanjem mehanizma oštećenja i procene preostalog životnog veka se želi postići:

- redukcija rizika otkaza cevi i konsekventnog gubitka u proizvodnji,
- definisanje optimalnog vremena zamene cevi,
- kvantifikacija rizika rada cevi i anticipacija režima eksploatacije u narednom periodu,
- kvantifikacija oštećenja cevi u pogledu ukupnog vremena u radu, pregrevanja, malog protoka, ili prekomernog porasta pritiska,
- procena životnog veka na osnovu anticipiranih parametara rada u narednom periodu uzimajući u obzir naslage na zidovima cevi,
- prioritizacija peći u pogledu stepena iskorištenosti životnog veka cevi tako da se resursi onda mogu fokusirati na te peći radi tačne predikcije preostalog vremena,
- identifikacija primarnog modela oštećenja i razvijanje optimalnog metoda pregleda na osnovu modela oštećenja,
- određivanje onih peći u kojima se temperatura cevi može pouzdano podići sa trenutne vrednosti u cilju povećanja produktivnosti bez većeg smanjenja preostalog životnog veka,

- definisanje dozvoljenog stepena temperature zidova cevi koji će omogućiti određenoj peći da s pouzdanošću dočeka sledeći planski zastoje (planirano izvođenje peći iz rada), i
- omogućiti inženjerima održavanja i tehnologima da smanje rizik i poboljšaju profitabilnost.

## 2.4 Hipoteze u istraživanju

Na osnovu problema istraživanja formulisanog u vidu zahteva za razvojem postupaka procene preostalog životnog veka definisani su ciljevi istraživanja u doktorskoj disertaciji. Ciljevima istraživanja se bliže određuju pravci rešavanja postavljenog problema, a pretpostavke od kojih se pri tome pošlo odnose se na seriju alata za donošenje odluka koji će omogućiti inženjerima da optimizuju preporuke za zamenu cevi prema njihovim planovima proizvodnje i održavanja.

Prilikom opredeljivanja za temu: „Dijagnostika oštećenja i procena preostalog životnog veka cevi etilenskih peći“ imali smo u vidu aktuelnost, ali i svu složenost ove problematike u sklopu politike daljeg razvoja Tehničke dijagnostike. U našem istraživanju pošli smo od sledećih hipoteza:

### Opšta hipoteza

Cevi peći imaju ograničeni životni vek koji zavisi od materijala cevi, radne sredine i režima eksploatacije. Rizik otkaza prilikom eksploatacije se srazmerno povećava s vremenom provedenim u radu. Vremenski interval zamene cevi je od izuzetne važnosti u smanjenju troškova i održavanju produktivnosti. Optimizacija planiranja zamene cevi peći se može postići uvođenjem seta realnih kriterijuma koji su zasnovani na inženjerskim analizama. Kriterijum zamene cevi se zahteva za svaku vrstu peći ponaosob, a takođe i za svaku vrstu materijala. S obzirom na gore navedeno može se formulisati opšta hipoteza:

*Primenom dijagnostike oštećenja i metoda procene životnog veka cevi etilenskih peći utiče se na prevazilaženje neplaniranih zastoja, produžetak veka eksploatacije cevi i samim tim na smanjenje ukupnih troškova.*

### Pomoćne hipoteze

Glavna hipoteza će biti proverena putem sledećih pomoćnih hipoteza:

#### PH1:

Identifikacija primarnog modela oštećenja će doprineti razvijanju optimalne metode tehničke dijagnostike.

#### PH2:

Ispitivanjem oštećenja izazvanih interakcijom puzanje-zamor s aspekta raznih opterećenja talasnog oblika, mogu se definisati kriterijumi za projektovanje cevi etilenskih peći.

## 2.5 Način istraživanja

### - metode, tehnike, instrumenti i uzorak istraživanja -

Prilikom rešavanja problema mehanizma oštećenja i procene preostalog životnog veka bilo je neophodno da se primene interdisciplinarna znanja stečena tokom osnovnih, posdiplomskih i doktorskih studija. Inače, istraživanje je teklo po metodološki poznatom i uobičajnom redu. Definisani su cilj i predmet istraživanja, objašnjen značaj istraživanja, pregledana dostupna literatura koja obrađuje dosadašnja istraživanja, ostvaren uvid u dosadašnja istraživanja u konkretnoj oblasti istraživanja, formulisani hipotetički stavovi istraživanja, prikupljeni neophodni podaci i klasifikovani, izvršena obrada i izneti rezultati. Na kraju su dati predlozi za dalja istraživanja i naveden spisak korišćene literature.

Metodologija istraživanja odgovara redosledu izlaganja materije u doktorskoj disertaciji. U okviru doktorske disertacije korišćene su sledeće metode naučno-istraživačkog rada:

- **Analičko-sintetička metoda** – Analiza je primenjena u pristupu upoznavanja sa postojećim istraživanjima u predmetnoj oblasti. Nakon završenih eksperimenata urađena je analiza i sinteza, koja rezultuje zaključcima i sudovima o mogućnostima primene predloženih modela.

- **Metoda dedukcije i indukcije** – Nakon završenog eksperimentalnog ispitivanja u laboratorijskim uslovima, indukcijom se došlo do opštih zaključaka, da se rezultati ispitivanja mogu iskoristiti za determinisanje preostalog životnog veka cevi i na osnovu njih se može doneti odluka za koje vreme će se morati zameniti cevi.

- **Matematička metoda** – U disertaciji se koriste matematičke i numeričke metode za predikciju i validaciju rezultata eksperimentalnih ispitivanja. Matematička metoda omogućava da se iz izmerenih veličina, korišćenjem adekvatnog matematičkog aparata, izračuna preostali životni vek.

- **Statistička metoda** – Izmerene veličine prikupljene pomoću sistema za akviziciju, obrađene su pomoću softvera. Za statističku analizu greške merenja, korišćena je Gausova kriva raspodele ili zakon normalne raspodele. Određena je vrednost srednjeg kvadratnog odstupanja od srednje vrednosti merenja  $\sigma$ , koje se naziva i standardna kvadratna greška (standardna devijacija).

- **Komparativna metoda** – Istraživanje u okviru disertacije obuhvata uporedo korišćenje nekoliko eksperimentalnih tehnika koji sa različitih aspekata osvetljavaju problem dijagnostikovanja pojava kod cevi u pećima. Metoda je korišćena za poređenje rezultata merenja.

- **Naučni eksperiment** – je obuhvatio eksperiment izveden u laboratorijskim uslovima i eksperiment u eksploatacionim uslovima. *Laboratorijski eksperiment* predstavlja ispitivanje epruveta na kidalici i ispitivanje pripremljenih uzoraka na mikroskopu tipa SEM i TEM. U eksploatacionim uslovima su sprovedena ultrazvučna merenja debljine zida cevi i pregledi termovizijskom kamerom.

Ekperimentator vodi ekperiment uz saradnju grupe istraživača. Ekperimentalni proces je realizovan uz kompletno ispunjavanje zahtevanih uslova ispitivanja (opterećenja, brzine unošenja opterećenja, broja ciklusa i sl.). Struktura naučnog ekperimenta koju čine: proučavanje problematike, definisanje problema istraživanja, odabir metoda istraživanja, priprema ekperimenta, realizacija ekperimenta, analiza rezultata ekperimenta, interpretacija rezultata, donošenje zaključaka i smernica za dalji rad na izabranom problemu u potpunosti je zastupljena. Rezultati iz kojih proizlaze naučna saznanja, zaključci i predlozi dati su u obliku fotografija, tabela i dijagrama.

Treba reći da neke od razmotrenih metoda ispitivanja zahtevaju određeno znanje iz oblasti matematike, teorije verovatnoće, termodinamike i otpornosti materijala. Ipak, ova prepreka je lako savladiva jer je svaka razmotrena metoda detaljno ilustrovana sadržajnim primerom, koji omogućava da se pronikne u praktičnu primenu metode.

Za teorijska i ekperimentalna istraživanja u doktorskoj disertaciji bilo je neophodno prikupiti radove autora koji se bave proučavanjem ove predmetne oblasti. Njihovim proučavanjem došlo se do saznanja o dostignućima i o mogućim pravcima daljih istraživanja. Takođe smo koristili rezultate ekperimentalnih istraživanja drugih autora da bi smo u našem pristupu izvršili verifikaciju matematičkog modela i predložili rešenja za usavršavanje konkretnih matematičkih modela.

Za ekperimentalna istraživanja postupak prikupljanja podataka se izvodio u zavisnosti od zahteva i uslova proizvodnje, a za teorijska ispitivanja, za potvrdu i komparaciju matematičkih modela korišćena su ekperimentalna i teorijska istraživanja drugih autora. Inače obrada podataka se vršila prema razvijenim matematičkim modelima u doktorskoj disertaciji uz primenu računara.

Analiza mehanizama oštećenja i procena preostalog životnog veka cevi etilenskih peći je sprovedena u Hemijskoj Industriji Pančevo „DP Petrohemija“ u fabrici etilena. Uzorci odabranih cevi i kolena iz radijacione sekcije peći su poslani na laboratorijska ispitivanja u Vojnotehnički institut i Institut Goša u Beogradu. Laboratorije su akreditovane prema međunarodnim standardima 17025 i ISO 9001. Ispitivanje mehaničkih karakteristika je vršeno prema ASTM A370. Cevi su bile u radu 5 i 8 godina. Uzorci za metalografska ispitivanja su isečeni iz cevi pomoću testere velike brzine a ispitani su u primljenom stanju.

Za ekperimentalna istraživanja postupak prikupljanja podataka se izvodio na dva načina, jedan deo podataka je prikupljen iz projektno tehničke dokumentacije, a do drugih smo dolazili merenjem. U disertaciji su korišćeni sledeći instrumenti:

- Skenirajući elektronski mikroskop Hitachi S900 (SEM),
- Transmisioni elektronski mikroskop JEOL 2000FX (TEM),
- Elektromehanička kidalica RM100 i RM400,
- Servohidraulična kidalica MTS i visokofrekventni pulzator firme AMSLER-ROELL+KORTHAUS (dinamička opterećenja),
- Aparat za ultrazvučna merenja Olympus OmniScan SX, i
- Termovizijska kamera Fluke Ti20

Ekperimentalno istraživanje obuhvata:

1. Makrotestove – obuhvata proučavanje površine, merenje debljine zida cevi i tvrdoće, i ispitivanje pomoću penetranata (uzorci su kružni poprečni preseki cevi određene debljine).
2. Metalografska ispitivanja
3. Testove mikrotvrdoće
4. Ispitivanje mehaničkih karakteristika – obuhvata ispitivanje zatezne čvrstoće na sobnoj temperaturi i na povišenoj temperaturi, ispitivanje puzanja pri konstantnom i promenljivom opterećenju, kao i ispitivanje loma pri unutrašnjim naponima.

Prikupljeni podaci su smešteni u tabelu, a za obradu podataka korišten je računar. Inače obrada podataka se vršila prema razvijenim modelima u doktorskoj disertaciji. Obradeni podaci su na kraju rada prezentovani tabelarno i grafički da bi se u potpunosti mogla videti ispravnost postavljene hipoteze koja je data na samom početku doktorske disertacije.

## 2.6 Naučna i društvena opravdanost istraživanja

Doktorska disertacija predstavlja značajan doprinos, mogu slobodno reći i veliki poduhvat kod nas, jedne nedovoljno istražene oblasti. Istraživanja sprovedena u okviru bivših granica SFRJ a koja delom dotiču i temu doktorata u smislu mehanizma oštećenja i mikrostrukturnih promena nastalih kod cevi pirolitičkih peći bila su izvedena u SR Hrvatskoj 1989, 1994 i 1997. godine od strane Dr Filetin Tomislava (redovni profesor na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu) i saradnika Kovačićek F. i Lisjak D., dok je istraživanje novijeg datuma sprovedeno 2010. godine u federaciji BIH od strane Mr Milana Plavšića. Doktorska disertacija sa temom Dijagnostika oštećenja i procena životnog veka cevi etilenskih peći predstavlja doprinos za aktivno uključnje i održavanje koraka sa svetom u preventivnom, redovnom i havarijskom održavanju kompleksnih, industrijskih sistema, prevenciji neželjenih havarija, svakodnevnom održavanju i planiranju radova u remontu, kreiranju i razvoju održavanja i smanjenja ukupnih troškova održavanja velikih sistema koji mogu da budu znatni, pa samim tim zahtevaju značajno angažovanje stručnjaka i materijalnih sredstava. Istraživanja rađena u okviru ove doktorske disertacije pokazala su da li je naša zemlja sa svojim kapacitetima (kadrovskim i materijalnim), sposobna da se uključi u svetske projekte, koji se bave eksperimentalnim istraživanjima određivanja mehanizama oštećenja i procene životnog veka.

Istraživanja, u okviru disertacije značajno, doprinose naučnom sagledavanju problematike održavanja tehničkih sistema i upoznavanju sa problemima koji nastaju pri eksploataciji pirolitičkih peći, čime se omogućava rano predviđanje mogućih problema i njihovo otklanjanje.

Metodologija istraživanja, pregled opreme i detaljan opis postrojenja i uređaja, korišćenih u eksperimentalnom radu u laboratoriji i u realnim eksploatacionim uslovima, koji su prezentovani u ovoj doktorskoj disertaciji, korisna su literatura za buduća istraživanja u ovoj oblasti, pogotovo za mlađe istraživače i stručnjake. Primenom tehničke dijagnostike, data je mogućnost optimalnog korišćenja opreme, čime se eksploatacioni vek opreme povećava, a daje se mogućnost uticaja na sistem održavanja u povratnoj sprezi.

Društvena opravdanost ovog istraživanja jeste udovoljavanje praktičnim potrebama – rešavanju konkretnih problema održavanja u preduzeću. Posebno su aktuelna i naučno opravdana ovakva istraživanja čiji rezultati mogu doprineti optimalnom korišćenju resursa preduzeća i racionalizaciji održavanja tehničkih sistema u celini. Sve ovo, svakako, ima i svoju širu društvenu aktuelnost i značaj, jer napredak nauke i tehnologije predstavlja presudan faktor ekonomskog i ukupnog društvenog razvoja i progresa. Primenom novog modela održavanja bi se postiglo smanjenje troškova i na taj način ostvarila veća produktivnost preduzeća. Samim tim se konkurentnost privrede naše zemlje podiže na viši nivo.

## 2.7 Organizacija istraživanja

Svrha utvrđivanja organizacije istraživanja je da precizno definiše način kako će biti obavljene aktivnosti u okviru ovog istraživanja, ko i gde će da obavi pojedine aktivnosti, koja ovlašćenja i odgovornosti imaju pojedinci koji učestvuju u istraživanju [1]. Organizaciona struktura je izabrana tako da odgovara veličini i tehničko-tehnološkoj složenosti istraživanja. Pošto od pravilnog izbora organizacionog oblika zavisi uspeh istraživanja, to se ovom zadatku pristupilo veoma ozbiljno i savesno.

Inicijator istraživanja tj. kandidat uočio je problem i formulisao ga. Kandidat je ujedno i rukovodilac ovog istraživanja. Dugogodišnjim prikupljanjem i proučavanjem literature iz oblasti procene životnog veka cevi peći i dugogodišnjim radom i znanjem, stečenim u petnaestogodišnjem radu u Hemijskoj Industriji Pančevo „DP Petrohemija“ kandidat je došao na ideju da će se proučavanjem i razumevanjem mehanizama oštećenja i procene životnog veka cevi etilenskih peći uticati na smanjenje troškova koji proizilaze iz optimizacije procesnih parametara, redukcije frekvenci postupaka tehničke dijagnostike i prevazilaženja neplaniranih zastoja. Samojoj ideji je prethodilo dugogodišnje prikupljanje literalne građe i naučnih informacija iz ove oblasti, proučavanje literaturnog materijala i sređivanje prikupljenih činjenica.

Rukovodilac istraživanja (kandidat) je koncipirao projekat istraživanja mehanizam oštećenja i procena preostalog životnog veka cevi etilenskih peći, u okviru kojih su osmišljene i izvedene planirane aktivnosti: izbor metoda ispitivanja, izbor postrojenja za eksperimentalna istraživanja, izbor i projektovanje ispitno-merne opreme potrebne za izvođenje eksperimenta. Rukovodilac istraživanja je vodio eksperimentalna istraživanja u saradnji sa ekipom stručnjaka eksperimentalnih laboratorija Vojnotehničkog instituta i Instituta Goša, gde su izvođeni eksperimenti. Njegov zadatak je, osim rukovođenja ispitivanjima, obrada i analiza dobijenih rezultata, odabir načina njihovog prezentovanja, pisanje završnog elaborata o celokupnim rezultatima sprovedenog istraživanja, izdvajanje ključnih rezultata istraživanja koji su prezentovani u okviru ove doktorske disertacije i izvođenje zaključaka koji pobijaju ili dokazuju postavljenu hipotezu. On rukovodi radom cele ekipe za ispitivanje. Ekipe za ispitivanje uključuje naučne saradnike i stručnjake koji su neophodni da bi se izvršilo planirano ispitivanje u laboratoriji i u eksploatacionim uslovima. Ekipe za ispitivanje se formira prema vrsti ispitivanja koja se zahteva. Zbog složenosti i obima istraživanja u okviru disertacije, formirano je više ekipa, angažovana je brojna oprema, što je od kandidata zahtevalo izuzetne napore u smislu koordinacije i sinhronizacije rada.

Rukovodilac istraživanja je pripremio „*Program ispitivanja i gantogram*“ koji je obuhvatio ukupni obim aktivnosti, a za svaku laboratoriju je radio detaljan plan i program istraživanja, prema propisanim uputstvima i specifičnostima. Imajući u vidu da se radi o veoma različitim laboratorijama sa različitim tehnološkim i kadrovskim kapacitetima, kandidat je uložio dodatne napore, da se svi resursi maksimalno racionalno i efikasno iskoriste.

# Treći deo

## TEHNIČKO – TEHNOLOŠKI ASPEKTI PEĆI ZA PIROLIZU BENZINA

### 3.1 Peći za pirolizu benzina

Proizvodnja olefina je treći po veličini petrohemijski sektor posle proizvodnje amonijaka i prerade nafte. Olefini predstavljaju osnovu za proizvodnju polimera i elastomera ili se prevode u derivate kao što su aldehidi, alkoholi, glikoli, itd. Olefini se prvenstveno dobijaju krekovanjem velikih molekula ugljovodonika pomoću pare. Ovaj proces je takođe poznat pod imenom piroliza.

Piroliza je reakcija u gasnoj fazi na veoma visokim temperaturama. Pošto je reakcija krajnje endotermna, izvodi se u cevnim snopovima u pećima. Danas postoje različite konstrukcije peći mada su fundamentalni principi slični. Najpoznatije licence pripadaju Kellogg Brown & Root, ABB Lummus, Stone & Webster, Linde, KTI-Technip, itd.

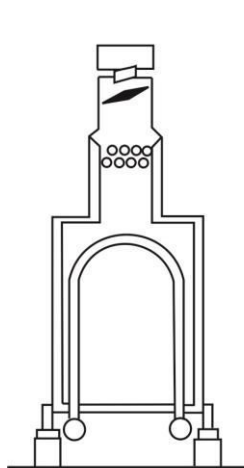
Peć za pirolizu (sl.3.1.1) je kompleksan deo opreme koja ima dvostruku funkciju, radi i kao reaktor i kao kotao visokog pritiska. Pirolizne reakcije se izvode u cevima unutar peći koje su izrađene od Cr/Ni legura. Cevni snopovi su vertikalno postavljeni unutar peći. U zavisnosti od izvedbe peći mogu imati između 16 i 128 snopova po ložištu. Breneri su raspoređeni po zidovima, i po podu ložišta za indirektno zagrevanja. Ovaj deo peći se zove radijaciona sekcija, pošto se toplota dobija radijacijom. Na kraju pirolize, reakcija treba da bude naglo obuzdana da bi se sprečila dalja dekompozicija željenih olefina. Postiže se indirektnim hlađenjem uz pomoć kvenčnih izmenjivača ili direktno hlađenjem pomoću ubrizgavanja kvenčnog ulja u struju gasa. Toplota koju sadrži loživi gas dalje se iskorišćava u konvekcionalnoj sekciji peći. Konvekcionalna sekcija se sastoji od blokova cevi u kojima se iskorištava toplota za: paru visokog pritiska, predgrevanje ugljovodonika, napojne vode za kotlove i mešanje pare.

Postajući srcem jedinice za krekovanje, tehnologija peći nastavlja da bude aktivna oblast istraživanja. Velika količina energije se troši za reakciju pirolize i dobijanje proizvoda, tako da se inženjeri kontinualno rukovode poboljšanjem energetske efikasnosti procesa. Krajnje selektivan dizajn pomaže smanjenju veličine peći, a samim tim i troškova krekovanja.

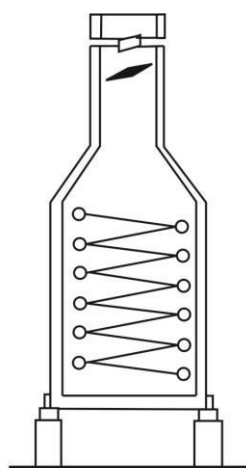
U industriji se etilen proizvodi pirolizom (krekovanjem) ugljovodonika u prisustvu pare. Ono se izvodi u velikim pećima koje rade na temperaturama do 1149 °C. Ugljovodonična sirovina – obično etan (42%), propan/butan (25%), primarni benzin (20%) ili plinsko ulje (10%) se mešaju sa parom i ubrizgavaju u peć za pirolizu. Prilikom zagrevanja ugljovodonici reaguju i stvaraju etilen, otpuštajući vodonik. Količina formiranog etilena (tj. konverzionu efikasnost) zavisi od sirovine i stanja procesa. Za etan, do 80% sirovine mora biti prevedeno u etilen, a za teže materijale kao što su plinsko ulje, konverzionu dobit može biti oko 25%. Maksimalna proizvodnja etilena zahteva male radne pritiske (ulazni pritisak obično oko 370 ÷ 640 kPa), visoku



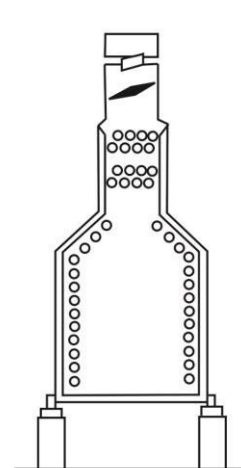
temperaturu zida cevi (obično  $1040 \div 1120$  °C), i kratko vreme zadržavanja (obično  $0.08 \div 0.6$  s). Nakon kreiranja, izreagovani gas se kvenčuje i komprimuje za separaciju. Kaustično pranje uklanja vodonik sulfid i ugljen dioksid. Gas se podhlađuje da bi se uklonila vlaga i propušta kroz destilacione kolone radi uklanjanja metana i etana. Acetilen se izdvaja selektivnom hidrogenacijom. Otpadni ugljovodonici se vraćaju natrag u peći za pirolizu i sagorevaju u cilju obezbeđenja dodatne količine toplote za proces pirolize.



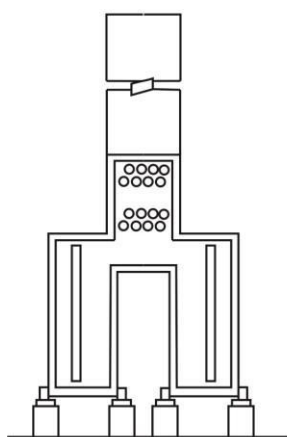
*Peć sa lučnim cevima*



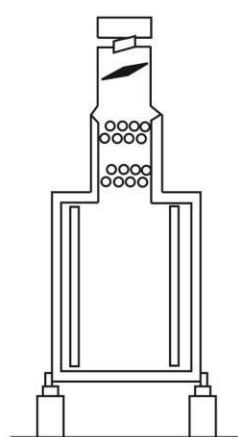
*Cilindrična peć sa helikoidnim cevima*



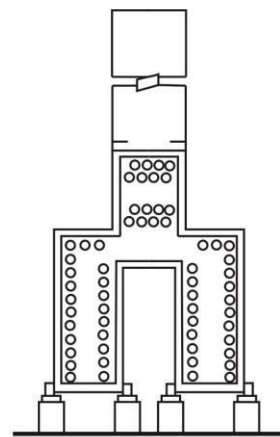
*Peć sa horizontalnim cevima*



*Peć sa vertikalnim cevima*



*Cilindrična peć sa vertikalnim cevima*



*Peć sa horizontalnim cevima*

*Slika 3.1.1. Izvedbe peći za pirolizu*

### 3.1.1 Hemija procesa

Željeni produkti pirolize su laki olefini kao na primer: etilen, propilen i butadien. Međutim u zavisnosti od karakteristika sirovine mogu se dobiti mnogi nusproizvodi kao rezultat pirolize (hidrogen, metan, acetilen, butan, benzen, toluen, ksilen i ostale strukture do dužine C<sub>12</sub>). Postoji široki opseg sirovina koje se mogu koristiti za dobijanje etana (propan, tečni naftni gas, kerozin, atmosfersko gasno ulje, vakumsko gasno ulje i wax), mada se primarni benzin najčešće koristi.

Željena reakcija je dekompozicija molekula ugljovodonika (obično parafinske strukture) na njegov olefinski ekvivalent. Najjednostavnija ilustracija dekompozicije jeste rastavljanje etana u molekul etilena što se može predstaviti na sledeći način [108]:

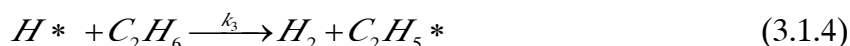
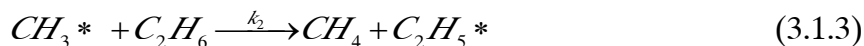


Međutim ovaj mehanizam reakcije obuhvata i seriju slobodnih radikalnih reakcija koje su predstavili Rice i Herzfeld (1934). One se mogu podeliti u četiri koraka: inicijalizacija, apstrakcija vodonika, radikalna dekompozicija i finalizacija. [108]

Inicijalizacija



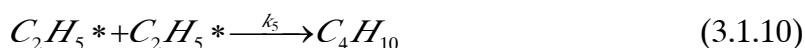
Apstrakcija vodonika



Radikalna dekompozicija



Finalizacija



U pirolizi velikih ugljovodonika, početni korak je kidanje C-C veza koja se može izvesti na različite načine u zavisnosti od strukture molekula. Dodatna prelazna lančana reakcija može nastati istovremeno. U veoma surovim uslovima (veoma visoka temperatura reakcije), olefini se formiraju pošto se formiraju grupe u fazi finalizacije tako da se oni mogu iskoristiti za dalju dekompoziciju.

U pirolizi višestrukih ugljovodoničnih smeša npr. primarni benzin i gasno ulje, tačno rešenje slobodnog radikalnog mehanizma je teško zbog višestrukosti reakcije koja nastaje i u većini slučajeva nepoznatog sastava komponenata. Razvijene su tehnike približnog određivanja koncentracije delova smeše sa sličnim kinetičkim karakteristikama, tako da imamo podelu u sledeće grupe: normalni parafini, izoparafini, olefini, benzini i aromati. Empirijsko rešenje dao je Kivlen (1990), izveo je korelaciju ključnih elemenata u proizvodima ovih grupa prema: specifičnoj težini, tački ključanja, sadržaju vodonika, itd. Moderni programski paketi za modelovanje kao što je npr. SPYRO nudi tačno rešenje koje kombinuje tehnike približnog rešavanja koncentracije komponenata i slobodnih radikalnih mehanizama.

Dve velike neželjene reakcije koje nastaju istovremeno sa željenim krekovanjem alkana su dehidrogenacija i kondenzacija. Dehidrogenacija je pojava gde se molekuli olefina nadalje razlažu na diolefine ili  $C\equiv C$  grupu. Primer formiranja acetilena, metilacetilena, i propadiena [108]:



Dehidrogenacija dovodi do gubitka olefina. Njeni produkti kontaminiraju proizvodnju olefina. U slučaju acetilena, metil acetilena i propadiena biće izdvojeni nadalje u procesu uz primenu reaktora hidrogenacije na bazi paladijuma, koji je izuzetno skup i težak za rad.

Kondenzacija je reakcija u kojoj se dva ili više malih molekula spajaju da bi ostvarili veću stabilniju strukturu kao što su ciklo-diolefini i aromati. Sekundarna reakcija nastaje u kasnijim fazama pirolize prilikom dužeg vremena zadržavanja u reaktoru. U praksi se ova pojava primećuje kada je aromatična koncentracija u struji pirolize benzina visoka i količina zaostalog loživog ulja ( $C_9$ - $C_{12}$  frakcija) velika.

Ekstrem dehidrogenacije i kondenzacije jeste upravo formiranje koksa. Koks nastaje prilikom uklanjanja atoma vodonika iz ugljovodoničnih radikala sve do kraja dok ne ostane samo sloj elementarnog ugljenika ili koksa. Mada su aromati relativno stabilni molekuli, međutim, oni mogu nadalje reagovati tokom kondenzacije i da stvaraju lance benzenske prstenaste strukture. Ovi produkti kondenzacije napuštaju gasnu fazu i talože se na unutrašnje zidove radiacionih snopova cevi u obliku sloja teškog koksa koji se inače veoma teško uklanja. Mehanizmi stvaranja koksa će biti kasnije razmotreni.

### 3.1.2 Parametri reaktora

Cevni snopovi u pirolizi u principu predstavljaju reaktor koji je uključen u tok sirovine koji prima toplotu iz njenog okruženja, tj. toplotu radijacije iz ložišta. Mnoga ranija tehnološka rešenja za peći su inspirisala Schutt-a (1959) i našla mesto u njegovim radovima. U industrijskoj pirolizi etana, otkrio je da priraštaj metana raste dok se priraštaj etilena smanjuje uz približavanje ravnotežnom stanju reakcije dehidrogenacije etana. Postizanje ravnotežnog stanja  $\varepsilon$  se može definisati kao [108]:

$$\varepsilon = \frac{P}{K_p} \frac{(y_{H_2})(y_{C_2H_4})}{(y_{C_2H_6})} \quad (3.1.13)$$

gde je:  $P$  – parcijalni pritisak ugljovodonika [Pa],

$K_p$  – ravnotežna konstanta za reakciju dehidrogenizacije etana na temperaturi koja vlada na izlazu cevi, i

$y$  – molni deo sastojaka ugljovodonične smeše na kraju cevnog snopa.

Na osnovu Schutt-ovih podataka i pretpostavki da se svaki dekomponovani mol etana ne prevodi u etilen nego da dovodi do stvaranja 2 mola drugih produkata pirolize, molni priraštaj etilena po prevedenom molu etana se može predstaviti pomoću sledećeg izraza [108]:

$$Y_{C_2H_4} = \frac{1.67 K_p}{P} \frac{1 - \alpha^2}{\alpha^2} \left( \sqrt{1 + 1.2 \frac{P}{K_p} \frac{\alpha^2}{1 - \alpha^2} - 1} \right) \quad (3.1.14)$$

gde je:  $\alpha$  - frakciono iščezavanje etana, i

$Y_{C_2H_4}$  - priraštaj etilena, mol-a / mol-u konvertovanog etana.

Formula prikazuje da više ravnotežne konstante i niži parcijalni pritisci pospešuju stvaranje etilena. Više ravnotežne konstante zahtevaju više temperature reaktora, koje pomeraju rezultat u smeru viših reakcionih brzina, tako da je potrebno kraće vreme zadržavanja za održavanje date konverzije, a samim tim i dobijanje većeg priraštaja etilena. Sve ovo pokreće projektante peći za pirolizu u smeru smanjenja vremena zadržavanja, nižih pritisaka ugljovodonika i viših temperatura za optimalnu proizvodnju etilena iz sirovina.

### 3.1.3 Vreme zadržavanja

Ukupno vreme zadržavanja, često se pominje u literaturi za karakterisanje raznih oblika peći, predstavlja ukupno vreme koje gas provede u cevnim snopovima pirolize [108]:

$$\theta_B = \int_0^L \frac{dl}{v(l)} \quad (3.1.15)$$

gde je:  $L$  – ukupna dužina cevnog snopa [m],  
 $v(l)$  – brzina gasa [ $\text{ms}^{-1}$ ], i  
 $\theta_B$  – ukupno vreme zadržavanja.

Međutim istraživači su pokazali da je vreme zadržavanja produkata pirolize pravilnije nego ukupno vreme zadržavanja koje utiče na spektrum priraštaja. Zodnik (1970) je predložio ekvivalentno vreme zadržavanja koje se zasniva na dekompoziciji n-pentana, jednom od daleko postojanijih proizvoda koji se obično nalaze u pirolizi tečnih sirovina [108]:

$$\theta_E = \frac{1}{K_5(\theta_B)} \int_0^{\theta_B} K_5(\theta) d\theta \quad (3.1.16)$$

gde je:  $\theta_E$  – ekvivalentno vreme zadržavanja [ $\text{s}^{-1}$ ],  
 $\theta_B$  – ukupno vreme zadržavanja [s], i  
 $K_5$  – stopa reakcije n-pentana [ $\text{s}^{-1}$ ].

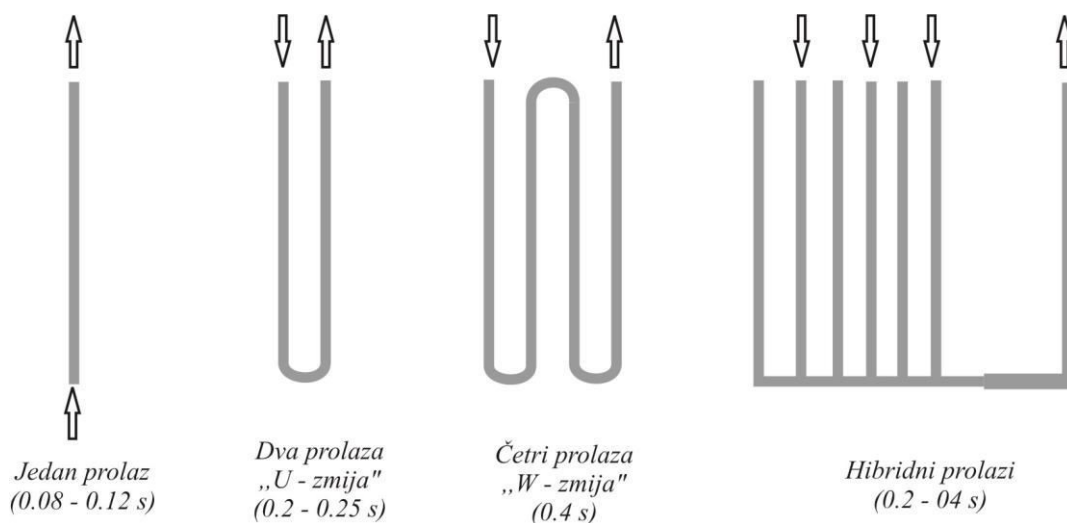
Sve rane peći za pirolizu konstruisane između 1940 i 1960 imale su horizontalno položene cevi u radijacionoj sekciji, a vreme zadržavanja je iznosilo 0.5 sekundi. Materijal cevi u radijacionoj sekciji je bio 310 nerđajući (kovan 25 Cr 20Ni) ili Incoloy sa unutrašnjim prečnikom većim od 127 mm. Sve do sredine 60-tih sve peći su bile opremljene sa velikim brojem zidnih brenera raspoređenih na rastojanju od oko 1829 mm centriranih na horizontalni zid i okrenutih prema redovima cevi.

Tabela 3.1.1. Uticaj vremena zadržavanja na priraštaj proizvoda<sup>(3)</sup>

PROIZVODI	VREME ZADRŽAVANJA		
	0.10 s	0.20 s	0.50 s
Metan	15.48	15.78	16.16
Etilen	34.16	32.16	29.37
Propilen	17.02	17.35	17.78
Butadien	5.20	5.10	5.00
Benzen	5.89	6.00	5.75
Toluen	2.59	2.65	2.52
Benzin	3.12	3.35	3.61

<sup>3</sup> Tham, Chee, Mun, Pyrolysis Furnace, www.kolmetz.com, 2007.

U nastojanjima da se smanji vreme zadržavanja inženjeri su dizajnirali cevi manjeg prečnika, boljih metalurških karakteristika i razvili daleko efikasnije brenerne. Savremene peći za krekovanje rade sa vremenom zadržavanja u opsegu između  $0.08 \div 0.25$  s. Prečnici cevi su smanjeni na opseg od  $25.4 \div 101.6$  mm ( $1 \div 4$  in). Cevi manjeg prečnika pružaju veći odnos površine prema zapremini, koji omogućuje da potrebna toplota za krekovanje proдре u cev na daleko kraćoj dužini cevi. Omogućuje smanjenje trajanja procesa krekovanja sa daleko kraćim vremenom zadržavanja, što doprinosi daleko većem priraštaju željenog proizvoda (uglavnom etilena, propilena i butadiena - tab.3.1.1). Cevi u radijacionoj sekciji se sada liju sa sastavom Cr/Ni u opsegu od 25/35 do 35/45 i postavljaju se vertikalno u cilju smanjenja investicionih troškova. Veliki zidni breneri su zamenjeni sa malim ali daleko efikasnijim podnim brenerima (Bowen, 1992). Oblici cevnih zmija i vremena zadržavanja prikazana su na slici 3.1.2 [108].



Slika 3.1.2. Oblici cevnih zmija pirolitičkih peći i vremena zadržavanja

### 3.1.4 Temperatura reakcije

Piroliza je krajnje endotermna reakcija. Za date dimenzije cevi i radni pritisak, povećanje u temperaturi reakcije dovodi reakciju direktno do proizvodnje manjih molekula ugljovodonika. U proteklih nekoliko decenija radna temperatura peći za pirolizu je stalno bila povećavana u opsegu od  $750 \div 850$  °C pa čak i blizu  $900$  °C.

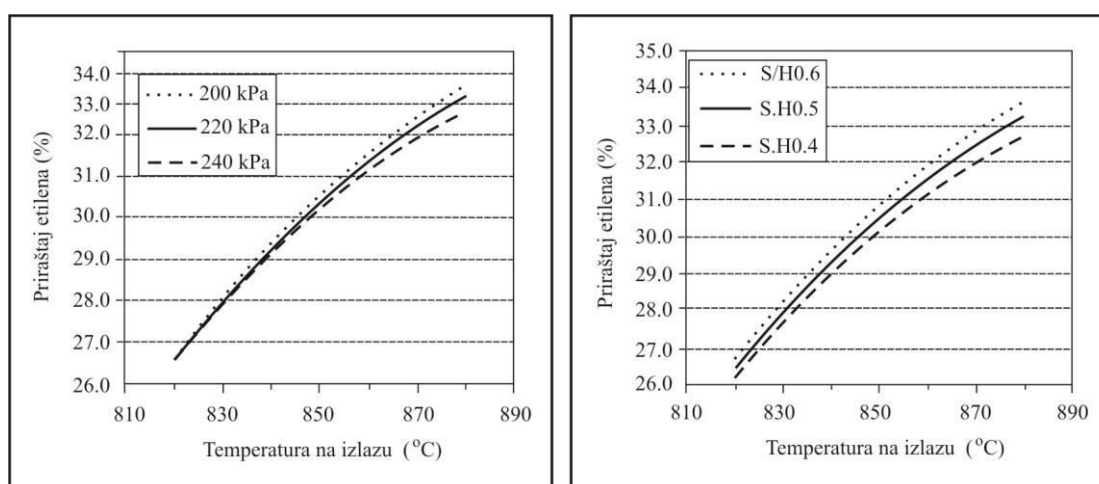
Negativna strana visokih radnih temperatura je daleko brža stopa stvaranja koksa i cementacije, koja utiče na skraćivanje životnog veka cevi. Inženjeri zbog toga stalno rade na razvijanju metoda za suzbijanje stvaranja koksa, stvaranju cevi boljih metalurških karakteristika koje će biti postojanije na visokim temperaturama, kao i smanjenju cementacije. Pošto je početni korak za stvaranje koksa i cementaciju isti stoga inženjeri udružuju napore za suzbijanje stvaranja koksa i cementacije.

### 3.1.5 Pritisak reakcije

Piroliza je reakcija koja se odvija u gasnoj fazi, stvara višak mola gasnih molekula prilikom potpune reakcije, tako da je poželjniji niži pritisak. Savremene peći rade na pritiscima od 175 ÷ 240 kPa. Mada je inovativni dizajn cevnih snopova smanjio pritisak i doprineo većem priraštaju, ipak glavni kredit ide na unapređenje tehnologije kompresovanja. Izlazni pritisak iz cevnih snopova se indirektno kontroliše usisnim pritiskom kompresora procesnog gasa koji se nalazi dalje u procesu. Kompresija je neophodna radi postizanja visokih pritisaka (~ 3.5 MPa) za separaciju vodonika i metana. Za postizanje nižih izlaznih pritisaka iz cevnih snopova potrebna je velika snaga kompresora. Ovo nadalje postaje problem optimizacije između boljeg priraštaja, kapaciteta procesiranja, investicija kapitala i troškova energije. Na sreću, napredak u konstrukciji turbomašina je obezbedio ekonomičan odnos konstrukcije kompresora velike snage i omogućio rad peći sa niskim pritiscima.

### 3.1.6 Inertizacija – Inertnost

Razvodnjena para je inertna da bi se mešala sa ugljovodonicima pre ulaska u cevne snopove. Rani pokušaji industrijske pirolize su izvođeni bez razvodnjene pare. Otkriveno je da stopa cementacije veoma brzo raste. Dodavana je razvodnjena para tako da se nadalje smanjivalo koksovanje i cementacija. Sledeća uloga razvodnjene pare je snižavanje parcijalnog pritiska ugljovodonika, čime se smanjuje nepoželjna sekundarna reakcija i visok priraštaj etilena što je dokazao Schutt. Na slici 3.1.3. je prikazan uticaj: temperature, pritiska i odnos para/ugljovodonici na priraštaj etilena prilikom krekovanja.



Slika 3.1.3. Uticaj temperature na izlazu iz cevnih zmija, pritiska i odnosa para/ugljovodonici na priraštaj etilena prilikom krekovanja<sup>(4)</sup>

<sup>4</sup> Tham, Chee, Mun, Pyrolysis Furnace, www.kolmetz.com, 2007.

U industrijskoj pirolizi, maseni odnos pare i ugljovodonika je kontrolisan parametar u radu peći. Odnos se kreće od 0.3 za etan do 0.6 za krekovanje plinskog ulja. Opšte empirijsko pravilo je da se manje razvodnjene pare zahteva za manje molekule ugljovodonika. U praksi, veći odnos može biti upotrebljen ako je dovod ugljovodonika manji nego nominalni tako da ukupno vreme zadržavanja ostane na istoj vrednosti.

### 3.1.7 Matematički model

Proces krekovanja se može matematički opisati primenom sledeće balansne jednačine. Balans materijala za komponentu  $j$  [108]:

$$\frac{dw_j}{dz} = \frac{M_j}{G} \sum_i r_i S(i, j) \quad (3.1.17)$$

gde je:  $w_j$  – maseni deo komponente  $j$  [kg/kg],  
 $z$  – dužina cevnog snopa [m],  
 $M_j$  – molekularna masa komponente  $j$  [kg/mol],  
 $G$  – maseni fluks [kg/m<sup>2</sup>s],  
 $r_i$  – stopa reakcije [kmol/m<sup>3</sup>s],  $i$   
 $S$  – stohiometrijska konstanta komponente  $j$  u reakciji  $I$ .

Balans energije [108]:

Cevi:

$$G \bar{C}_p \frac{dT}{dz} = \sum_i r_i H_i + \frac{4}{D} U_0 (T_e - T) \quad (3.1.18)$$

Ložište:

$$U_0 (T_e - T) = C_1 (T_w^4 - T_e^4) + C_2 (T_g^4 - T_e^4) + U (T_g - T_e) \quad (3.1.19)$$

gde je:  $\bar{C}_p$  - specifična toplota procesnog gasa [kcal/kgK],

$T$  – temperatura procesnog gasa [K],

$H_i$  – toplota reakcije za reakciju  $i$  [kcal/kmol],

$D$  – unutrašnji prečnik cevi [m],

$U_0$  – ukupni unutrašnji koeficijent prenosa toplote [kcal/sm<sup>2</sup>K] obuhvata:

- termičku provodnost zida cevi,
- termičku provodnost koksa,
- koeficijent za naslage,
- koeficijent prenosa toplote procesnog gasa,  $i$
- radijaciju na cevi.

$T_e$  – temperatura spoljašnjeg zida cevi [K],

$T_w$  – temperatura vatrostalnog zida [K],



$T_g$  – temperatura dimnih gasova [K],  
 $U$  – konvektivni koeficijent prelaza toplote dimnih gasova [kcal/sm<sup>2</sup>K],  
 $C_1$  – konstanta koja sadrži faktor emisije [kcal/sm<sup>2</sup>K<sup>4</sup>], i  
 $C_2$  – Stefan – Boltzmann-ova konstanta.

Balans mehaničke energije [108]:

$$\frac{dP}{dz} = \frac{G^2}{\rho^2 g} \frac{d\rho}{dz} - \frac{2fG^2}{\rho gD} \quad (3.1.20)$$

gde je:  $P$  – pritisak [kg/m<sup>2</sup>],  
 $\rho$  - gustina procesnog gasa [kg/m<sup>3</sup>],  
 $G$  – dimenziona konstanta [kgm/kg<sup>2</sup>], i  
 $f$  – koeficijent trenja.

U nastojanjima da se reši ova jednačina polazi se od pretpostavke o spektrumu proizvoda, temperaturi i profilu pritiska koji se treba ostvariti. Početne pretpostavke pogotovo o spektrumu proizvoda mogu se izvesti na osnovu podataka iz prošlosti ili primenom jednostavnih empirijskih relacija. Nakon toga se primenom iteracija i kriterijuma konvergenije rešava jednačina primenom personalnih računara.

### 3.1.8 Opšti podaci o fabrici etilena i prikaz peći

Fabrika etilena (sl. 3.1.4) posluje u okviru petrohemijskog kompleksa u Pančevu. Glavni proizvod fabrike kao što i samo ime govori jeste etilen. Etilen je pri normalnim uslovima gas (sladunjavog mirisa) i ekstremno je zapaljiv. Kao kriogena tečnost nalazi se u tečnom stanju samo na nižim temperaturama i povećanom pritisku. Kritična temperatura etilena iznosi +10 °C a kritičan pritisak 51 bar. Na atmosferskom pritisku ključa već na – 103.7 °C, tačka topljenja (smrzavanja) – 169 °C, granica eksplozivnosti 3.1 – 32 %. Osim etilena kao proizvodi dobijaju se još i propilen, C<sub>4</sub> frakcija, pirolitički benzin i pirolitičko ulje (tab. 3.1.2). Osnovni podaci o fabrici:

- Licenca i projekat postrojenja: *Stone & Webster eng. Corp. Usa.*
- Licenca i projekat sekcije za hidrogenaciju benzina: *Institut Francais du Petrole (IFP) France.*
- Licenca i projekat skladšita fabrike: *Crawford & Russell co. Ltd. + Foster Wheeler corp.*
- Prvi start fabrike i proizvod u specifikaciji: *Novembar 1979. Godine.*
- Osnovna sirovina: *sirovi (primarni) benzin 612.000 t/god za 8000 radnih sati godišnje.*
- Dizajnirani kapacitet fabrike: *200 000 t/god etilena polimerne čistoće.*

- Postrojenje je prosečne starosti u evropi, bez kapitalnih investicija od pokretanja proizvodnje.
- Redovni remontu se obavljaju na 2-3 godine.
- Procentualni odnos cene koštanja opreme za fabriku etilena je dat u tabeli 3.1.3.

Tabela 3.1.2. Projektovani kapacitet fabrike etilena

Proizvodi fabrike etilen	t/god
Etilen, polymer grade	200 000
Propilen, chemical grade	85 000
C <sub>4</sub> frakcija	44 000
Pirolitički benzin	138 000
Pirolitičko ulje	38 000
Ukupno	505 000



Slika 3.1.4. DP HIP Petrohemija - Fabrika Etilena

Tabela 3.1.3. Procentualni odnos cene koštanja opreme<sup>(5)</sup>

Oprema	%
Izmenjivači toplote	24
Peći	32
Posude	7.4
Destilacione kolone	8.6
Pumpe i kompresori	28.0
Ukupno :	100.0

U fabrici etilena (sl.3.1.4) postoje 8 benzinskih peći i 2 etanske (SW peći tipa 16 W USC). Projektovane da u režimu 7 + 2 krekuju 76462 kg/h sirovog benzina 333 radna dana u godini. Svaka peć može da krekuje 10932 kg/h sirovog benzina.

Ložište peći je pravougaono dužine 12.19 m i širine 2.13 m, s konvekcioniim prostorom dužine 12.19 m i širine 0.86 m. Unutra je smešteno 16 paralelnih radijacionih zmijastih W cevi, svaka zmijasta cev je izrađena od 4 cevi W oblika. Četri cevi su povezane kolenom prečnika 20.31 cm, zaokrenute za 180°, dajući ukupnu dužinu cevi od 39 m. Razmak između osa cevi je 20.32 cm tako da su dve cevi na udaljenosti od 12.37 cm. Unutrašnji prečnik cevi je 6.35 cm, a spoljašnji 7.95 cm, i dužine 9.75 m (sl.3.1.5). Cevi su izrađene centrifugalnim livenjem od materijala HK 40.

Toplota u peći se dobija iz 96 (1258 kg/h) bočnih brenera, i 16 (209.6 kg/h) podnih brenera koji daju do 30% toplote.

Vreme zadržavanja benzina u radijacionoj sekciji iznosi 0.30 sec.

Ulaz benzina 116 °C i P= 1011.22 kPa

Ulaz pare 187 °C i P= 1111.54 kPa.

Temperatura radijacione sekcije 1093 °C.

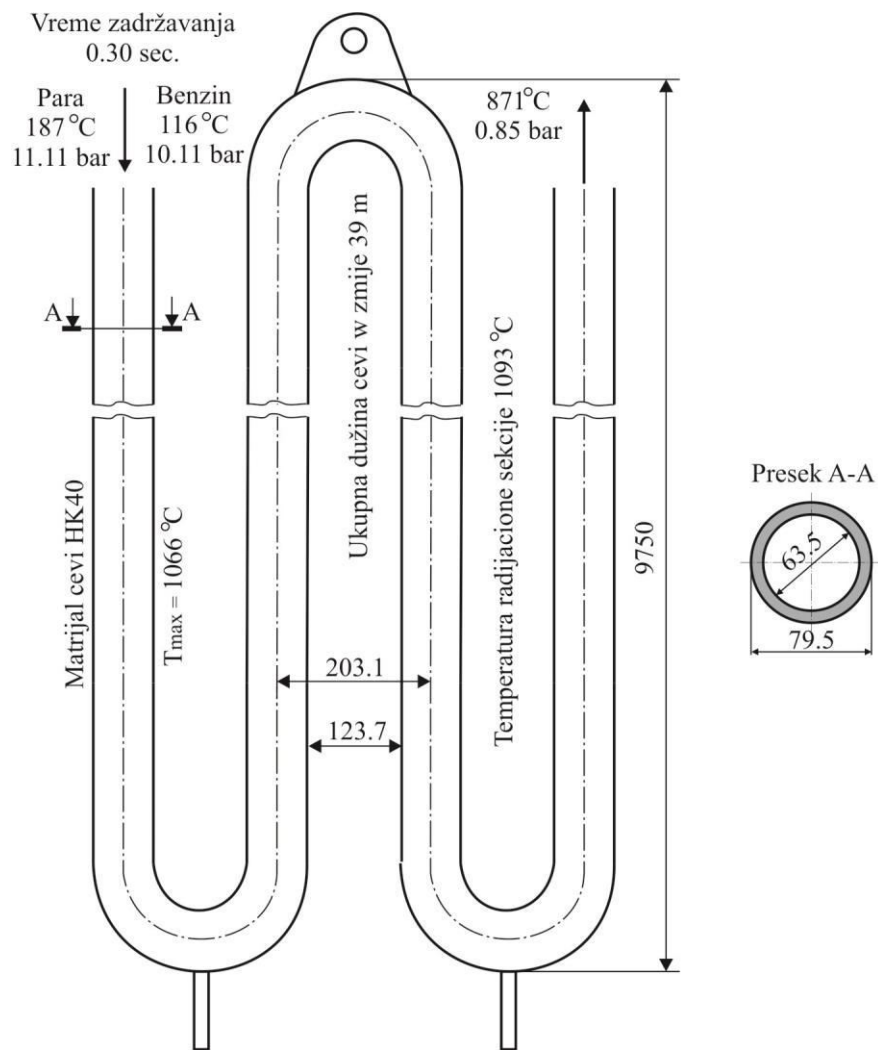
Temperatura benzina na izlazu iz peći 871 °C i P= 85.113 kPa.

Kvenč izmenjivač 583 °C.

Dekoksovanje traje 6 ÷ 12 h, temperatura pare 982 °C, u proseku oko 45 dana između dekoksovanja.

Temperatura cevi nakon dekoksovanja 977 °C, maksimalno za HK 40 1066 °C.

<sup>5</sup> Miller, R., Jr., Process Energy Systems, Chemical Engineering, May 20, 1968. p.130



Slika 3.1.5. Šematski prikaz zmiijaste cevi W oblika

## 3.2 Pregled materijala za cevi peći

### 3.2.1 Karakteristike materijala

Cevni snopovi u pirolitičkim pećima su izloženi veoma oštrim uslovima eksploatacije, temperature se kreću i do 1150 °C, oštri startovi / zaustavljanja - ciklusi dekoksovanja, oksidacija i nitracija loživog gasa sa spoljne strane cevi, a cementirajuća sredina sa unutrašnje strane. U proizvodnji etilena procesuirani materijal (etan, propan, gas, itd.) se termički krekuju u prisustvu pare na niskom pritisku i temperaturama od 780 ÷ 890 °C. Radijacione sekcije neke od ovih peći rade na krajnjim temperaturama metala od 1150 °C. Ovo je praktično krajnja gornja granica za većinu termootpornih legura koje se komercijalno izrađuju.

Ekranska sekcija, niža konvekciona sekcija, izlazne cevi, i kvenč sekcija etilenskih peći za krekovanje rade na znatno nižoj temperaturi, ali takođe moraju biti izrađene od termootpornih legura.

Metallurgija trenutno ograničava dizajn peći, a uspešne performanse cevi zavise od nekoliko kriterijuma:

#### 3.2.1.1 Otpornost na puzanje

Većina opreme u naftnoj i petrohemijskoj industriji je projektovana i izrađena prema zahtevima American Society of Mechanical Engineers (ASME) ili ekvivalentnim propisima drugih zemalja za sudove pod pritiskom i cevovode. Ovi standardi obuhvataju samo dokazane materijale i uspostavljaju osnovu za definisanje dozvoljenog opterećenja. Tako da su mehaničke osobine materijala obično prvi kriterijum kojeg inženjeri koriste u procesu izbora materijala. Ovo je od izuzetnog značaja za primenu na temperaturama u oblasti puzanja materijala gde male razlike u projektovanoj i radnoj temperaturi mogu značajno uticati na sposobnost podnošenja opterećenja.

Otpornost materijala na puzanje je poželjna za minimalizaciju debljine zida i maksimizaciju toplotnog fluksa kroz cev u reakciji ugljovodonika. Visoka otpornost na puzanje je pogotovo značajna zbog toga što je jedan od načina povećanja proizvodnje etilena jeste povećanje temperature i smanjenje vremena zadržavanja unutar tople zone reaktora. Procenjeno je da 50 °C porasta radne temperature doprinosi dobiti od 30% etilena.

Zatezna čvrstoća je kriterijum koji se koristi prilikom izbora ugljeničnih i legiranih čelika ispod opsega temperature puzanja. Međutim dozvoljena stopa puzanja standardom iznosi 1%/100.000 h ili vreme do pojave prskotine 100.000 h.[8]

Primena termootpornih legura često obuhvata frekventne termalne cikluse, tako da je otpornost na termalni zamor bitna mehanička karakteristika za proces odabira materijala. Ova karakteristika je funkcija sastava, ali takođe na nju utiče i debljina dela i geometrija.

### 3.2.1.2 Otpornost na koroziju

Značaj ovog kriterijuma izbora blizak je kriterijumu izbora mehaničkih karakteristika u cilju optimizacije performansi. Bez adekvatne korozione otpornosti (ili dozvoljene granice korozivnosti), komponenta će pasti u područje minimalno željenog projektovanog životnog veka. U naftnoj i petrohemijskoj industriji projektovani životni vek komponenti se obično postavlja na deset ili više godina. Dodatni troškovi su obično povezani sa izborom materijala povećane korozione otpornosti u toku faze izbora materijala, i daleko su manji od troškova koji se javljaju usled kontaminacije proizvoda ili zastoja proizvodnje i velikih troškova zbog održavanja usled preranih otkaza.

Suprotno mehaničkim karakteristikama, nepostoje kodovi koji obuhvataju korozione karakteristike. Za neke slučajeve postoje uputstva za izbor materijala prema preporukama proizvođača, a postoje i preporuke na osnovu iskustva u literaturi. Veoma pouzdani podaci se mogu naći u literaturi koja se odnosi na koroziju pri visokim temperaturama u sredini sa smešom vazduha i nisko sulfidnim gorivim gasovima, kao i nekim drugim primenama u naftnoj i petrohemijskoj industriji. Međutim, male varijacije u sastavu tokom procesa, ili u režimu rada mogu prouzrokovati različite stepene korozije. Možemo slobodno reći da je najpouzdanija osnova za izbor materijala iskustvo iz eksploatacionih istraživanja koja potiču iz sličnih fabrika.

U cilju minimalizacije osetljivosti na koroziju, tokom izrade, određenim vrstama nerđajućih čelika dodaju se stabilizeri formiranja karbida. Najčešće se koriste titanium (tip 321) i niobium (tip 347). [110]

Glavni problem u eksploataciji cevi etilenskih peći je interkristalna korozija, koja u prisustvu napona uzrokuje pojavu naponske korozije. Oštećenja metala usled delovanja naponske korozije su prilično česta i neretko uslovljavaju katastrofalne lomove i havarije praćene potpunim gubitkom funkcije ugrožene komponente, kao i velikim materijalnim troškovima.

Ranija istraživanja ukazuju da se u osnovi razlikuju tri mehanizma naponske korozije: aktivno rastvaranje, vodonična krtost i cepanje izazvano prekidom filma. Naponska korozija, koja se odvija po mehanizmu aktivnog rastvaranja je prisutna u materijalu cevi peći. Ovaj proces se odnosi na ubranu koroziju duž puta veće korozione osetljivosti nego što je normalna kod masivnog materijala koji je generalno u pasivnom stanju. Najčešći aktivni put je granica kristalnog zrna u kojoj segregirani elementi nečistoća otežavaju pasivno ponašanje. Taloženje karbida hroma u granicama zrna austenitnog nerđajućeg čelika (senzibilizacija) izaziva lokalno smanjenje koncentracije hroma u zoni granice, usled 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 u odsustvu napona, i u tom slučaju se javlja interkristalna korozija. U ranijim istraživanjima, koja se tiču uticaja povišenog sadržaja ugljenika na strukturu materijala cevi peći od vatrootporne, austenitno karbidne legure HK-40, otkriveno je da povišen sadržaj ugljenika pri nedovoljnoj količini stabilizirajućih elemenata, koji se ovoj leguri dodaju s ciljem postizanja željenih svojstava nepovoljno utiče na strukturu materijala cevi. Takođe je otkriveno da mikrostrukturno stanje materijala cevi sa austenitnom osnovom uz prisustvo karbidnih segregata u vidu karbidnih traka, razmeštenih po granicama austenitnih zrna (interkristalna korozija) i prisutni zatezni naponi (naponska korozija) bitno utiču na pad žilavosti ovog materijala, jer je metalna veza na granici zrna oslabljena.

### 3.2.1.3 Postojanost karakteristika

Karakteristike materijala koje se koriste na povišenim temperaturama mogu se degradirati iz različitih razloga. Posledice degradacije zavise od procesa i od onoga što se očekuje od materijala. Na primer, razmotrimo materijal u kome se može formirati intermetalna faza, sigma.

U feritnom nerđajućem čeliku ova faza se sastoji samo od čelika i hroma. Kod austenitnih nerđajućih legura ona je daleko složenija i uključuje nikl, mangan, silicijum, niobijum, i dr. kao dodatak čeliku i hromu. Sigma faza se formira u feritnom i austenitnom nerđajućem čeliku iz ferita, ili metastabilnog austenita, na temperaturama od  $593 \div 927$  °C. Ona prouzrokuje gubitak elastičnosti, i žilavosti na temperaturama manjim od  $120 \div 150$  °C, pojavljuje se tokom pokretanja proizvodnje iz hladnog stanja, a inače ima neznatan uticaj na karakteristike u temperaturnom opsegu gde nastaje. U ovom slučaju izdržljivost puzanja materijala može biti pogođena. Drugim rečima, što su duže komponente izložene visokoj temperaturi imaće manje posledice. Ipak, mora se posvetiti pažnja da bi se izbegao uticaj prelaznih režima koji se pojavljuju tokom pokretanja ili zaustavljanja procesa proizvodnje. Prskotine takođe mogu nastati i prilikom izvođenja aktivnosti održavanja. Formiranje CHI faze tokom izlaganja elemenata na povišenoj temperaturi iznad dozvoljenog opsega takođe može prouzrokovati gubljenje žilavosti na niskim temperaturama. Obe faze se mogu otkloniti držanjem materijala na temperaturama od  $1010 \div 1100$  °C tokom vremena od 1 ÷ 4 sata u zavisnosti od debljine materijala i formirane veličine sigma faze. [110]

Tokom vremena formiranje sigma faze je neizbežan proces kod mnogih komercijalnih legura koje se koriste unutar temperaturnog opsega gde one nastaju. Na sreću nekoliko nedostataka im se može direktno pripisati. Međutim, ako će komponente biti izložene u kritičnom temperaturnom opsegu, učestalim ciklusima pokretanja i zaustavljanja proizvodnje ili udarnim opterećenjima, potrebno je izabrati imune ili daleko postojanije materijale. Povećana otpornost ili imunitet se postiže izborom sastava koji je izbalansiran prema austenitu tj. bez elemenata koji formiraju ferit, tako da nema prisutnog slobodnog ferita. Ovo se može prikazati pomoću Schaeffler-ovog dijagrama. Legura 800 nije otporna ali je manje podložna formiranju sigma faze nego serija 300 nerđajućih čelika.

### 3.2.1.4 Otpornost na koksovanje

Pošto se ugljovodonična sirovina pirolizuje, deo izreagovanog ugljenika se akumulira na unutrašnje zidove cevi. Naslage koksa redukuju transfer toplote kroz zidove cevi i ograničavaju protok gasne sirovine kroz cev. Na kraju ove naslage postaju toliko velike da se peć mora izvesti iz rada i dekoksovati sagorevanjem nataloženog ugljenika pomoću pare ili vazduha. Hemijski sastav površine legure igra glavnu ulogu na količinu stvaranja koksa. Visokotemperaturne legure se generalno zasnivaju na izdržljivom i kompaktnom zaštitnom oksidnom sloju koji deluje na degradaciju materijala usled uslova radne sredine. Sastav ovih oksida može imati značajan uticaj na stepen stvaranja koksa, a sve ono što razara ovaj oksid i ostavlja samo goli metal ubrzava stvaranje koksa.

### 3.2.1.5 Otpornost na naugljeničenje - cementaciju

Ako je zaštitni oksidni sloj uništen, ugljenik iz ugljovodonične sirovine će difundovati u površinu cevi tokom eksploatacije. Ovakva penetracija ugljenika formira interne karbide, redukujući prohodnost materijala i čineći ga osetljivijim na oštećenja izazvana savijanjem ili termičkim ciklusima. Stepent cementacije zavisi od hemijskog sastava legure, ali takođe se udvostručuje na svakih 55 °C prilikom porasta radne temperature. Frekventna dekoksovanja izazivaju cementaciju i skraćuju životni vek cevi.

### 3.2.1.6 Otpornost na krunjenje metala

Krunjenje metala se smatra formom cementacije koja se javlja u određenim procesima obrade u naftnoj i petrohemijskoj industriji. Iako su pojedine karakteristike veoma slične, ipak se na dosta načina razlikuje od klasične cementacije. Ono može prouzrokovati ekstremno brz gubitak metala koji normalna cementacija ne uzrokuje, a dubina cementacije u odnosu na gubitak metala ostaje sasvim površna, ali intenzivna. Najčešće je povezana sa gasovima bogatim CO, CO/CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub> i sa procesima reforminga, sinteze, parcijalne oksidacije ili drugih procesa. Obično se pojavljuje na temperaturama od 480÷870 °C sa maksimalnom stopom reakcije od 705 ÷ 730 °C. Stopa reakcije može biti veoma rapidna a rezultati katastrofalni. Obično izaziva oštećenja oblika okruglih udubljenja sa prašnjavom površinom. Prilično je nepredvidiva i napada većinu nerđajućih i termootpornih legura. Obloge načinjene difuzijom aluminijumovih para mogu biti efektivno korišćene, inače ako se mogu dodati isparenja sumpora ili amonijaka, ona se takođe mogu koristiti za njeno obuzdavanje. Međutim, najbolji tretman je podešavanje smeše gasa s redukcijom parcijalnog pritiska CO.

### 3.2.1.7 Otpornost na nitraciju

Slično cementaciji, nitracija nastaje kada se hrom i drugi elementi spajaju s azotom gradeći nitrate. Nitracija obično nastaje kada se ugljenični čelik, niskolegirane legure i nerđajući čelik izlože amonijačnom okruženju na povišenoj temperaturi. Kao i u slučaju cementacije, legure sa višim sadržajem nikla su veoma otporne na nitraciju zbog male rastvorljivosti azota u niklu. Mada je molekul azota sasvim stabilan, prekomerna disocijacija nastaje prilikom sagorevanja u pećima kada se dostigne temperatura cevi od 1010 °C ili više, tj. dolazi do nitracije legure 800H ili HP.

### 3.2.1.8 Zavarljivost i izradljivost

Usled visokih temperatura eksploatacije i čestog koksovanja / cementacije cevi za pirolizu, ove cevi se moraju periodično zamenjivati. Prema tome, legure moraju imati dobru karakteristiku varljivosti.

Postoji mnogo izuzetnih materijala sa krajnje poželjnim mehaničkim karakteristikama i korozionom otpornošću koji se retko koriste zbog toga što se ne mogu proizvesti. Samo u vrlo retkim primenama u naftnoj i petrohemijskoj industriji se



ne zahtevaju neke od sledećih osnovnih operacija kao što su varenje, savijanje, i drugi oblici oblikovanja materijala za izradu potrebnih elemenata opreme. Takođe, postoje neki materijali koji imaju odlične karakteristike za oblikovanje pošto se proizvedu, ali zbog starenja se ne mogu modifikovati ili oporaviti nakon eksploatacije. Zbog toga se materijali moraju odabirati na osnovu pogodnosti održavanja i mogućnosti dovodenja u osnovno stanje. Uopšte, izrada kovanih materijala je daleko složenija od izrade livenih. Delimično zbog razgranate strukture kasnije dodatnih i legirajućih elemenata koji se ne mogu tolerisati u kovanom materijalu u toku nekoliko radnih operacija kojima su izloženi (valjanje, kovanje). Livene legure obično mogu tolerisati daleko više koncentracije ugljenika, silicijuma, tungstena, molibdena, itd., koji se dodaju da bi poboljšali mehaničke karakteristike, otpornost na koroziju, ili obe. Ali, ovi elementi takođe mogu loše uticati na prvobitan proizvod, čineći pogodnost održavanja, varljivost teškim ako ne i nemogućim.

Odlivci cevi dobiveni centrifugalnim livenjem imaju sitnozrnastu strukturu, gušći su i poboljšane su im mehaničke karakteristike u odnosu na postupke livenja u kalupe koji miruju. Za vreme rotacije kalupa teže čestice putuju prema unutrašnjoj šupljini kalupa (prema van u odnosu na osu rotacije) istiskujući okside i nečistoće prema središnjoj osi, odakle se kasnije odstranjuju obradom skidanjem strugotine. U odnosu na konvencionalne gravitacijske ili statičke livove, koji se hlade i sa spoljne i unutrašnje strane, centrifugalni livovi očvršćavaju od kalupa prema osi rotacije, te su odlivci zbog toga bez prslina nastalih skupljanjem gasnih mehura i poroznosti. Pored niza prednosti izrade cevi peći centrifugalnim livenjem (brže isplivavanje nemetalnih uključaka i nečistoća na površinu rastopa zbog delovanja centrifugalnih sila, manje uključaka i manje poroznosti, manje škarta, prirodan redosled očvršćavanja onemogućava pojavu grešaka u sredini odlivka ako je livenje izvedeno korektno, bolja mehanička svojstva, veća produktivnost, itd.), centrifugalno livenje ima i svoje nedostatke koji se mogu pojaviti u toku livenja, ili kasnije u eksploataciji cevi. Neke od grešaka koje se mogu pojaviti u toku centrifugalnog livenja u odlivcima centrifugalnog čeličnog liva su: greške u vidu šupljina, naponske prsline, greške na unutrašnjoj površini odlivka, netačnost odlivka po obliku i dimenzijama, nemetalni uključci, greške usled razdvajanja faza, i dr. Na osnovu ovog se može zaključiti da do senzibilizacije može doći i u toku livenja, odnosno na potpuno novoj cevi.

### 3.2.1.9 Raspoloživost

Inžinjeri i službenici u nabavci postaju frustrirani pokušavajući da dođu do materijala kojeg imaju samo određeni proizvođači ili se proizvodi samo u ograničenoj seriji tokom godine. Frustracije takvog tipa mogu biti izuzetno velike kada se radi o maloj količini potrebnog materijala da bi se završio posao ili zamenio oštećeni deo. Potrebno je izvršiti razmatranja prema originalnim specifikacijama materijala u cilju potrebne raspoloživosti tokom definisanog perioda, za slučajeve opravke ili zamene u formi u kojoj će biti korišćeni. Za slučaj da se ne mogu naći originalni materijali potrebno je definisati alternativne zamene. Ovo postaje veoma korisno za inžinjere održavanja nakon 5 ÷ 10 godina kada optimalni originalni materijal možda nije na raspolaganju.

### 3.2.1.10 Cena

Troškovi zamene cevi – pošto se cevi moraju periodično zamenjivati, to predstavlja značajne troškove. Za proizvodnju etilena, peći za pirolizu obično predstavljaju 10 ÷ 20 % ukupnih troškova za fabriku, a cevi predstavljaju oko 1/3 troškova za peći.

Ekonomija ulazi u svaku odluku u poslu. Ali, kao presudan kriterijum ne sme da bude cena materijala. Umesto nje to treba da budu troškovi životnog veka ili efektivnost troškova. Obično, daleko troškovno efektivnije je specificirati materijal koji će obezbediti duži životni vek, a naročito na mestima koja su nepristupačna i teška za opravku, ili kod komponenata koje mogu prouzrokovati veće zastoje u slučaju otkaza. U ovakvim slučajevima, početni troškovi materijala mogu biti beznačajni u poređenju sa gubitkom proizvodnje prouzrokovanim upotrebom manje efektivnijeg materijala i niže cene. Nažalost, konkurentnost i korporativni ciljevi frekventno kreiraju radne režime koji skraćuju životni vek opreme. Prosvećene kompanije će prepoznati vrednosti pristupa troškovima životnog veka proizvoda kod dugoročnih finansijskih planova i neće prihvatiti samo opciju sa malim početnim troškovima.

U tabeli 3.2.1 predstavljene su termootporne kovane legure koje se primenjuju za izradu cevi peći, s tim da su zadnje tri legure ojačane oksidnom disperzijom, dok su u tabeli 3.2.2 predstavljene livene legure za cevi.

*Tabela 3.2.1. Termootporne kovane legure za cevi pirolitičkih peći, sastav u % [32]*

Leg. čelik	Cr	Ni	Fe	Co	C	Si	Ti	Al	Ostalo
304H	19	9	Bal.	-	0.07	0.75	-	-	
310H	25	20.5	Bal.		0.07	0.75	-	-	Mn2
253MA	21	11	65.60		0.08	1.7	-	-	NO. 17, Ce0.04, Mn0.6
800H	20	31	48	-	0.08	0.3	0.3	0.3	Mn0.8
803	27	34	Bal.	-	0.08	0.3	0.4	0.4	
HK4M	25	25	Bal.	0.25	0.75	0.4	0.4	-	B0.004
HPM	25	38	Bal.	0.15	1.7	0.4	-	-	Mo2, Zr0.05, B0.01
HR120	25	37	Bal.	1	0.05	0.6	0.1	0.1	W2, Mo2, Nb7, B0.004, N0.2
AC66	27	32	41	-	0.05	-	-	-	Nb0.08, Ce0.6
MA754	20	78	1	-	0.05	-	0.5	0.3	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 0.6
MA956	20	-	74	-	0.05	-	0.5	4.5	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 0.5
ODS 803	26	37	74	-	0.08	0.8	0.3	0.3	Mn0.8

Tabela 3.2.2. Termootporne livene legure za cevi pirolitičkih peći, sastav u % [32]

Leg. čelik	Cr	Ni	Fe	Mn	C	Si	Ti	Al	Ostalo
HK40	25	20	50.65	0.6	0.29	1.35	0.37	0.44	
HP-Nb	24.65	38.75	31.90	1.01	0.15	1.65	0.43	-	Mo1.46, Nb1
HP-15Nb	25	35	bal	1	0.15	1	-	-	Nb1.5
HP-45Nb	25	35	bal	1.25	0.45	1.25	-	-	Nb1.5, S, P0.04
HP-45Nb MA	25	35	bal	1	0.45	1	-	-	Nb1.5, Zr
HP-45Nb W	25	35	bal	1.12	0.45	1.65	-	-	Nb1.15, W1.15
HP-45W	25	35	bal	1	0.45	1.5	-	-	W4
HP-45Mo	25	35	bal	1.5	0.45	1.5	-	-	Mo1.5
HP Mod Nb	25	35	<37	1	0.4	1.5	-	-	Nb1.5W1.5
HPMod Nb MA	25	35	<37	1	0.45	1.8	-	-	Nb1, Zn, r.m.
HP Mod W	25	35	<37	0.5	0.4	1.5	-	-	W4
HP Micro	25	35	bal	0.5	0.45	1.3	0.1	-	M.L.W, Zn, Nb
35/45 Micro	35	45	bal	1	0.45	2.5	0.2	-	Nb1.5, M.L. Zn
HP LC	25	35	bal	1	0.1	1.2	-	-	Nb1
IN 519	24	24	bal	0.75	0.3	0.75	-	-	Nb1.5
20Cr-32Ni-Nb	20	32	bal	1	0.1	0.75	-	-	Nb1, S1-0.03

### 3.2.2 Razvoj materijala za cevi peći

Prvi pirolizni reaktor izrađen je početkom 50-tih godina prošlog veka, i bio je malog kapaciteta. Cevni snopovi su bili horizontalno položeni i bili su izrađeni od AISI 304 nerđajućeg čelika. Tokom sledećih 30 godina, povećavao se prečnik cevi i radna temperatura što je sve zahtevalo i otpornije materijale. Razvoj primenjivanih legura (tab.3.2.3) se kretao od AISI 310 SS, 800 i livenih legura HK-40 i HP45. Osamdesetih godina prošlog veka razvijene su nešto jače livene legure HP45 koje su sadržale oko 1% Nb i 2% Si (HP45 Mod Nb) i primenjivane su u pećima sa vertikalnom konstrukcijom. Ove legure su zatim u velikoj meri zamenjene sa HP45 Mod Nb MA, slična livena legura koja sadrži nizak nivo mikrolegirajućih aditiva Ti, Zr i/ili retkih zemljanih elemenata u cilju oplemenjivanja karbidne strukture i poboljšanja otpornosti na puzanje.

Tabela 3.2.3. Razvoj materijala cevi za pirolizu benzina<sup>(5)</sup>

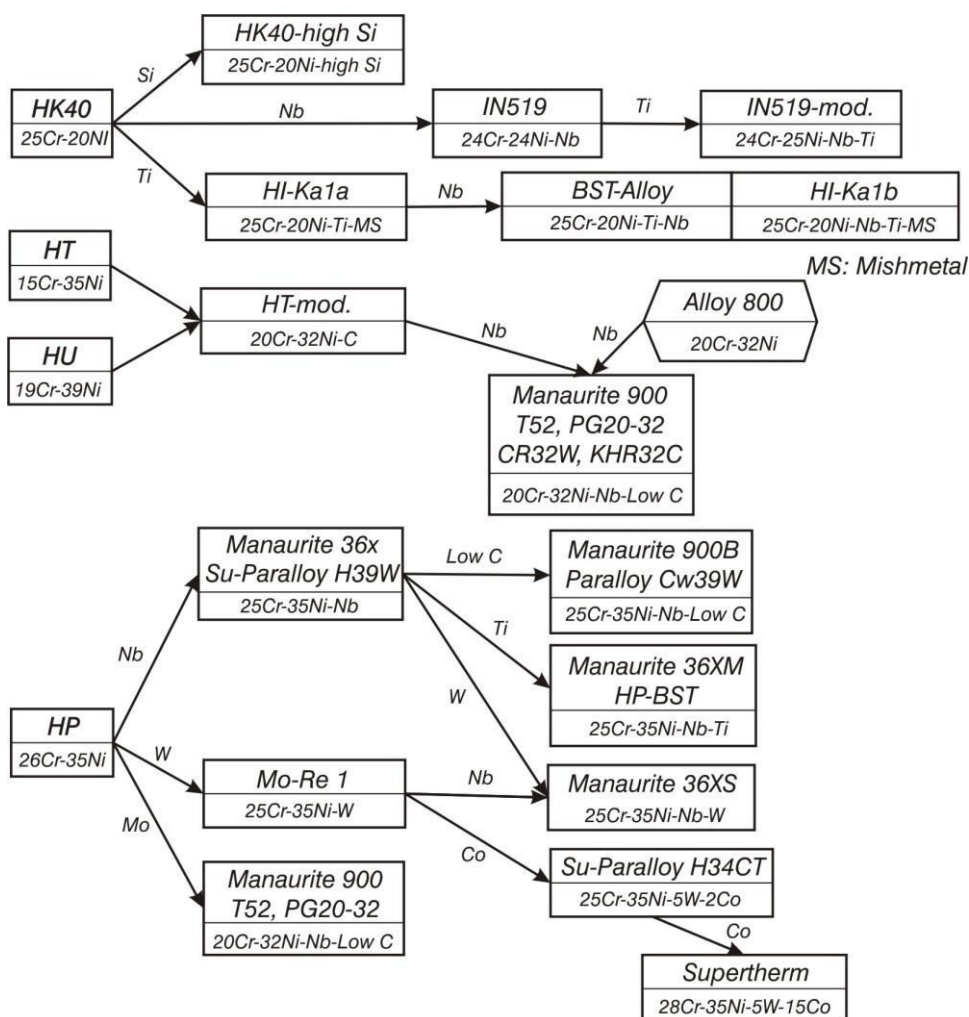
PERIOD	NAZIV	Cr %	Ni %	Nb %	OSTALO	RELATIVNA ČVRSTOĆA
- 1960	310	25	20.5	-	Si, Mn	0.8
1960	HK40	25	20	-	-	1.0
1970	IN 519	25	24	1	-	1.4
Početak 1980	BST	25	35	1	Ti	1.7
Sredina 1980	HP-BST	25	35	1	Ti	1.9
Kraj 1980	HP Micro-alloy	25	35	1	Ti, Zr, W, Cs	2.2
1990	Alloy 800	20	32	-	Si, Mn, Al, Ti	
2000	Bi-metal ODS Alloy 803 – Incoloy MA956	27 20	34 -	- -	Si, Ti, Al, Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
2010	SIC tubes (Silicon Carbide Ceramic Tube)					

Legure koje se najčešće koriste su Cr-Ni nerđajući čelici. Raniji materijal koji se koristio imao je sastav 25Cr, 20Ni, 0.4C i poznat je pod nazivom HK-40, ali sa porastom temperature rada njegovo mesto je polako zauzimao HP-40 (25Cr, 35Ni, 0.4C). U nastojanjima da se dobije dugotrajna jačina na visokim temperaturama, austenitna Cr-Ni matrica ovih legura je ojačana disperzijom čestica karbida koji su otporni na deformacije. U sirovo izlivenom stanju postoji mreža primarnih karbida duž granica zrna, i nalazi se u dendritnoj kristalnoj rešetki. Kada se nalazi u upotrebi na visokoj temperaturi, distribucija čistih sekundarnih karbida se formira na interdendritni način, u isto vreme primarni karbidi se rastvaraju. Jačina na visokim temperaturama zavisi od distribucije čistih, jakih i postojanih čestica. Nažalost, uvek postoji tendencija za ukрупnjavanje čestica tokom upotrebe na visokim temperaturama koje minimiziraju površinsku energiju, i nastaje difuzija koja to potpomaže – povišenje temperature

<sup>5</sup> Kucora, I., Radovanović, Lj., Kriterijumi izbora materijala cevni snopova pirolitičkih peći za proizvodnju lakih olefina, Zbornik radova XXXVI Konferencije Majski skup održavalaca Srbije "Merenje indikatora performansi održavanja tehničkih sistema u kompanijama, Društvo za tehničku dijagnostiku Srbije, TEHDIS, Vrnjačka Banja, 31.05.2013, ISBN 978-86-83701-30-8

ubrzava nastajanje difuzije. Tako da postoji potreba za stabilizacijom disperzije finih čestica. Ovo je postignuto modifikacijom sastava HP legure dodavanjem Nb i drugih elemenata za stabilizaciju karbida. Eksperimentalno su dodavani u malim količinama Titanijum (do 0.8%) i yttrium (do 0.3%). Titanijum je imao slične efekte kao i niobium dok je pojava yttrium-a doprinela većoj jačini na temperaturama kroz fragmentaciju hrom-karbida [32, 44, 84].

Većina modifikovanih HP legura se proučava od strane samog proizvođača. Međutim, one se veoma često kopiraju i to samo sa vrlo malim izmenama. Na slici 3.2.1 predstavljen je razvoj materijala u zavisnosti od legirajućih elemenata. Na primer, možemo napomenuti porast broja proizvođača određenih vrsta mikrolegiranih materijala koje su bile proizvedene 1986÷87 od strane samo jednog proizvođača. Danas postoji određeni broj proizvođača koji nude sličnu vrstu proizvoda. Mikrolegirajući dodaci poboljšavaju karakteristike otpornosti materijala kroz razvoj finijih i disperzivnijih karbida. Dodavanje retkih elemenata takođe doprinosi poboljšanju oksidacione i cementacione postojanosti. Efektivnost mikrolegiranja zavisi od iskustva i prakse topljenja i livenja materijala. Potpuna deoksidacija prilikom topljenja i dobro mešanje je neophodno da bi se dobile konzistentne i poboljšane karakteristike.



Slika 3.2.1. Razvoj materijala cevi peći u zavisnosti od legirajućih elemenata<sup>(6)</sup>

<sup>6</sup> Bahaa, Zaghloul, Predication Of Residual Life Time Of Steam Reformer Tubes, Central Metallurgical Research and Development Institute, Cairo 2007.

Livene legure koje sadrže 35% Cr i 45% Ni su takođe primenjivane, pošto elementi Cr i Ni poboljšavaju otpornost na puzanje i koksovanje. Postoji ponovno interesovanje za kovane cevne materijale kao što je legura Incoloy 803, pošto su projektanti prešli na manje prečnike cevi (25 ÷ 75 mm) i unutrašnje orebrene cevi u cilju maksimiziranja prenosa toplote na ugljovodonike koji prolaze kroz njih. Kovane cevi mogu biti veće dužine tj. mogu imati dužinu oko 12 m dok su livene cevi ograničene na dužinu od 2.8 m. Prema tome, značajni troškovi izrade i izvori potencijalnih defekata se eliminišu korišćenjem kovanih cevi. S druge strane, ove legure nisu sposobne da se adekvatno ponašaju na visokim temperaturama kao visokougljenične i visokolegirane livene cevi.

Interesantan napredak je načinjen pojavom unutrašnje orebljenih cevi, dizajn cevi je predstavljen na slici 3.2.2. Cevi ove konfiguracije od legura 800H, 803, HK4M i HPM se koriste u proizvodnji etilena za cevi radiacione sekcije u pećima za krekovanje. Tipična cev je spoljnog prečnika 2" (51 mm) sa 6 mm debljine zida, koja obezbeđuje povećanje unutrašnje površine od 17% sa dodatkom rebara. Ovo povećanje površine povećava termičku efikasnost i omogućava kraće zadržavanje procesnog fluida.



*Slika 3.2.2. Cevi (Inco) od legure 803 sa unutrašnjim rebrima (cevi se takođe proizvode i sa spiralnim rebrima (Inco i Sumitomo) za novije peći sa kraćim zadržavanjem procesnog fluida)*

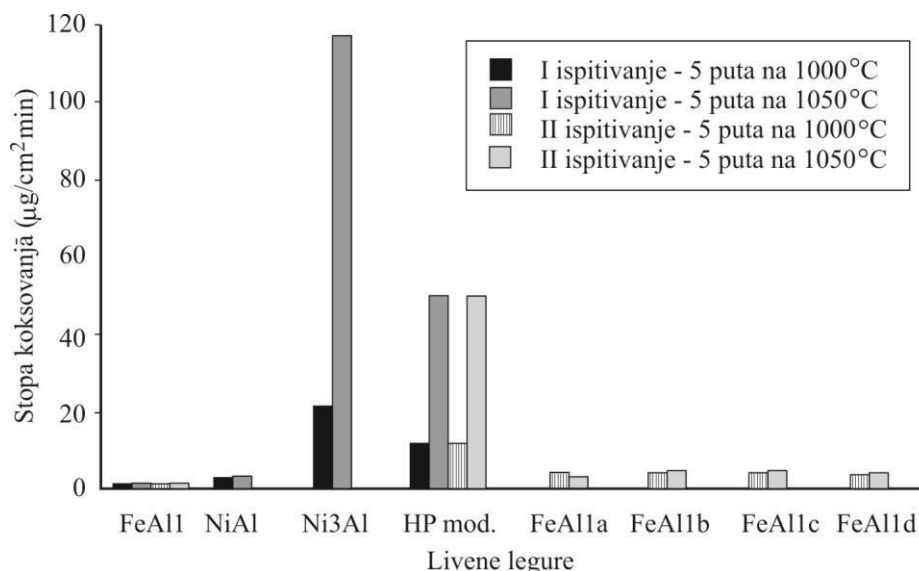
Cevi niže konvekcione sekcije etilenskih peći su obično od legure 304H dok su nosači cevi izrađeni gravitacionim livenjem od HK-40 ili HP-Nb. Fitinzi kao što su kolena, krivine, itd. u radijacionoj i konvekcionalnoj sekciji su izrađeni od istih materijala kao i cevi. Izlazni kolektori i druge atubularne komponente izvan ložišta mogu se izraditi statičkim livenjem od niskougljeničnih legura zbog lakše izrade, ili ako su temperature dovoljno niže može se koristiti legura 20Cr-32Ni-Nb. Cevi do kvenč tačke ili izmenjivača su obično centrifugalno livene od HP-Nb (visokougljeničnih ili niskougljeničnih čelika) ili 20Cr-32Ni-Nb.

Veći sadržaj ugljenika kod termički otpornih legura, kao i prisustvo drugih elemenata dovode do starenja ovih legura tokom izlaganja visokim temperaturama. Starenje rezultuje zbog formiranja sekundarnih karbida i ostalih istaloženih materija. Obično rezultuje većom zateznom čvrstoćom, ali takođe uzrokuje i gubitak elastičnosti na ambijentalnoj temperaturi što sve može dovesti do potencijalnih problema u izradi. Češće je to problem kod livenih nego kod kovanih termootpornih legura, zbog većeg svojstvenog sadržaja ugljenika.

Učestali problemi oko stvaranja koksa doveli su do pojave patentiranih tehnologija oblaganja cevi oksidnom disperzijom na tržištu od strane nekoliko preduzeća: Alon Surface Technologies, Inc., Westaim Surface Engineered Products, i Daido Steel u saradnji sa Royal Dutch Shell group. Sve ove tehnologije obezbeđuju tanko oblaganje sa malim sadržajem Ni i Fe na površinu cevi smanjujući stvaranje koksa. Neke obloge sadrže višestruke slojeve radi smanjenja efekta difuzije, i smanjuju koksovanje s faktorom  $2 \div 3$ .

FeAl legure imaju izvanrednu otpornost na oksidaciju, sulfidaciju i cementaciju na  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  i više zbog stvaranja zaštitnog sloja  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Nova livena FeAl legura (sa  $36 \div 40\%$  Al), projektovana sa poboljšanom otpornošću na visokotemperaturnu koroziju i mehaničke karakteristike, izložena je oštrim laboratorijskim ispitivanjima od strane Dow Chemical-a, simulacijom koksovanja i dekoksovanja u etilenskim pećima (sl.3.2.3). Višestruko izvođenje procesa (5x) je sprovedeno na prvobitnim uzorcima na  $1000$  i  $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ , za prvo vreme test je pokazao skoro potpunu istu otpornost na katalitičko koksovanje kao i nikel-alumidi ili najbolje komercijalne livene Fe-Cr-Ni (HP modifikovane) legure. Dalja ispitivanja na novim uzorcima FeAl legura dala su identične rezultate.



Slika 3.2.3. Rezultati ispitivanja taloženja koksa na cevi izvedena od strane Dow Chemical / ORNL – 1998. godine

Neko vreme je vladalo mišljenje da ojačane legure oksidnom disperzijom imaju značajan potencijal za primenu u etilenskim pećima za pirolizu i parnim reformerima metana. Atkinson je 1995 zapisao:

„Legure ojačane oksidnom disperzijom za primenu u etilenskoj pirolizi i metanskim parnim reformerima čine se kao legure budućnosti . . . ”<sup>(7)</sup> Legura na bazi Fe (Incoloy MA956) ima jačinu koja prevazilazi jačinu najboljih centrifugalno livenih legura u njihovom transverzalnom smeru. Takođe ima izuzetnu otpornost na cementaciju i koroziju. Legure na bazi Ni (Iconel MA 754) takođe imaju veoma veliku

<sup>7</sup> Atkinson, R.F., The Development of Heat Resistant Alloys for Reformer and Ethylene Furnaces, (in) Materials Issues in Heat Exchangers and Boilers Conference Proceedings, 17-18 Oct. 1995., Institute of Metals, p.203, 1997.

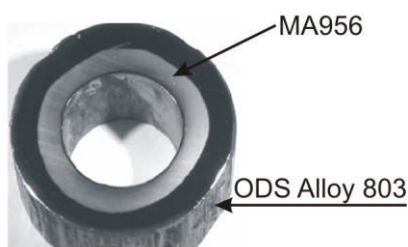
jačinu i dobru korozionu otpornost. Obe legure omogućuju podizanje izlazne temperature gasa do 1100 °C što se poredi sa trenutnim maksimumom od 1040 °C koje podnose najjače livene legure. Međutim, postoje problemi koje treba rešiti a odnose se na proizvodnju i izradu ovih legura, pre nego što se mogu razmatrati kao ozbiljni konkurenti za ovo tržište. [14]

Zaista, u drugim delovima sveta radovi na primeni ojačanih legura oksidnom disperzijom za primenu u pirolitičkim pećima za proizvodnju etilena su bili u toku. Na primer, savremeni radovi u Japanu razmatraju primenu legure Inconel 754, leguru na bazi nikla ojačanu oksidnom disperzijom, za primenu u radijacionoj sekciji. [102] Slično ovome, rad prezentovan na 13 Ethylene Forum u februaru 2001 opisuje kooperativne pokušaje između JGC Corporation of Japan i Special Metals Corporation za procenjivanje mogućnosti primene legure Incoloy MA956 za cevi u pirolitičkim pećima. [45] Ovaj rad je prikazao da legura Incoloy MA956 ima otpornost na puzanje više nego dva puta veću od sadašnje legure za pirolizu HP45 Mod usled ojačanja oksidnom disperzijom. Laboratorijski testovi koksovanja / dekoksovanja takođe su pokazali da legura ojačana oksidnom disperzijom ima stopu formiranja koksa za oko ½ manju od konvencionalne 25%Cr – 35%Ni legure za cevi pirolitičkih peći. Ova poboljšana otpornost na puzanje i koksovanje čini leguru Incoloy MA956 partikularno atraktivnom kao leguru za cevi etilenskih pirolitičkih peći. Otpornost na puzanje je postignuta proizvodnjom materijala primenom mehaničkog legiranja - proces koji uključuje mlevenje šarže elementarnog praha određenog sastava sa granulacijom (~ 20 ÷ 40 ηm) oksidnih komponenata za proizvodnju praha za ojačanje oksidnom disperzijom. Mleveni materijal se onda konsoliduje direktnim istiskivanjem praha. Nakon istiskivanja, materijal se podvrgava visokim temperaturama obično oko 1300 °C oko 1h u cilju stvaranja krupnozrnaste strukture, koja je potrebna zbog dobrih performansi (jačine) na visokim temperaturama.

Poboljšana otpornost legure na koksovanje i cementaciju je verovatno zbog velikog sadržaja aluminijuma i visoko stabilnog dupleks površinskog oksida hroma / aluminijum trioksida. Na žalost, ovaj veliki sadržaj aluminijuma takođe smanjuje plastičnost i izradljivost, čineći neprihvatljivim materijal za primenu za radijacione cevne snopove peći. Hladno oblikovanje materijala mora biti izvedeno na blago povišenoj temperaturi (~ 100 °C) u cilju minimizacije verovatnoće krtog loma. Daleko važnije je to što materijal ima ograničenu zavarljivost. Može biti spojen fuzionim zavarivanjem, ali zavareni spojevi pokazuju poroznost i segregaciju oksidne disperzije. Prema tome, tehnike spajanja u čvrstom stanju kao što su difuziono lepljenje i eksplozivno zavarivanje se najuspešnije primenjuju. Međutim, ove tehnike baš ne odgovaraju najbolje uslovima izrade ili zameni cevi pirolitičkih peći.

Dalji razvoj cevi etilenskih peći kreće se u smeru bimetalnih cevi (sl.3.2.4). Unutrašnji deo cevi je izrađen od legure Incoloy MA956, komercijalne feritne Fe-Cr-Al legure s kojom se može postići i do 50% smanjenja stvaranja koksa i koja ima poboljšanu postojanost na cementaciju. Spoljni deo cevi sastoji se od novog materijala – legure 803 ojačane oksidnom disperzijom (ODS). Nova legura je zadržala ložišnu postojanost legure 803, komercijalno kovana legura koja se trenutno koristi u proizvodnji etilena, i obezbeđuje austenitnu oplatu za zaštitu inherentno ograničene mogućnosti izrade feritnog jezgra od Incoloy MA956. U cilju obezbeđenja mehaničke kompatibilnosti između dve legure i maksimiziranja postojanosti na puzanje kod bimetalnih cevi, obe legure se ojačavaju oksidnom disperzijom. [14]





*Slika 3.2.4. Bimetalna cev spoljnjeg prečnika 32 mm i unutrašnjeg prečnika 16 mm, dobivena ekstruzijom. Unutrašnji deo cevi je izrađen od Incoloy® MA956, dok je spoljašnji deo izrađen od ODS Alloy 803 [14]*

Poslednje dostignuće na tržištu etilenskih cevi jesu keramičke cevi (sl.3.2.5). Životni vek ovih cevi iznosi 2 do 3 puta više od konvencionalnih, uz značajno smanjenje taloženja koksa. Omogućuju procesuiranje hemikalija na daleko višim temperaturama (1200 – 1400 °C), u poređenju sa čeličnim cevima (1060 °C). Više temperature rezultuju efikasnijom reakcijom tako da dolazi do redukcije nusproizvoda i do 10%. Usled relativne inertnosti silicijum karbida (Silicon Carbide - SIC) porede ga sa niklom i hromom u pogledu stvaranja naslaga koksa. Vreme između dekoksovanja kod klasičnih cevi se kreće oko 40 dana dok kod keramičkih cevi ide i do 300 dana. U pogledu dužine, cevi su kraće, pa je potrebno ostvariti veći broj spojeva prilikom izrade cevni zmijs.



*Slika 3.2.5. Keramičke cevi i spojevi [14]*

Sve ove tehnologije su potencijalno interesantni načini koji proizvođačima etilena pomažu da prevaziđu surove režime eksploatacije (krekovanje) u cilju povećanja produktivnosti proizvodnje. Međutim neke od njih imaju ograničenja. Livena legura sa 35%Cr – 45%Ni ima temperaturu solidusa čak nižu nego tradicionalna HP45 Mod, pomerajući dozvoljeni procesni opseg između radne temperature i temperature topljenja.

Pošto mestimično topljenje – pogotovo tokom procesa dekoksovanja – oštećuje protektivni površinski oksid i povećava koksovanje, tako da ova legura zahteva veoma strogu kontrolu procesa. Takođe su vršena istraživanja da hrom legure kao što su 35% Cr – 45% Ni mogu postepeno gubiti sposobnost za ponovnim formiranjem protektivnog oksidnog sloja nakon dekoksovanja i mogu pretrpeti otpuštanje hroma na temperaturi oko 1200 °C. Kovani materijali su veoma atraktivni kao materijali za pirolizne cevi zbog njihove sposobnosti formiranja u dugačke, malog prečnika – i unutar profilisane cevi. Takođe većina od njih može biti brzo i dobro zavarena. Na žalost, savremene kovane legure ne mogu postići takvu otpornost na puzanje kao centrifugalno liveni suparnici. Oblaganje cevi je dosta napredovalo proteklih godina, ali cena i dugotrajnost ovih obloga i dalje daje dosta razloga za razmatranje. Modifikacije procesa kao što je ubrizgavanje sumpora i pare je od koristi, ali smanjuje ukupnu efikasnost procesa i može dovesti do daljnjeg razmatranja problema (smanjenja proizvodnje - misleći da nešto drugo utiče na proizvodnju).

Materijali ojačani oksidnom disperzijom imaju značajan potencijal za uštedu energije i povišenje produktivnosti. Međutim danas na konkurentnom tržištu proizvođači peći i proizvođači etilena nerado plaćaju premije za cevne snopove viših performansi od poboljšanih materijala kojima se nudi eksploatacija na većim temperaturama ili duži vek eksploatacije. Interesovanje za materijale ojačane oksidnom disperzijom će se verovatno povećati ako proizvođači peći i etilena počnu da se više fokusiraju na povećanje temperatura zidova u cilju povećanja produktivnosti. [62]

Kriterijum izbora leži na inženjerima, da odaberu iz grupe materijala pored koje su paralelno date i njihove karakteristike. Na žalost, optimalne performanse povezane sa svakim kriterijumom izbora retko se javljaju u jednom materijalu, pogotovo kada uslovi rada postanu agresivni. Prema tome, kompromisi se moraju često praviti da bi se ostvarile najbolje performanse odabranog materijala. Princip kriterijuma izbora materijala za pirolitičke peći obuhvata, ali takođe nije ograničen na sledeće [62]:

- mehaničke karakteristike,
- otpornost na koroziju,
- postojanost karakteristika,
- otpornost na koksovanje,
- otpornost na cementaciju,
- otpornost na krunjenje metala,
- otpornost na nitraciju,
- zavarljivost i izradljivost,
- raspoloživost, i
- cenu.

### 3.3 Mehanizmi oštećenja cevi

Radijacione cevne zmijske imaju ograničen životni vek a otkazi su prouzrokovani mnoštvom faktora, od kojih su mnogi povezani sa radom peći. Međutim svaka fabrika ima specifične uslove režima rada i svojstvenu filozofiju rukovanja. Zbog toga svaka fabrika ima i tipične uzroke za otkaze radijacionih zmijski što je od značaja za operatere u cilju analize i razumevanja tipičnog mehanizma otkazivanja. Do oštećenja cevi najčešće dolazi usled [65]:

- formiranja koksa,
- gubitka elastičnosti,
- termičkog zamora,
- krtog loma,
- erozije,
- pregrevanja,
- ljudskog faktora,
- puzanja,
- cementacije,
- oksidacije,
- nitracije, i
- dehromizacije.

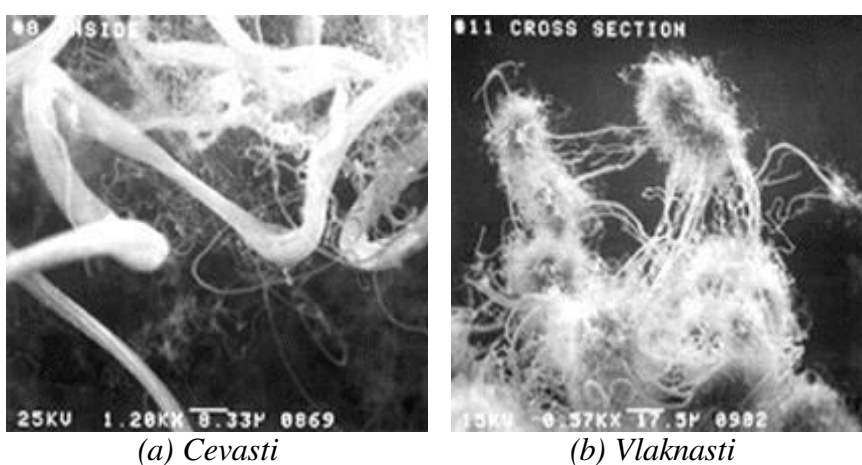
#### 3.3.1 Formiranje koksa

Stvaranje koksa je ozbiljan problem u industrijskoj pirolizi. Progresivno taloženje koksa na unutrašnje zidove cevi piroliznih peći i kvenčnih izmenjivača se odvija tokom rada usled prisustva nezasićenih supstanci i u zavisnosti od režima eksploatacije. Mogu se izdvojiti četiri glavne posledice procesa koksovanja:

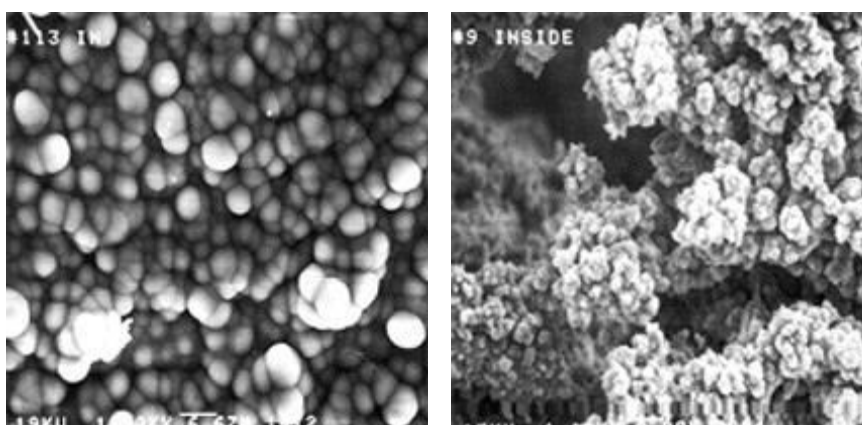
- kontinualan rast temperature spoljašnjeg zida cevi i dostizanje maksimalno dozvoljene vrednosti (ovaj uzrok utiče na vreme u radu),
- porast pada pritiska tokom vremena rada i uticaj na selektivnost procesa,
- progresivno smanjenje termičke efikasnosti peći, i
- progresivno smanjenje veličine reakcije.

Mada postoje razna mišljenja o mehanizmu formiranja koksa, uopšte je usvojeno da se koks formira kroz dve razdvojene reakcije tj. tokom katalitičke faze i tokom pirolitičke faze. Ove dve vrste koksa nastaju u zavisnosti od vremena provedenog u radu (starosti cevi) i stoga imaju različite karakteristike.

Katalitički koks (sl.3.3.1) nastaje usled dehidrogenacije ugljovodonika zbog katalizatora iz metalnih komponenata sa površine cevi reaktora. Čestice gvožđa i nikla napuštaju zidove cevi pošto apsorbuju ugljenik (iz CH radikala) na hladnijoj strani cevi i talože se na toplijoj strani. Naslage imaju oblik šupljih cevi koje nastoje da se proširuju u dužinu. Ovakva forma ugljenika ima mnogo slobodnog prostora između cevčica što je čini dobrim izolatorom. Ovakav oblik koksa je veoma tvrd i nije ga lako ukloniti dekoksovanjem. Katalitičko koksovanje je povezano sa cementacijom zbog toga što naslage ugljenika istiskuju čestice metala i disosuju u metal na visokim temperaturama.



Slika 3.3.1. Katalitički koks [108]

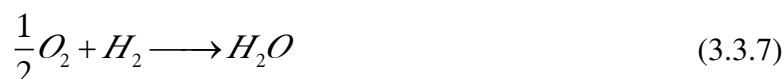
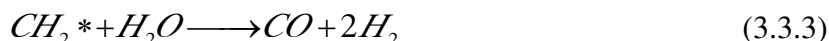


Slika 3.3.2. Pirolitički koks [108]

Pirolitički koks (sl.3.3.2) je mekši i može se razvrstati na dve vrste: gasni i kondenzacioni koks. Gasni koks nastaje dehidrogenacijom lakih olefinskih ugljovodonika kao što je acetilen, a kondenzacioni koks nastaje kondenzacijom / polimerizacijom / dehidrogenacijom teških aromatičnih sastojaka. Proces uklanjanja

pirolitičkog koksa je daleko lakši od procesa uklanjanja katalitičkog koksa. Postoje više vrsta pirolitičkog koksa i veoma je teško definisati njihov oblik. Klasifikovan je prema morfološkim karakteristikama (loptast, crni ogledajući, paperjast i amorfan) i prema sastavu ugljovodonika (gasni i kondenzacioni).

Primarna reakcija formiranja koksa na metalnim površinama zidova cevi u radijacionoj i kvenčnoj sekciji se može predstaviti [108]:



Odmah nakon dekoksovanja elementi koji se nalaze na unutrašnjim zidovima cevi i na izlaznim površinama cevi su u krajnje oksidizovanom stanju, Fe<sub>2</sub>O, MnO, Cr<sub>2</sub>O, NiO itd. Oksidi deluju kao katalizatori za dehidrogenaciju. Takođe se podrazumeva i apsorpcija O<sub>2</sub> i H<sub>2</sub>O na ovim površinama. Eksperimentalni podaci pokazuju da je jednačinama (3.3.2 i 3.3.6) kinetička stopa ograničena sve dok preostale reakcije traju ili su veoma blizu ravnoteži sa površinom metala.

U toku rada, vremenom, parcijalni pritisci O<sub>2</sub> i H<sub>2</sub>O na površinu metala se smanjuju. Stopa redukcije krajnje oksidirajućih elemenata na površinu se smanjuje a već formiran koks obezbeđuje difuzionu barijeru, koja sprečava prolaz H<sub>2</sub>O na površinu. Kao rezultat, desna strana jednačine (3.3.3) je nepopularna zbog nižeg parcijalnog pritiska H<sub>2</sub>O. Stvaranje CO i dekompozicija C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> se konsekventno smanjuje. Odnos CO/CO<sub>2</sub> se povećava prema jednačini (3.3.4) što potpomaže ugljeničnu reversnu reakciju.

U krajnjem slučaju parcijalni pritisak H<sub>2</sub>O na površinu metala zavisi od stope difuzije H<sub>2</sub>O kroz sloj koksa. Ako se režimi rada održavaju konstantnim, stopa koksovanja će se smanjivati tokom vremena.

Kad god se obustavlja rad peći potrebno je izvršiti dekoksovanje peći radi uklanjanja naslaga koksa sa zidova cevi i površina kvenčnog izmenjivača. U modernoj industrijskoj pirolizi proces dekoksovanja se izvodi prolaskom smeše pare i vazduha kroz cevi peći pri temperaturi koja je nešto viša od normalne temperature za krekovanje (~ 880 ÷ 900 °C). Primarna reakcija je da vodena para menja reakciju, slično onoj u gasifikaciji koksa [108]:



U nekim ranijim procesima dekoksovanja dodavao se vodonik u paru pre ulaska pare u cevi peći. Ranije je vladalo mišljenje da dodatak vodonika treba da potpomogne metanaciju i vodi reakciju (3.3.9) do kraja. Međutim u praksi ovo je veoma malo ubrzalo reakciju gasifikacije. Ovaj metod se nije dugo zadržao u upotrebi. [108]



Nepovoljnost u ovom slučaju je da će na površinama kvenčnih izmenjivača visoki parcijalni pritisak  $H_2O$  zaista usporiti gasifikaciju koksa. Tako da stoga proizilazi da smeša vazduha i pare ne može efektivno dekoksovati kvenčne izmenjivače. Obično se pri kraju procesa dekoksovanja peći za pirolizu odnos vazduh / para povećava da bi se obezbedila veća količina vazduha u peći koja će potpomoći efektivnije uklanjanje koksa sa površina kvenčnih izmenjivača. Neke modernije peći danas su opremljene mlaznicama za ubrizgavanje vazduha direktno u kvenčni izmenjivač radi procesa dekoksovanja.

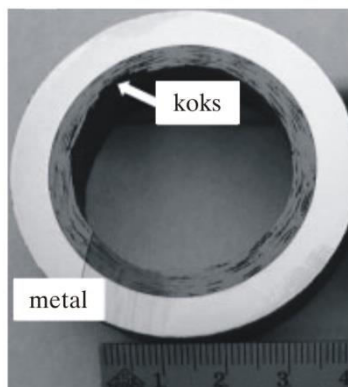
Neki proizvođači etilena primenjuju razne vrste aditiva u cilju smanjenja koksovanja. Proizvođači koriste sirovine na bazi etana ili propana kojima često dodaju komponente koje sadrže sumpor, kao što su vodonik sulfid, dimetil sulfid ili merkaptani. Veruje se da ovi aditivi rade tako što se raspadaju na elementarni sumpor. Tada ovaj elementarni sumpor konvertuje okside u sulfide i/ili formira zaštitni sulfidni film preko metalne površine. Mnoštvo patentiranih aditiva, uključujući kalaj-silicijum, organski fosfor i silicijum / sumpor + dimetildisulfid, se takođe koriste od strane nekih proizvođača. Jedan proizvođač (Nova Chemicals) je takođe izneo na tržište pretretman kontrolisanom oksidacijom koji tvrdi da obezbeđuje značajnu redukciju stvaranja koksa. Rad se takođe odvija i na nekoliko nacionalnih laboratorija gde se razvijaju mogućnosti za minimalizaciju koksovanja u ugljovodoničnim pećima. Na primer nacionalna laboratorija Oak Ridge u SAD saraduje sa Materials Technology Institute i nekoliko hemijskih kompanija na razvoju materijala na bazi aluminijuma za potrebe pirolize benzina. [74]

Tretman sumporom ima svoja ograničenja pošto slojevi metalnih sulfida teže da budu uništeni ljušpanjem ili čak rastvoreni u slučaju nikel-sulfida. Drugi hemijski aditiv sa istom namenom je vodeni rastvor soli IA i IIA metala, kao što su jedinjenja na bazi silicijuma i fosfora.<sup>8</sup> Svi oni se zasnivaju na istom principu formirajući zaštitni sloj. Formiranjem ovakvog sloja dolazi do smanjenja katalitičkog koksovanja. Ove tehnike nisu široko rasprostranjene pošto su relativno skupe.

U toku normalnog rada sloj koksa se taloži na unutrašnjem prečniku cevi (3.3.3). Na kraju rada slojevi koksa mogu biti debeli i do 20 mm. Tokom procesa dekoksovanja koks se gasifikuje u cilju čišćenja cevi.

Međutim u toku promena između normalnog rada i procesa dekoksovanja dolazi do temperaturnih skokova. Usled toga što je temperaturni koeficijent širenja cevi veći od temperaturnog koeficijenta širenja koksa, koks se odvaja od cevi. Zbog visoke tvrdoće koksa metal ne može razbiti koks. Ovo prouzrokuje velika zatezna opterećenja u metalu cevi, koji se relaksira tokom procesa dekoksovanja. Stepenn opterećenja koji se javlja proporcionalan je proizvodu razlike koeficijenta termičkog širenja koksa i materijala cevi, i razlici temperature u skladu sa jednačinom  $\Delta\varepsilon = \Delta\alpha \cdot \Delta T$  gde je  $\alpha$ -metal  $\approx 19 \mu\text{m/mK}$ ,  $\alpha$ -koks  $\approx 4 \mu\text{m/mK}$  [51].

<sup>8</sup> Kucora, I., Paunjoric, P., Tolmac, J., Vulovic, M., Speight, J and Radovanović, Lj., Coke Formation in Pyrolysis Furnaces in the Petrochemical Industry, *Petroleum Science and Technology*, ISSN 1091-6466 (Print), 1532-2459 (Online),

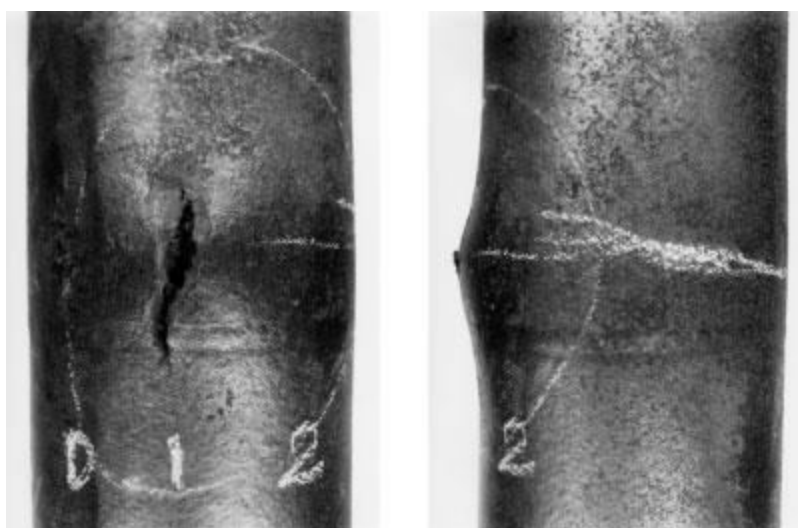


Slika 3.3.3. Prikaz poprečnog preseka cevi peći sa slojem koksa

U toku normalnog dekoksovanja pad temperature može biti  $100 \div 200$  °C, što prouzrokuje stepen opterećenja od  $0,15 \div 0,30$  % koji odgovara visokom stepenu opterećenja. Za vreme procedure dekoksovanja ova visoka opterećenja se opuštaju zbog puzanja. Mehanizam oštećenja je otuda ciklična relaksacija puzanja. Tokom svakog ciklusa cev pomalo puza, a pri kraju životnog veka materijal dostiže sopstvenu otpornost na puzanje.

### 3.3.2 Gubitak elastičnosti

Gubitak elastičnosti se može prepoznati ispupčenjem na cevi i kratkom longitudinalnom pukotinom na vrhu ispupčenja (sl.3.3.4).



Slika 3.3.4. Tipično oštećenje cevi peći – gubitak elastičnosti

### 3.3.3 Termički zamor

Kolena i izlazni fitinzi (Y – račve, tetra fitinzi, flanšne) debelih zidova mogu stradati od cementacije i termičkog zamora. Cementirana zona je krta i već ispucala na malom opterećenju. Termička opterećenja u toku operacije pokretanja / zaustavljanja, kao i ciklusa dekoksovanja prouzrokuju termički zamor u unutrašnjosti takvih debelozidnih komponenata. Očigledna karakteristika je da su pukotine orijentisane u raznim smerovima i da su širom otvorene. Neki ovo nazivaju „pucanje zemlje” (sl.3.3.5). Ova vrsta stvaranja pukotina se ne smatra životno limitirajućom komponentom.<sup>9</sup>

Metalografske karakteristike koje identifikuju niskociklični termički zamor su: višestruka mesta inicijalizacije koje se naizmenično udružuju i formiraju glavnu prskotinu, poprečni lom i lom kroz zrna.



Slika 3.3.5. Termički zamor materijala i cementacija u kolenu

### 3.3.4 Krt lom

Pojava oštećenja puzanjem može biti makroskopski evidentirana kao krt ili žilav lom. Krt lom je intergranularni i nastaje na malim stepenima opterećenja sa malim ili nikakvim izduženjem. Može se prepoznati po dugim longitudinalnim pukotinama čiji kraj se pojavljuje u obliku račvi (sl.3.3.6) [47]. Ponekad se pukotine pojavljuju po obimu ili „prozorima” koji otpadaju sa zidova cevi. Pukotine mogu biti dugačke i po nekoliko metara, a mnogo puta je prisutan debeo sloj koksa na unutrašnjem zidu cevi. U mikrostrukturi može se zapaziti da su karbidi razdeljeni. Ovo pravi razliku u odnosu na elastični lom i može se veoma lako prepoznati.

<sup>9</sup> Kucora, I., Adamović, Ž., Radovanović, Lj., Otkazi cevi etilenskih peći, Energetske tehnologije, 2013., Vol.10. ,No 1., str. 47-53, ISSN 1451 9070

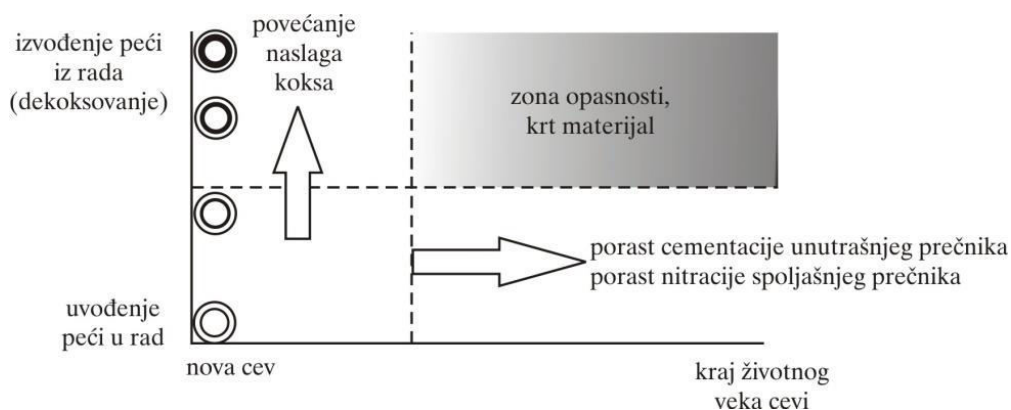




Slika 3.3.6. Izgled oštećenih cevi – krt lom

Metalna cev se skuplja oko „koksane cevi” tokom pada temperature. Tokom normalnog procesa dekoksovanja pad temperature je limitiran na oko  $100 \div 200$  °C. U toku tripovanja peći pad temperature može iznositi od  $500 \div 900$  °C. Opterećenje tokom takvog tripa peći iznosi od  $0.75 \div 1.5$  %. Ovo odgovara granici elastičnog loma starog, cementiranog i nitriranog materijala između RT i  $\sim 600$ °C. Pošto materijal teži pucanju kada se dostigne granica istegljivosti, tako da i cevi onda pucaju. Zbog starih, nitriranih i cementiranih materijala cevi su krte na ovim temperaturama, one pucaju razdvajajući karbide a posledično i cev. Krti lomovi mogu nastati kao posledica raznih uzroka. Verovatnoća pojave krtog loma zavisi od:

- oštine tripovanja (pada temperature), debljine sloja koksa unutar cevi, tanki slojevi koksa na početku uvođenja peći će biti smrvljeni, ali debeo sloj koksa prilikom izvođenja peći, neće, i
- stepena krtosti materijala koji se determiniše količinom ostarelog i cementiranog materijala.

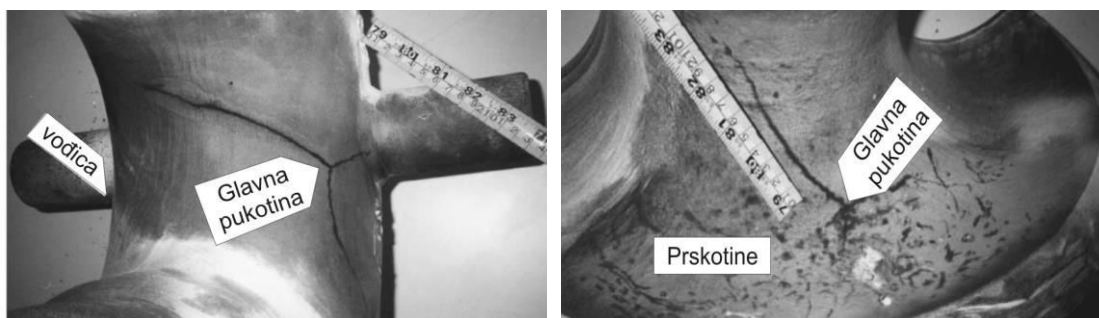


Slika 3.3.7. Nepoželjna zona eksploatacije peći s aspekta pojave krtog loma cevi<sup>10</sup>

<sup>10</sup> Kucora, I., Adamović, Ž., Radovanović, Lj., *Otkazi cevi etilenskih peći*, Energetske tehnologije, 2013., Vol. 10, No 1, стр. 47-53, ISSN 1451- 9070

Kao preporuka, krt lom najčešće nastaje kada su cevi već nekoliko godina stare i kada je peć u drugoj polovini perioda rada. Ova opasna zona je predstavljena na slici 3.3.7.

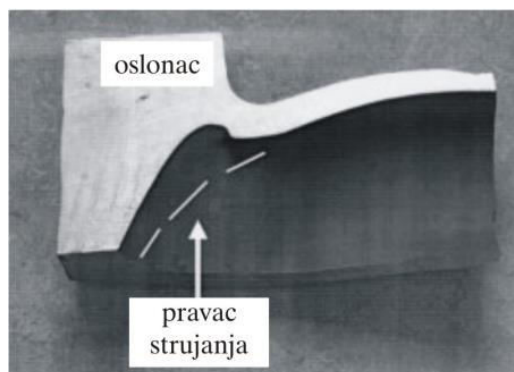
Krt lom kod kolena je predstavljen na slici 3.3.8. Oštećeno koleno je presečeno na dva dela. Na spoljašnjoj površini se jasno vide tri pukotine, koje se mogu uočiti i sa unutrašnje strane. Njihov položaj i njihova dužina je identična. Sa slika se može zaključiti da su one nastale u jednoj tački i širile se na tri različite strane. U okolini ovih triju prskotina s unutrašnje strane zapažene su i manje prskotine.



Slika 3.3.8. Krt lom kolena pod dejstvom visoke temperature  
levo - izgled spolja, desno - unutrašnji presek kolena<sup>(11)</sup>

### 3.3.5 Eroziija

Eroziija se može posmatrati kod kolena od 90° ili 180° ili kod Y-delova, primer je predstavljen na slici 3.3.9. Najprihvaćenija teorija je da eroziju prouzrokuju tvrdi delovi koksa tokom procesa dekoksovanja. Neki istraživači veruju da je ova eroziija prouzrokovana delićima koksa koji su prisutni tokom normalnog rada.



Slika 3.3.9. Primer erozije na poprečnom preseku kolena  
(isprekidana linija označava dimenzije novog dela)

<sup>11</sup> El-Batahgy, A., Zaghoul, B., Creep failure of cracking heater at a petrochemical plant, Materials Characterization 54, pp.239–245, 2005.

### 3.3.6 Pregrevanje

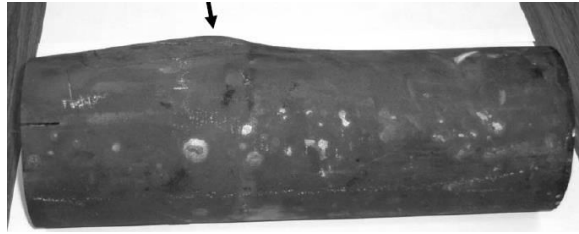
Sledeći mehanizam oštećenja je pregrevanje, koje rezultuje lokalnim topljenjem cevi ili čak i cele cevi. Pregrevanje može nastati usled gubitka protoka, začepljenja usled koksa ili problema s brenerom. Gubitak protoka može nastati kada ulazni ventili otkažu ili u slučaju problema s kompresorom. Primer za pregrejane cevi dat je na slici 3.3.10.



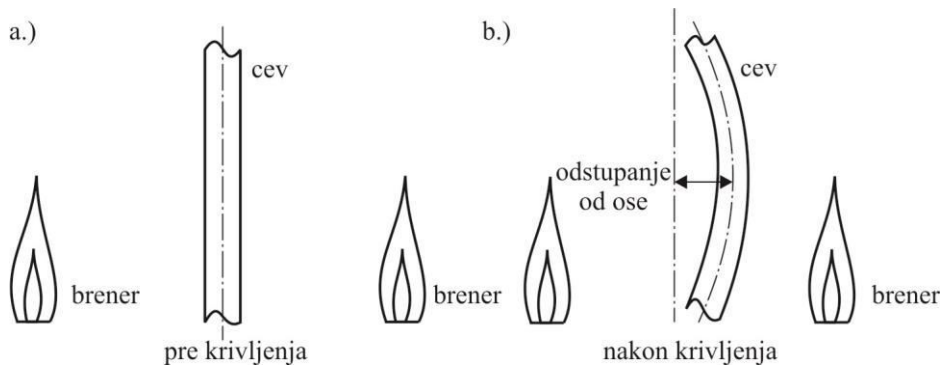
Slika 3.3.10. Oštećenje cevi izazvano pregrevanjem<sup>(12)</sup>

Pregrevanje može prouzrokovati ispuščenja (sl.3.3.11), međutim pucanje po obimu se prouzrokuje ne samo pregrevanjem nego već takođe i uticajem napona istezanja i redukcijom izduženja. Kada cev dostigne značajnije krivljenje ono je izloženo u većoj meri uticaju temperature (sl.3.3.12). Breneri su raspoređeni sa po obe strane cevi, tako da su cevi izložene istoj temperaturi sa obe strane. Međutim usled krivljenja cevi jedna strana je bliža grejaču od druge strane. Bliža strana cevi izložena je većoj temperaturi a samim tim postaje podložnija pregrevanju i oštećenju. Viša temperatura će takođe prouzrokovati dalje povećanje i krivljenje cevi, izlažući je dalje većem pritisku, tj. kompresiji. Spoljašnja površina cevi izložena je naponu istezanja sa iskrivljene strane, tako da se javlja prskotina nastala sa ove strane i sa spoljašnje površine. Kada se formira prskotina ona se dalje direktno izlaže visokotemperaturnoj oksidaciji. Jačina granice zrna se smanjuje i stvara intergranularne prskotine.

<sup>12</sup> Jakobi, D., Gommans, R., Typical failures in pyrolysis coils for ethylene cracking, Materials and Corrosion, 54, No.11, 2003.

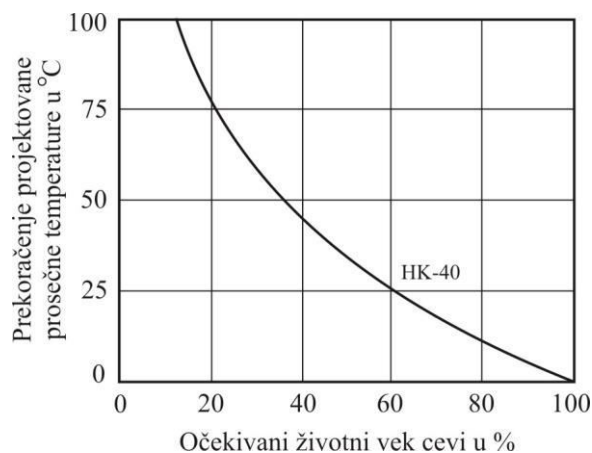


Slika 3.3.11. Ispupčenje na cevi uzrokovano pregrevanjem i puzanjem



Slika 3.3.12. Šematski prikaz krivljenja i pregrevanja cevi

Sledeći činilac koji doprinosi pucanju jeste smanjenje istegljivosti materijala u ovom delu usled pregrevanja. Pregrevanje dovodi do značajne degradacije jačine i istegljivosti tokom eksploatacije. S druge strane, prilikom izlaganja visokim temperaturama, sekundarni karbidi se talože u austenitnoj matrici termootpornog čelika, smanjujući izduženje i istegljivost [1]. Istegljivost je od primarnog značaja pošto metal treba da ima mogućnost plastične deformacije tokom širenja cevi. Neki čelici mogu izgubiti više od 80% njihove originalne istegljivosti prilikom boravka na visokim temperaturama.



Slika 3.3.13. Uticaj porasta radne temperature na očekivani životni vek cevi od legure HK-40 [35]

Na pregrevanje utiče i rad brenera. Breneri treba da su pravilno podešeni, tj. da je podešen odnos intenziteta toplote između podnih i zidnih brenera što će redukovati intenzitet plamena na određenoj visini i ostvariće ravnomerniju temperaturu duž ose cevi, a takođe i da svaki brener ponaosob ima dobro sagorevanje. Inače uticaj lokalnog povećanja temperature uzrokuje smanjenje preostalog životnog veka usled puzanja kao što je to prikazano na slici 3.3.13 [63].

### 3.3.7 Ljudski faktor

Mnogi problemi povezuju se sa radom peći, tj. njenim rukovanjem. Pregrevanje, udar plamena u cev, nitracija, skidanje oksida, erozija, a pogotovo krt lom se može sprečiti pravilnim radom peći.

Elongacija puzanja, cementacija, i dostizanje kritične granice puzanja se takođe može držati unutar granica ispravnim radom peći, dobrim izborom materijala, kao i dobrom konstrukcijom.

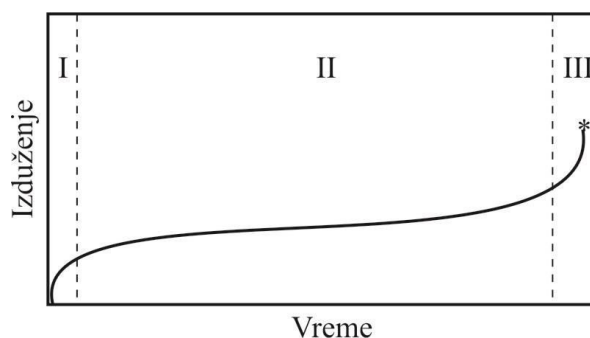
Pregledi peći mogu doprineti pravovremenom otkrivanju nadolazećih oštećenja, i zbog toga se moraju izvoditi u pravilnim vremenskim intervalima (npr. nakon izvođenja peći iz rada i dekoksovanja).

### 3.3.8 Puzanje

Puzanje materijala je primarni uzrok oštećenja cevi peći. Obično počinje unutar zida cevi na oko 2/3 od spoljašnje površine, što je nemoguće utvrditi metalografskim ispitivanjem na licu mesta. Ova pojava je u suprotnosti sa pojavama koje se javljaju kod pregrejača pare i sabirnika gde se puzanje javlja na spoljašnjoj površini cevi što je očigledno i lakše otkriti.

Puzanje je dugoročna deformacija metala koja se obično javlja na povišenim temperaturama. Pojava oštećenja puzanjem može biti makroskopski evidentirana kao krt ili žilav lom. Krt lom je intergranularni i nastaje na malim stepenima opterećenja sa malim ili nikakvim izduženjem. Puzanje je vremenski zavisno opterećenje koje nastaje pod naprezanjem i može se završiti lomom uz napon preloma. Glavne promenljive koje determinišu stepen deformacije pod puzanjem su: temperatura, vreme i opterećenje. Uopšteno gledajući kriva puzanja (sl.3.3.14) obuhvata tri faze: primarnu, sekundarnu i tercijalnu.

Deformacija puzanjem je nagla u toku kratkog perioda vremena kada se oprema po prvi put stavlja u pogon (primarno puzanje) sl.3.3.14-I. Nakon toga stopa deformacije postaje konstantna i relativno mala za duži period vremena (sekundarno puzanje) sl.3.3.14-II. Nadalje prema kraju životnog veka deformacija ponovo postaje nagla (tercijalno puzanje) sl.3.3.14-III. Petrohemijske peći obično rade u sekundarnom regionu puzanja.



Slika 3.3.14. Faze u razvoju puzanja

Puzanje je kombinacija trostrukog mehanizma:

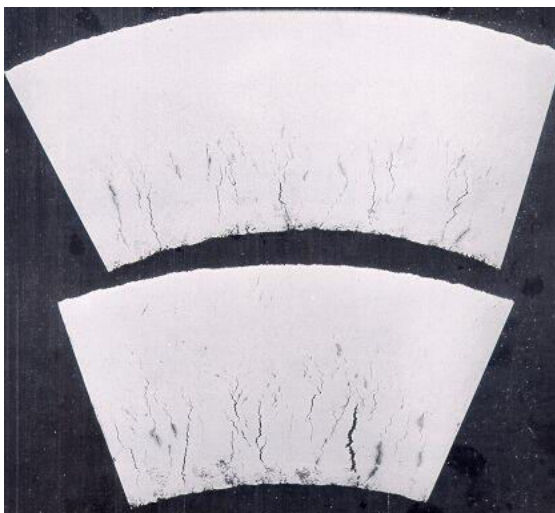
- difuzije,
- klizanja granice kristala, ili klizanja granice zrna, i
- kretanja dislokacija – dislokacije su linearni defekti u kristalima metala koje prouzrokuju deformaciju kada se kreću kroz kristal.

Sličnosti između puzanja i hemijskih procesa:

- postojanje aktivacione energije za puzanje,
- porast temperature povećava stopu nastajanja puzanja,
- pritisak ili opterećenje takođe utiču na stopu puzanja, i
- puzanje može biti simulirano i simulacija se može koristiti za predviđanje šta će se desiti u budućnosti – preostali životni vek cevi.

Glavne vrste otkaza na visokim temperaturama su puzanje i lom usled opterećenja, niskociklični ili visokociklični termički zamor, i kombinacija ovih otkaza. Karakteristike koje identifikuju niskociklični termički zamor su: višestruka mesta inicijalizacije koja se naizmenično udružuju i formiraju glavnu prskotinu, poprečni lom i lomovi kroz zrna. Međutim prskotine sa sličnim karakteristikama, ali s izraženim međuzrnastim lomovima su uzrokovani puzanjem ili pojavom loma usled opterećenja. [1].

Osnovni mehanizam koji se uključuje u stvaranje oštećenja puzanjem jeste stvaranje praznog prostora – šupljina (nedostatak atoma) nastalog tokom difuzije (species - grupa) pod opterećenjem i deformacijom na nivou atoma: ove šupljine teže da se grupišu na granicama zrna formirajući pore. Prilikom formiranja više pora dolazi do slabljenja kohezivnih sila na granici zrna tako da nastaju pukotine i dolazi do njihovog širenja (sl.3.3.15).



*Slika 3.3.15. Spajanje praznina usled puzanja – oštećenje puzanjem nakon dužeg vremena eksploatacije u blizini sredine zida cevi [1]*

Veruje se da oštećenja puzanjem nastaju kao rezultat metalografske nepostojanosti uključujući taloženje karbida koja uzrokuju omekšavanje i inicijalizaciju šuplina ili klinastih međuzrnastih prskotina (tipična karakteristika oštećenja usled puzanja). Povećanje temperature unutrašnje površine cevi u toku procesa dekoksovanja doprinosi oštećenju puzanjem, koje ubrzava prevremeno oštećenje. Termički zamor je očekivan kao rezultat temperaturnih varijacija usled nekoliko zaustavljanja i pokretanja.

Oštećenja poruzrokovana puzanjem se pojavljuju u unutrašnjoj trećini zida, pojavljujući se u formi oblikih praznina nasumično raspodeljenih na dendritskim ivicama. Nihova prioriteta orijentacija je na ivicama normalna na maksimalni glavni napon naprezanja. Na 50% od preostalog životnog veka, granične ivice prikazuju poravnane šupljine puzanja, ali bez povezanosti među njima. Nakon 50% preostalog životnog veka odgovarajuće izabran poprečni presek će prikazati poravnate šupljine i mikropukotine nastale njihovim spajanjem. Neke mikropukotine mogu dostići unutrašnju površinu, i konzervativno mogu se smatrati da je preostali životni vek stigao do kraja kada pukotine dođu do spoljnje polovine debljine zida. Oštećenja puzanjem uopšteno rezultuju višestrukim longitudinalnim pukotinama.

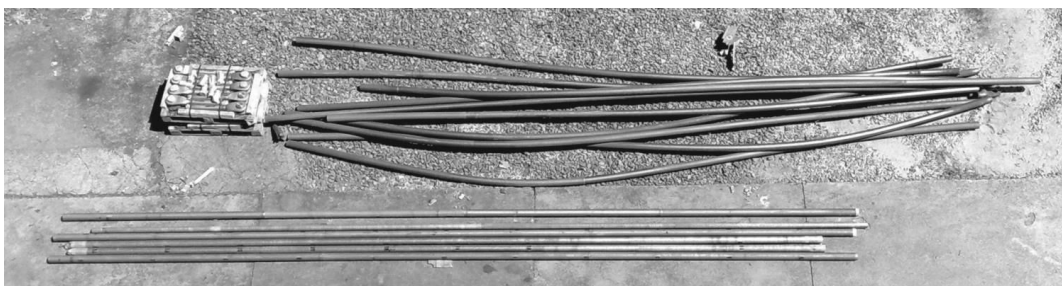
Izduženje usled puzanja (sl.3.3.16 i 3.3.17) nastaje zbog puzanja pod uticajem sopstvene težine cevi i prisustva sloja koksa a pod uticajem temperature, opterećenja po poprečnom preseku cevi, i karakteristika materijala. Uopšte je poznato da se necementirani HP mikro tipovi puzaju manje od 45Ni/35Cr tipova. Međutim prihvatanje ugljenika (cementacija) dovodi do veće specifične zapremine novoformiranih karbida i usled toga unutrašnja opterećenja prouzrokuju porast stepena puzanja. U nekoliko studija je ispitivano izduženje usled puzanja cementiranih livenih legura koje su već bile u eksploataciji, kao i materijal cevi sa visokim sadržajem ugljenika. Istraživanja i proračuni su pokazali da je cementacija glavni činilac rasta longitudinalnog puzanja i usled toga skraćivanja životnog veka cevi [51].





*Slika 3.3.16. Izduženje usled puzanja rezultuje krivljenjem cevi zbog toga što su cevi stigle do kraja vođica i dodirnule pod peći<sup>(13)</sup>*

Posledice visokog stepena puzanja iziskuju zaustavljanje peći i skraćivanje cevi. Otkazi mogu nastati ako cevi nisu skraćene pre nego što dodirnu pod peći. Zmije su deformisane i iskrivljene, što rezultuje višim opterećenjem i stepenom puzanja. Takođe postoji i razlika u visini ložišta. Uopšte savremene višlje peći daleko bolje podnose izduženje usled puzanja nego starije niže peći.



*Slika 3.3.17. Izvađene oštećene cevi iz peći (slika 3.3.16) i nove cevi [71]*

Postojanost materijala na puzanje je kompleksan mehanizam u kojem je postojanost materijala na puzanje dovedena u vezu s cikličnim radom (kao što su procesi dekoksovanja, pokretanja / zaustavljanja i ispadi). Naprezanje unutar cevi je kompleksno, ali je takođe jasno da opterećenje usled pritiska koji vlada unutar cevi igra vodeću ulogu u akumulaciji oštećenja. Pošto unutrašnji pritisak malo varira duž cevi, oštećenja se koncentrišu u toplijim zonama.

<sup>13</sup> Kucora, I., Radovanovic, Lj., Pyrolysis furnace tube damaging and inspection, Acta Tehnica Corviniensis – Bulletin of Engineering, Faculty of Engineering Hunedoara, Romania, Tome VII [2014] – Fascicule 3 [July - September ], ISSN 2067 – 3809



### 3.3.9 Naugljeničenje – cementacija

Cementacija je unutrašnje obogaćivanje ugljenikom i stvaranje karbida koje nastaje uglavnom u industrijskim procesima gde se legure Cr-Ni-Fe koriste na visokim temperaturama ( $T > 800^{\circ}\text{C}$ ) u ugljenosnoj atmosferi. Stepent cementacije je povezan sa aktivnošću ugljenika u gasu (nastaje pri aktivnosti ugljenika kada je  $a_c < 1$ ) i u eksponencijalnom je porastu u zavisnosti od temperature [32, 44, 76].

Cementacija nije uobičajna pojava u većini procesa rafinacije zbog relativno niske temperature cevi većine rafinerijskih peći. Daleko je više zastupljena u petrohemijskoj industriji nego u naftnoj. Najčešće se javlja u radijacionim i ekranskim sekcijama etilenskih peći za krekovanje. Cementacija je ozbiljan problem kod ovih peći zbog visoke temperature cevi i do  $1150^{\circ}\text{C}$  i visokog ugljeničnog potencijala iz etana, propana, nafte i drugih ugljovodoničnih sirovina koje se krekuju. Međutim, takođe nastaje, iako manje frekventno i sa manje pravilnosti, u procesima reforminga i u ostalim procesima manipulacije ugljovodonika ili kod određenog odnosa  $\text{CO}/\text{CO}_2/\text{H}_2$  smeša gasova na visokim temperaturama.

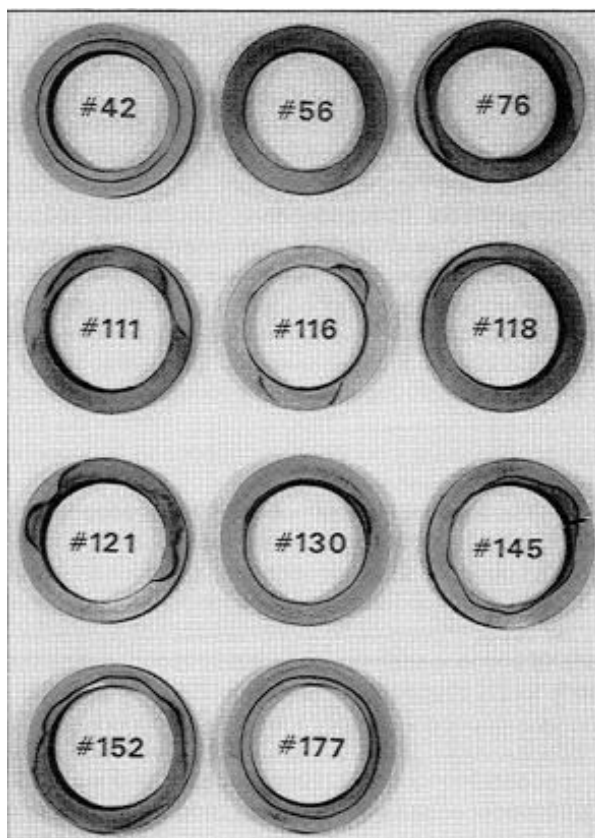
Istraživanja [84] objavljena 1981 dokazuju da je cementacija najčešći uzrok zamene cevi u etilenskim pećima. Većina peći iz tog doba je bila opremljena centrifugalno livenim cevima od HK-40, kovanim od tip-a 310 ili od legure 800/800H. Od sredine 80-tih godina korišćene su daleko otpornije centrifugalno livene cevi od modifikovanih HP legura (tabela 3.2.3), ali cementacija je nastavljala i dalje da se pojavljuje i bila je dalje glavni uzrok zamene cevi. Najverovatnije zbog teških uslova eksploatacije – uglavnom na visokim temperaturama. Neke fabrike su počele sa upotrebom visokolegiranih 35Cr-45Ni livenih legura, sa različitim dodacima u cilju suprotstavljanja teškim uslovima eksploatacije. Za peći sa malim ložištem, opremljene sa cevima malog prečnika ( $< 1.5$  in. unutrašnjeg prečnika) koje ne mogu biti livene, korišćene su kovane legure HK4M i HPM, legura 803 i 800H. Mada ove legure očigledno nemaju ekvivalentnu otpornost na cementaciju sa modifikovanim HP ili visokolegiranim Cr-Ni legurama, ali su potrebna eksploataciona istraživanja na osnovu kojeg bi se izvele komparacije. Ostale kovane legure (npr. 85H i HR-160, obe sa visokim sadržajem silicijuma) se uspešno koriste za borbu sa cementacijom zamenjivih blokova, retorta i drugih komponenata korišćenih u tretmanima cementacije. Međutim, njihova ograničena mogućnost izrade ograničava i korišćenje u naftnoj i petrohemijskoj industriji.

Taloženje ugljenika povećava zapreminu metala i rezultuje unutrašnje indukovanim naponima. Ono se širi sa unutrašnje strane uzrokujući pritisak na unutrašnji zid (cementirani deo materijala), dok zatezno opterećuje spoljašnji zid (necementirani deo materijala). Počinju da se pojavljuju pukotine između zrna na sredini zida cevi [32, 44].

Stepent cementacije etilenskih cevi za krekovanje od određene legure zavisi od vođenja procesa, tj. od režima eksploatacije. Kao što je i ranije već pomenuto, temperatura i ugljenični potencijal su primarni uticajni činioci na stepent njenog formiranja. Porastom razblaživanja pomoću pare postiže se redukcija stepena cementacije. Veličina dovoda je takođe faktor, sa manjim dotokom uopšteno govoreći više je agresivniji nego sa većim dotokom zbog njegovog većeg ugljeničnog potencijala. Određeni rukovaoci presulfidišu njihove cevne zmiije, dok drugi koriste

sirovinu sa krekabilnim sumporom ili dodatim. Na izgled, ovo redukuje katalitičke karakteristike površine cevi i redukuje formiranje koksa. Ovo u stvari redukuje frekvencu dekoksovanja za koju mnogi veruju da je najveći uzročnik cementacije.

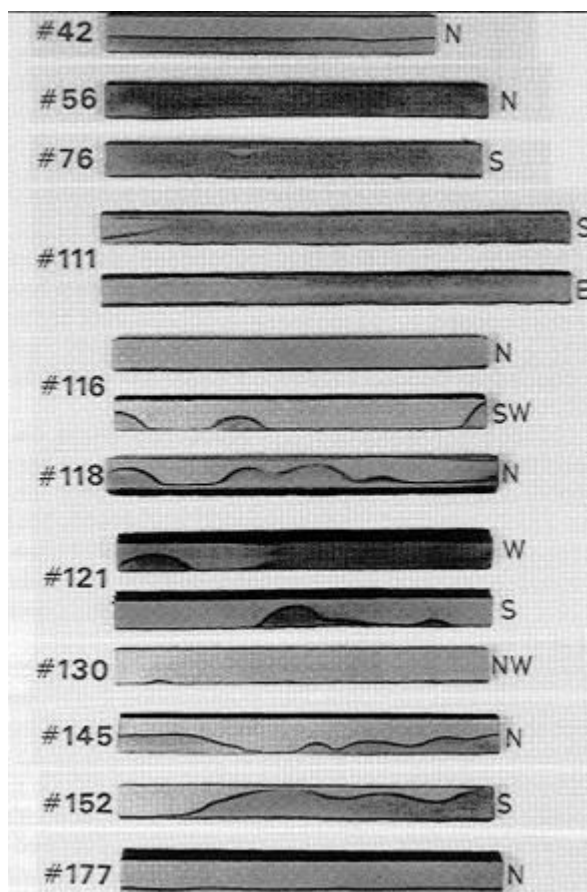
Način i pravilnost dekoksovanja pokazalo se da igra značajnu ulogu u stepenu cementacije. Dekoksovanje na visokim temperaturama sa malom količinom pare dovodi do ubrzane cementacije. Isto tako, dekoksovanje parom / vazduhom se pokazalo daleko štetnije nego samo s parom [44]. Odgovarajuća metalurgija se može koristiti za redukciju, ali retko totalno eliminiše cementaciju. Najznačajnija karakteristika uspešne legure jeste upravo njena sposobnost da formira i održi stabilan zaštitni oksidni film - sloj. Hrom – oksid se smatrao takvim filmom. Međutim, nije dovoljno stabilan na višim radnim temperaturama i nižim parcijalnim pritiscima kiseonika. Aluminijum i silicijum su mnogo bolji. Na žalost, dodavanje aluminijuma ili silicijuma termootpornoj leguri u količini potrebnoj da pruži potpunu zaštitu kao posledicu ima smanjenje čvrstoće, elastičnosti, i/ili zavarljivosti što je često neprihvatljivo. Legure pogodne za upotrebu su uopšte ograničene na oko 2% svakog legirajućeg elementa. Ovo je od koristi ali nije rešenje problema.



*Slika 3.3.18. Poprečni preseki cevi peći za krekovanje u fabrici etilena tipa HP-Mo izvađeni sa identičnih pozicija nakon nekoliko godina eksploatacije<sup>(14)</sup>*

<sup>14</sup> Tillack, D.J., Guthrie, J.E., Wrought and cast heat-resistant stainless and nickel alloys for the refining and petrochemical industries, Nickel Development Institute, Technical Series No. 10071, Toronto, 1998.

Jedan podmukao aspekt cementacije cevi u etilenskim pećima i nekoj drugoj opremi jeste upravo njena priroda nepredvidivosti i neujednačenosti. Razvijeni su neki modeli koji se baziraju na eksploatacionim iskustvima, i mogu se koristiti sa malo uspeha u predviđanju opšteg stepena cementacije. Nažalost, nijedan od poznatih modela nije u potpunosti tačan ili prihvatljiv. Primarni razlog je raznovrstan način nastajanja cementacije. Raznolikost je demonstrirana na slikama 3.3.18 i 3.3.19, koje prikazuju 11 reprezentativnih delova cevi uklonjenih iz peći nakon nekoliko godina eksploatacije pod identičnim uslovima [110]. Poprečni presek je napravljen na istom mestu na svakoj cevi i na istom kraju (slika 3.3.18).



Slika 3.3.19. Uzdužni preseki istih cevi kao na slici 3.3.18, manifestuju se velike varijacije u stepenu cementacije unutar veoma malih rastojanja i varijacije stepena cementacije od cevi do cevi<sup>(15)</sup>

Ovi primeri prikazuju da stepen cementacije ne varira samo po prečniku cevi, nego već i po dužini cevi, tako da samo temperatura nije jedini determinišući faktor. Pre nekoliko godina stanje površine je identifikovano kao glavni faktor, ali nije ni to jedini uticajni efektivni faktor pošto su ove cevi inicijalno bile identične i podlegale su istim uslovima eksploatacije tokom dugog niza godina. Ova nejednakost takođe predstavlja problem u interpretaciji rezultata merenja stepena cementacije.

<sup>15</sup> Tillack, D.J., Guthrie, J.E., Wrought and cast heat-resistant stainless and nickel alloys for the refining and petrochemical industries, Nickel Development Institute, Technical Series No. 10071, Toronto, 1998.

Cementacija uzrokuje magnetizaciju kovanih i livenih termootpornih legura koje inače nisu magnetične. Rezultujuća magnetska permeabilnost je korišćena tokom dugog niza godina da se proceni nastali stepen cementacije. Korišćena merna oprema se kretala od magneta koji su se držali u ruci, pa do tehnološki sofisticiranih mernih instrumenata sa višefrekventnim vrtložnim strujama, koji se danas koriste. Dok su kasniji mogli biti od pomoći u determinisanju ne samo stepena cementacije već takođe i njenog modela, međutim mora se biti obazriv u interpretaciji rezultata zbog neujednačenosti – nepravilnosti, pomenutih ranije. Postoje i druge koristi iz ovakvih istraživanja radijacionih zmiya peći. Model cementacije može otkriti neujednačen obrazac sagorevanja koji bi na drugi način možda ostao nezapažen. Oni takođe mogu biti od koristi za implementaciju selektivnih metalurgijskih alternativa za cevne legure. Na primer kod cevni snopova (zmiya) ulazne cevi mogu biti napravljene od jeftinijeg materijala, modifikovane HP legure sa manjim sadržajem nikla, a izlazne cevi od skupljeg materijala, 35Cr-45Ni legura.

Cementacija treba da bude zanemarljivo mala na temperaturama ispod 1000°C za uobičajne materijale sa 25% Cr. Oni formiraju zaštitni sloj sastavljen od spoljašnjeg spinelnog sloja (Mn, Cr – oksida) i od unutrašnjeg hromiranog sloja ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) koji su skoro nepropusni za difuziju ugljenika iz atmosfere, pošto je rastvorljivost ugljenika u njihovim oksidima ekstremno mala. Međutim postoji nekoliko mehanizama koji dovode do oštećenja oksidnih naslaga:

- Isuviše velika difuziona distanca kroz dehromirane zone: periodičan proces rasta hrom-oksida, dok spalacija rezultuje u postepenom osiromašenju Cr u podpovršinskom regionu legure. Kritična debljina zone lišene Cr dostiže u radu oko 200  $\mu\text{m}$  [1].
- Konverzija Cr – oksida u neprotektivnu karbidnu fazu nastaje na visokim temperaturama iznad 1050 °C a visoka aktivnost ugljenika pri  $a_c > 1$ . Površinski karbidi ne obezbeđuju dovoljnu zaštitu protiv unutrašnje cementacije [1, 25].
- Strukturalni nedostaci u zaštitnom oksidnom sloju (pore, pukotine, itd.) npr. pukotine nastaju kao rezultat termičkih ciklusa [92, 114].

Otpornost materijala prema cementaciji je dobivena sadržajem Ni, kao i prisustvom Si, koji formira silikatne podnaslage. Zbog toga savremeni materijali imaju visok sadržaj Ni (iznad 40%) i Cr (minimum 25 ÷ 30%) kao i Si (1.5 ÷ 2.5%). Najsavremeniji materijali imaju 45Ni/35Cr (kao što je ET45 Micro) sa izvesnim dodatkom legura (retkih zemljanih elemenata) u cilju poboljšanja prijanjanja oksidne naslage.

Kao i u slučaju cevi cementacija se takođe javlja kod fittinga. Uopšte takva cementacija nije limitirajuća za životni vek fittinga zbog toga što cevi u radijacionoj sekciji pre otkazu nego fitinzi. A to je zbog velike debljine fittinga. Kolena i izlazni fitinzi (Y – račve, tetra fitinzi, flanšne) debelih zidova mogu stradati od cementacije i termičkog zamora. Cementirana zona je krta i već ispucala na malom opterećenju.

Mikrostruktura ovih centrifugalno livenih cevni materijala je sastavljena od dendritskih zrna orijentisanih u smeru prečnika cevi, i uobičajno prisutne protektivne oksidne naslage na spoljašnjosti i unutrašnjosti cevi. Naslage hroma i silicijuma se formiraju usled hemijskog sastava cevi i na dovoljno velikom parcijalnom pritisku kiseonika pri uslovima eksploatacije, i aluminijuma koji se može formirati kod drugih

visokotemperaturnih legura za iste namene, za koje se zna da sprečavaju penetraciju ugljenika u materijal. Međutim lokalizovana oštećenja ovih protektivnih nanosa mogu nastati usled različitih faktora (temperaturne varijacije, puzanje) tako da se onda omogućava prodor ugljenika i kiseonika u materijal. Veoma surovi uslovi eksploatacije se opisuju kao uslovi u kojima postoji visoka aktivnost ugljenika, bliska sjedinjavanju kao i mali parcijalni pritisak kiseonika koji je još uvek dovoljan da oksidiše elemente kao što su Cr i Si.

Cementacija se javlja kao interna reakcija usled visoke difuzivnosti ugljenika. Konsekventno, karbidi u livenim strukturama inicijalno su podložni morfološkim i hemijskim promenama, asimilaciji i ukрупnjavanju zrna koje je prvo praćeno transformacijom faza. Transformacija karbida u leguri HK40 tokom eksploatacije na visokim temperaturama se kreće od postojeće  $M_{23}C_6$  do  $M_7C_3$ , do ovih saznanja su došli mnogi autori [1].

Dokazano je da  $M_{23}C_6$  eutektički karbidi novog materijala jako ukрупnjavaju usled prodora ugljenika tokom eksploatacije na visokim temperaturama, dok se hrom istiskuje kao rezultat oksidacije površine cevi, ili ekvivalentno na površini prskotine. Logično je pretpostaviti da se oksidacija na površini materijala i asimilacija / ukрупnjavanje zrna  $M_{23}C_6$  eutektičkog karbida novog materijala dešava više ili manje istovremeno između lokalizovanih oštećenja i izlećenja ovih naslaga, mada na daleko manjim brzinama koje mogu imati ako nisu prisutne kontinualno unutrašnje Cr i Si naslage. Međutim u sledećoj fazi karbidi odmah ispod površine se rastvaraju da bi popunili prazninu nastalu odlaskom hroma iz matrice usled oksidacije na površini, tako da ovo dovodi do karbidom osiromašenih zona u podpovršinskom sloju.

Opadajući odnos Cr/C će učiniti potrebnim transformaciju  $M_{23}C_6$  karbida, koji imaju veće vrednosti odnosa Cr/C, u  $M_7C_3$ . U blizini prskotine pojavljuje se ubrzano povećanje zrna karbida i izvodi se transformacija u  $M_7C_3$  dovodenjem ugljenika u njegovu blizinu.

### 3.3.10 Oksidacija

Oksidacija je najčešći oblik visoko-temperaturne korozije. Međutim, oksidacija nije uvek štetna. U stvari, većina nerđajućih i termootpornih legura se oslanja na formiranje oksidnog filma koji obezbeđuje korozionu postojanost. Hrom - oksid se najčešće sreće u takvim slojevima filma. Kako se temperatura povećava, stepen oksidacije se takođe povećava i postaje škodljiv. Stepen oksidacije za iste legure biće nešto niži u sredini sa produktima sagorevanja koji sadrže manji procenat sumpora [110].

Cevi se izlažu ekstremno surovim uslovima eksploatacije u pogledu temperature i režima rada. Jedinjenja ugljovodonika pomešana sa parom prolaze kroz cevi koje se greju sa spoljne strane, i pri tome se rastavljaju stvarajući oksidacionu i cementacionu sredinu, a takođe dolazi i do pojave dekarbidizovanih zona u podpovršinskom sloju. Pod ovakvim uslovima rada cevi trpe promene u sastavu pošto dolazi do reakcije sa najmanje dva elementa. Ugljenik i kiseonik osiromašuju konstitutivne elemente usled oksidacije i cementacije. Pod visokom predstojećom aktivnošću ugljenika, unutar cevnog materijala parcijalni pritisak kiseonika je očigledno dovoljan za formiranje

sukcesivnog spinela, naslaga hroma i silicijuma. Spoljni zidovi cevi etilenskih peći su izloženi nižem potencijalu ugljenika ali zato većem potencijalu kiseonika omogućujući formiranje zaštitnih oksidnih naslaga. Lokalno pregrevanje usled naslaga ugljenika može podići temperaturu iznad 1050 °C, gde istovremeno smanjenje u potencijalu kiseonika dovodi do konverzije hroma u hrom-karbid.

Ispod oksidnih naslaga nastalih na unutrašnjoj površini zapaža se osiromašena zona karbida određene debljine. Treba napomenuti da se sadržaj silicijuma, izuzev unutar osiromašenih zona karbida, povećava iznad nivoa koji je prisutan u novom materijalu. Ovo se može objasniti prodorom silicijuma unutar matrice u toku ukрупnjavanja karbida. Istraživanja su otkrila da segregacija silicijuma tokom ukрупnjavanja karbida prethodi (tj. nagoveštava) širenju pukotina. Sadržaj Ni i Fe u karbidom osiromašenim zonama pojavljuje se u relativnom porastu prema ostalim elementima, dok se Cr, Si i Mn smanjuju usled oksidacije.

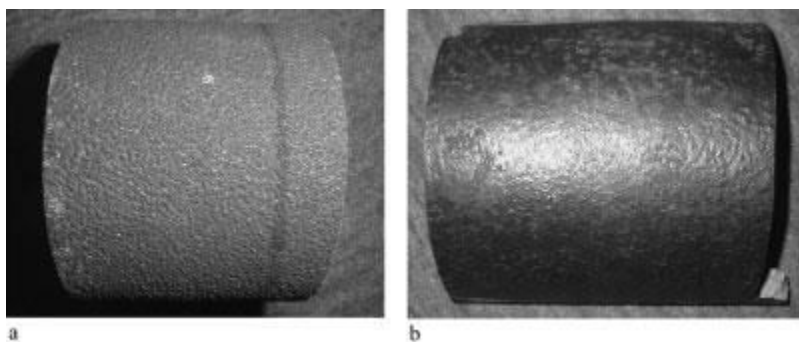
Hemijska analiza u blizini unutrašnje i spoljašnje površine pokazuje da slojevi SiO<sub>2</sub> i Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sadrže neznatne količine ostalih legirajućih elemenata. Ekskluzivno formiranje jednog oksida u ovim slojevima može se objasniti terminom efekta segregacije tokom oksidacije. Na primer, silicijum ima najveći afinitet prema kiseoniku između prisutnih elemenata u legirajućoj matrici. Međutim koncentracija silicijuma, i njegova konsekvantna termodinamička aktivnost je mala, tako da on sam od sebe ne može formirati prvi oksidni sloj. Prva unutrašnja oksidna naslaga se inicijalno formira od strane hroma, koji ima manji afinitet prema kiseoniku, ali veću aktivnost u poređenju sa silicijumom. Po započinjanju oksidacije silicijum se izbacuje iz matrice zbog njegove male rastvorljivosti u naslagama hroma, tako da ovo povećava koncentraciju silicijuma ispod ove naslage. Istovremeno koncentracija hroma u rastvoru se smanjuje, a eventualno formiranje naslaga SiO<sub>2</sub> postaje moguće pošto se aktivnost silicijuma povećava relativno prema hromu. Usled toga nastaje formiranje SiO<sub>2</sub> neposredno ispod Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> gde su ove lokalne razlike koncentracija najizraženije.

### 3.3.11 Nitracija

Iznad 1100°C nitracija odnosno formiranje nitrída s unutrašnje strane nastaje sa spoljašnjeg prečnika. Azot penetrira kroz oksid i reaguje sa hromom taložeći nitrída. Taloženje u većini slučajeva započinje sa konverzijom karbida u karbonitrída M<sub>2</sub>(C, N), M(C, N) i M<sub>6</sub>(C, N) koji rastu s prihvatanjem hroma i azota [110].

Takođe nedostatak kiseonika u loživom gasu igra značajnu ulogu. Nedostatak (mnogo puta prouzrokovan zbog loše podešenog brenera tako da onda plamen liže cev) kiseonika može rezultovati ozbiljnim gubitkom debljine zida cevi naizmeničnom oksidacijom i nitracijom. Nitrída tada prouzrokuju rasprskavanje oksida. Kao rezultat ovoga pojavljuju se debeli slojevi oksida koji se mogu naći na podu peći (10 ÷ 20 cm). Ponekad se ovo naziva rasipanje oksida.

Usled nitracije gruba livena spoljašnja površina cevi nestaje i površina postaje glatka i sjajna (sl.3.3.20 a. i b.). Promene u karakteristikama materijala koje su prouzrokovane nitracijom i cementacijom su veoma slične. U oba slučaja nastaje taloženje na unutrašnjosti, a matrica je više ili manje osiromašena hromom.



Slika 3.3.20. Primer pojave nitracije cevi<sup>16)</sup>  
a.) gruba površina nove cevi, i b.) glatka površina karakteristična za nitraciju

### 3.3.12 Dehromizacija

Isparavanje hroma može postati problem za formiranje hroma na površinama sa visokom temperaturom  $>1050^{\circ}\text{C}$  i visokim pritiskom kiseonika, kao i u loživom gasu peći za pirolizu. Veliko osiromašenje hroma u podpovršinskom sloju legure može biti takođe i posledica formiranja širokih zona bez karbida koje preovladavaju u leguri. U ovom sloju nema taloženja karbida zbog mogućeg ojačanja legure a „zvuk debljine zida” legure je redukovan.

---

<sup>16)</sup> Kucora, I., Adamović, Ž., Radovanović, Lj., Otkazi cevi etilenskih peći, Energetske tehnologije, 2013., Vol.10. ,No 1., str. 47-53, ISSN 1451 9070

### 3.4 Tehnička dijagnostika cevnih snopova peći za pirolizu benzina

Pod pojmom tehničke dijagnostike treba podrazumevati sve aktivnosti koje se sprovode u cilju ocene trenutnog tehničkog stanja sistema (sa rastavljanjem i bez rastavljanja) zbog preduzimanja planiranih aktivnosti održavanja ili davanja prognoze tehničkog stanja sistema u budućnosti. Dijagnostikom se proverava ispravnost, radna sposobnost, funkcionalnost i istražuje otkaz (mesto, oblik i uzrok otkaza). Dijagnoza je, znači, procedura ili skup procedura kojom se određuju otkaz ili otkazi koji odgovaraju simptomu ili skupu simptoma [2]. U ovom poglavlju će biti predstavljeni osnovni postupci tehničke dijagnostike za procenu stanja cevnih snopova peći za pirolizu benzina.

Kada je oprema duži period vremena u eksploataciji materijal je izložen starenju, i njegove karakteristike se postepeno menjaju. Jedna od bitnijih konsekvenci starenja materijala je pogoršanje stanja. Degradacija materijala nastaje zbog dugotrajnog izlaganja visokim temperaturama, i korozivnoj sredini, u kombinaciji sa opterećenjem. Kod termootpornih materijala kao što je i HK40 pojavljuje se krtost usled termičke aktivnosti. Tako da je kontinualno praćenje degradacije karakteristika materijala od suštinskog značaja za procenu bezbednosti ili preostalog životnog veka cevi peći. Međutim korišćenje konvencionalnih destruktivnih metoda za procenu karakteristike materijala je ograničeno zbog uzimanja uzorka iz opreme, jel nakon vađenja uzorka sledi sanacija, snimanje varova i testovi na propusnost. Rukovodioci obično izbegavaju otvaranje „bespotrebnih poslova”.

Postoji nekoliko metoda za procenjivanje i otkrivanje oštećenja kod cevi peći. Metode su klasifikovane na destruktivne i nedestruktivne, a odnose se na procenu oštećenja usled puzanja, kao i na naugljeničenje materijala koje leži u osnovi puzanja.

Kao što je već poznato, početno oštećenje puzanjem javlja se u formi izolovanih mikro šupljina. Tokom vremena mikro šupljine se povećavaju i stvaraju mikropukotine. Bez sumnji metalografske replike su najčešći alat za otkrivanje šupljina i prskotina mikroskopskih veličina. U skorašnje vreme naglasak je stavljen na moderne ultrazvučne tehnike kao što su TOFD (Time Of Flight Diffraction) ili Phased Array koje imaju interesantne karakteristike u pogledu otkrivanja oštećenja usled puzanja i njenog karakterisanja.

Od velikog su značaja i neke tehnike akustične emisije, međutim one imaju ograničenja u pogledu otkrivanja minimalnog oštećenja. Tipičan program pregleda komponenti izloženih puzanju se može podeliti u tri dela:

1. Standardni pregledi podeljeni na otkrivanje površinskih i volumetrijskih oštećenja (vizuelna ispitivanja, ispitivanje penetrantima, ultrazvučna ispitivanja, i ispitivanja X zracima, itd.),
2. Proširena ispitivanja za otkrivanje i karakterisanje mikro oštećenja usled puzanja (metalografska ispitivanja, naprednije ultrazvučne tehnike, akustična emisija, itd.),
3. Dodatna ispitivanja sa specifičnim NDT alatima koja podržavaju procenu preostalog životnog veka (merenje opterećenja, procena temperature, itd.).



### 3.4.1 Destruktivne metode

Ovo je najrigoroznija metoda koja i najviše košta, pošto je potrebno ukloniti cev iz peći i nakon toga izvaditi uzorak. Troškovi za ovakvu vrstu ispitivanja su neprihvatljivi a reprezentativni uzorak zahteva 10%, a nakon svega toga se pojavljuju komplikacije oko donošenja odluke na kom mestu izvaditi uzorak, da li sa gornjeg dela cevi, ili srednjeg ili donjeg. Neki uklanjaju cevi iz peći prema principu slučajnog uzorka da bi ocenili njihovo metalografsko stanje. Neke cevi izgledaju kao da nisu oštećene čak i nakon projektovanog eksploatacionog veka, dok neke cevi izgledaju dosta oštećeno čak i pre isteka projektovanog eksploatacionog veka.

Nedostaci uklanjanja cevi iz peći radi ispitivanja na osnovu uzorka se odnose na: prerano rashodovanje još upotrebljive cevi, kasno uklanjanje neupotrebljive cevi utiče na period između dva remonta i troškove. Prednosti uklanjanja cevi iz peći radi ispitivanja na osnovu uzorka su u tome da se utvrđuje pravo metalurško stanje – ali samo za uklonjenu cev.

Kada se cev peći izvadi zbog inspekcije, vrši se isecanje malog dela koji se zatim polira i obeležava. Nakon toga se vrši ispitivanje poroznosti i mikropukotina. Na primer, ako se otkriju porozna mesta koja se aproksimativno nalaze na udaljenosti od 1/3 od unutrašnjeg zida cevi govori nam da su ubrzo na pomolu mikropukotine. Mikropukotine koje nastaju teže da se dalje šire po unutrašnjosti, tako da polako dopiru i do spoljne površine prouzrokujući curenja.<sup>17</sup>

#### 3.4.1.1 Metalografska ispitivanja

Metalografija je deo nauke o metalima i legurama koja se bavi vezama između dijagrama stanja, struktura i osobina metala i legura. Njen je zadatak da pri određenom hemijskom sastavu, iz pregleda makro i mikrostrukture, unapred proceni svojstva i ponašanje metala ili legure i da ukaže na najpovoljniju strukturu za proces prerade ili primene. Metalografska ispitivanja se najčešće dopunjuju ostalim vidovima ispitivanja sa razaranjem i bez razaranja, čime se dobija kompletna slika o stanju metala i legura. U novije vreme se koristi za procenu preostalog životnog veka.

Za metalografska ispitivanja potreban je odgovarajući uzorak materijala koji se ispituje, tzv. *metalografski šlif*. On se koristi za određivanje strukturne građe koja je osnov poznavanja svojstava i pokazatelj toka nekog tehnološkog procesa obrade. Makroskopska i mikroskopska metalografska ispitivanja izvode se na nagriženim ili na nenagriženim šlifovima, zavisno od zahteva, a u posebnim slučajevima uz foto snimanje radi kompletiranja dokumentacije. Radi izrade što kvalitetnijeg metalografskog uzorka – šlifa treba obavezno primeniti sledeće faze u pripremi:

---

<sup>17</sup> Kucora, I., Radovanovic, Lj., Pekez, J., *Tehnička dijagnostika cijevnih snopova peći za pirolizu benzina-destruktivne metode*, 23 Scientific meeting, Organisation and technology of maintenance, Proceeding, Požega, 24-25 travnja, 2014, Društvo održavatelja Osijek, Elektrotehnički fakultet Osijek, HGK Županijska komora Požega, str.95-103 ISBN 978-953-6032-84-6

**Isecanje uzorka.** Posle vizuelnog posmatranja delova i materijala koji se ispituju odabira se mesto isecanja uzorka za izradu mikrošlifa, zavisno od cilja ispitivanja. Pri sečenju uzorka (mehanički i termički metod) potrebno je posebno obratiti pažnju da ne dođe do strukturnih promena, pogotovu pri pripremi uzoraka od veoma zakaljivih materijala (čelika sa povećanim sadržajem ugljenika i tsl.). Uzorci od veoma tvrdih i krtih materijala uzimaju se često odlamanjem udarcima čekića. Metalografski šlif treba da ima ravne i glatke površine, pri čemu visina šlifa treba da bude manja od širine i dužine. Preporučuje se da se ivice šlifa zaoble, da ne bi pri daljoj pripremi oštetile sredstva za brušenje i poliranje, brusni papir ili filc.

**Brušenje uzorka.** Radi dalje pripreme isečenog uzorka, a u cilju dobijanja čiste i ravne površine, neophodno je izvesti brušenje. Najpre se izvodi grubo brušenje (turpijama ili na brusilicama), a nadalje pomoću brusnih papira do željene hrapavosti. I pri brušenju treba voditi računa o zagrevanju uzorka i obezbediti potrebno hlađenje, naročito pri mašinskom brušenju kada se uzorak može zagrejati do visokih temperatura. Uzorak ne treba jako pritiskati, jer se time više zagreva i površinski plastično deformiše što može dovesti do kvazistrukture.

Šlifovi se bruse laganim prevlačenjem preko brusnog papira koji se često kvasi vodom. Brusni papir se postavlja na staklenu ili metalnu podlogu. Uzorak se brusi počev od najgrubljeg brusnog papira (oznaka 60) do najfinijeg (500), najpre u jednom pravcu, napred nazad, sve dok ne ostanu samo tragovi brušenja. Uzorak se zatim očisti (vatom ili čistom krpom ili opere vodom) i dalje brusi na finijoj brusnoj hartiji i u pravcu upravnom na prethodni. Po završenom brušenju u većini slučajeva uzorci su pripremljeni za makro ispitivanje.

**Poliranje uzorka.** Ima za cilj da sa površine uzorka ukloni tragove koji su ostali posle brušenja i da površini da ogledalasti metalni sjaj. Može se izvesti *mehaničkim* ili *elektrolitičkim* postupkom.

Mehaničko poliranje se izvodi na uređaju koji se sastoji iz jednog ili više obrtnih diskova presvučenih filcom. Kao sredstvo za poliranje koristi se suspenzija glinice ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ili magnezijum oksida ( $\text{MgO}$ ). Ovo se sredstvo priprema tako da se glinica samelje u mlinovima sa kuglicama, a posle toga proseje preko najfinijih sita. Deo glinice se potapa u čistu destilisanu vodu (npr. 50-150 g glinice na jedan litar vode), dobro promućka i ostavi da se taloži 2 do 24 sata. Posle taloženja, talog se odstranjuje, a suspenzija koristi. Za specijalne slučajeve, za poliranje sinterovanih tvrdih metala, preporučuje se dijamantski prah u obliku paste. Sredstvom za poliranje kvase se diskovi i uzorak polira uz stalno kretanje po disku čime se mehanički otkidaju grube neravnine na uzorku. Vreme poliranja je 5-10 minuta. Posle završenog poliranja uzorak se opere u toploj i hladnoj vodi, zatim alkoholom i osuši u struji toplog vazduha.

**Nagrizanje uzoraka.** Ima za cilj bolje uočavanje mikrostrukture. Kao sredstva za nagrizanje primenjuju se odgovarajući *hemijski reaktivi* i različita hemijska postojanost pojedinih strukturnih faza. Pri nagrizanju metalografskog uzorka u cilju određivanja veličine zrna nagrizaju se isključivo granice zrna, jer su na granicama prisutne nečistoće koje su hemijski manje otporne od zrna, pa se i bolje rastvaraju i razdvajaju zrna, stvarajući između njih udubljenja. Pripremljeni uzorak se posle nagrizanja posmatra na metalografskom mikroskopu pri manjim i većim uvećanjima. Kao sredstva za nagrizanje koriste se najčešće rastvori kiselina, baza i soli i to u slabim vodenim rastvorima (npr. 2-4  $\text{cm}^3$  azotne kiseline u 100  $\text{cm}^3$  etil alkohola – sredstvo poznato i kao „nital” – za uočavanje feritne, perlitne, trustitne, bejnitne i martenzitne strukture; podesan je i za otkrivanje granica zrna).

U radu su uzorci za metalografska ispitivanja isečeni iz cevi uz pomoć testere velike brzine a ispitani su u primljenom stanju. Kalling-ov reagent je korišćen za svaki od uzoraka za svetlosni mikroskop. Pripremljene su i tanke folije za elektronsku mikroskopiju uz pomoć elektrolita 5% smeše perhlorične kiseline i sirćetne kiseline na 40 V, praćene jonskim nagrizanjem nekoliko sati.

U praksi se sva metalografska ispitivanja obavljaju pomoću dve grupe metoda:

- **Makroskopska**, koja obuhvataju vizuelnu kontrolu i uvećanja do 20 puta , i
- **Mikroskopska ispitivanja**, sa povećanjem od  $20 \div 2000$  puta (optički mikroskopi) i sa povećanjem više desetina hiljada puta (elektronski mikroskopi), primenjuju se za detaljniju tj. potpuniju analizu unutrašnje građe.

**Makroskopska ispitivanja** često prethode mikroskopskim ispitivanjima i u nizu slučajeva daju definitivne zaključke o građi metala i legura i greškama u njima. Ispitivanje se sastoji u vizuelnom pregledu uzoraka ili pomoću lupe sa manjim povećanjem (do 20×). Makrostruktura može biti ispitivana neposredno na površini komada ili detalja, na prelomu ili izrezanom uzorku posle odmašćivanja, brušenja i nagrizanja površine određenim reaktivima.

**Mikroskopska ispitivanja** omogućavaju da se odredi tip mikrostrukture, udeo pojedinih struktura (mikrokonstituenata), veličina zrna, njihova orijentacija, raspodela i veličina uključaka i tsl. Ispituju se kako jednofazni tako i višefazni metali i legure. Ovim ispitivanjem mogu se odrediti i greške koje narušavaju homogenost strukture nastale pri različitim tehnološkim procesima (livenje, termička obrada, kovanje, hemijsko-termička obrada i drugi vidovi prerade metala i legura). Mikrostruktura se najčešće ocenjuje na nagriženim uzorcima i to pomoću optičkih (20 do 2000×) i u novije vreme pomoću elektronskih mikroskopa (50 do 1 500 000×).

Princip rada optičkih mikroskopa zasniva se na usmeravanju i propuštanju svetlosnog zraka kroz sistem sočiva, prizmi, filtera, propusnih ogledala i odbijanja zraka od pripremljene površine uzorka ka objektivu i okularu, gde se uočava uvećana slika strukture. Pored posmatranja mikrostrukture pojedinih zona mikrošlifa na optičkim mikroskopima moguće je i foto snimanje mikrostrukture.



Slika 3.4.1. Skenirajući elektronski mikroskop (SEM)

Elektronski mikroskopi se koriste za dobijanje uvećane slike objekta i njima se mogu posmatrati objekti čija je veličina daleko ispod granice vidljivosti optičkih mikroskopa. Skenirajući elektronski mikroskop (SEM) za dobijanje informacija o površini uzorka koristi reflektovane elektrone. Pomoću SEM mikroskopa (sl.3.4.1) mogu se dobiti informacije o topografiji, morfologiji, rasporedu kristala unutar uzorka i za dobijanje hemijskog sastava uzorka.

Transmisioni elektronski mikroskop (TEM) koristi propuštene elektrone za dobijanje informacije unutar samog uzorka. Koristi se za ispitivanje morfologije, rasporeda kristala unutar uzorka, njihove orijentacije i stepena uredenosti (sl.3.4.2).



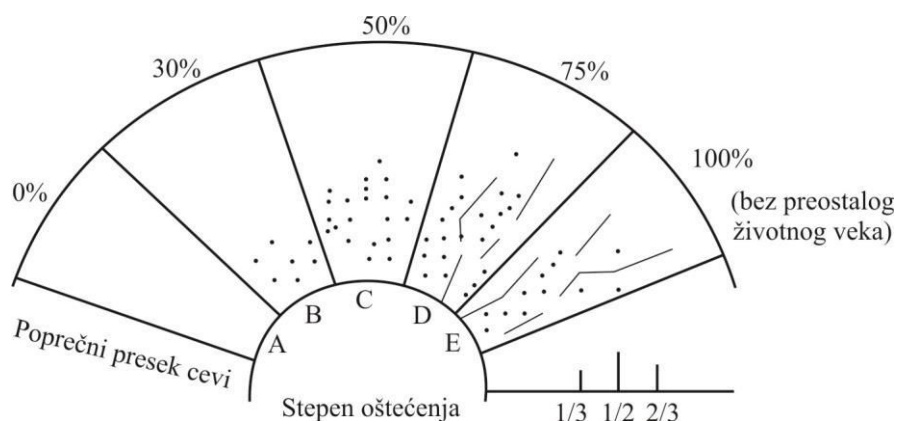
Slika 3.4.2. Transmisioni elektronski mikroskop (TEM)

Određivanje veličine metalnog zrna izvodi se merenjem pojedinih zrna na mikroskopu. Najčešće korišćene metode su:

- metoda poređenja veličine zrna uzorka sa slikama etalona, i
- metoda brojanja zrna:
  - obuhvaćenih površinom, i
  - po liniji.

Na slici 3.4.3 prikazani su oblici oštećenja puzanjem i način njihove klasifikacije [47]. Pet nivoa oštećenja se može izdvojiti na osnovu klasifikacije predložene od strane Neubauer & Wedel [89] za kotlove, gde su oštećenja razvrstana u četiri kategorije, počev od formiranja izolovanih šupljina pa do stvaranja mikropukotina. Klasifikaciju koju su uradili Le May i sar. [47] podrazumeva pet nivoa. A – nivo: nema znakova oštećenja, B – nivo: primetne su izolovane šupljine, C – nivo: postoje orijentisane šupljine, D – nivo: postoje mikropukotine, E – nivo: velike mikropukotine. U ovoj metalografskoj proceduri oštećenja su procenjena na osnovu izvađene cevi iz peći u remontu, i odabrana je kao reprezentativna za sve cevi. Oštećenja su otkrivena kroz pažljivo (i

ponovljeno) poliranje i nagrizanje delova cevi da bi se istakla oštećenja koja predstavljaju šupljine i mikropukotine kao što su to predstavili Silveira & Le May [46]. Veoma je bitno da se procedura ponovljenog poliranja – nagrizanja sledi iako se ne otkriju šupljine značajnije veličine sve do vremena kada nastaje separacija duž granica i sve dok su prisutne mikropukotine. Inicijalni mehanizam formiranja šupljina će biti kroz dekoheziju na međupovršini taloga – naslaga [105], tako da se otvaraju male praznine kroz ponovljenu primenu ciklusa poliranja – nagrizanja [46, 105].



Slika 3.4.3. Klasifikacija oštećenja u zidovima cevi peći - Le May i sar.[47]

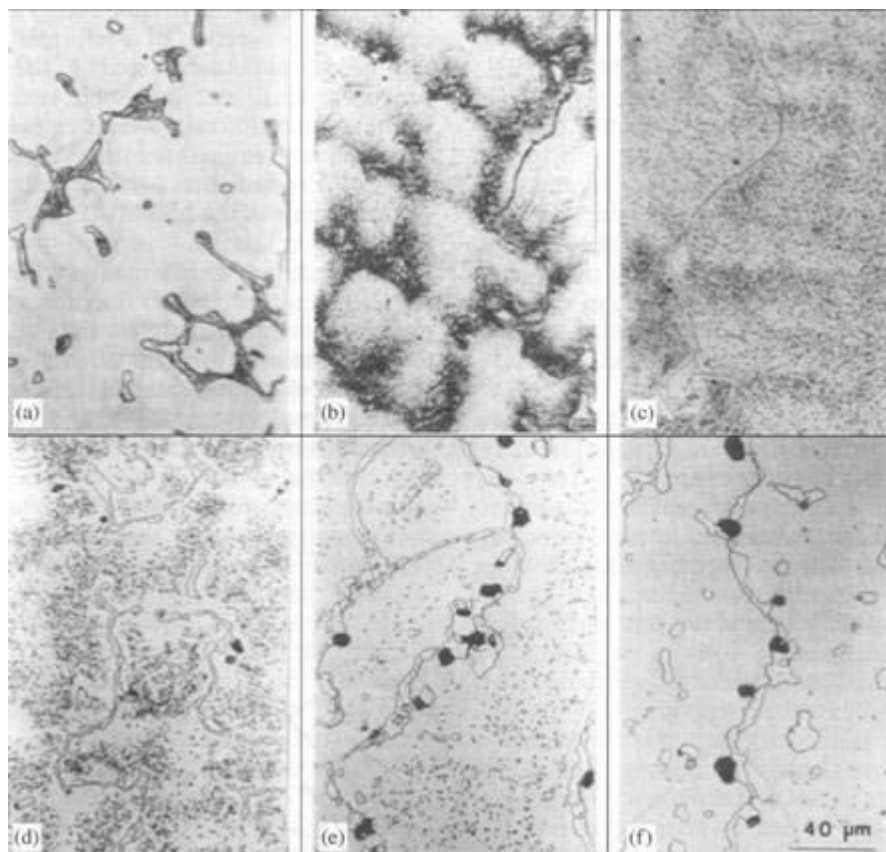
Šupljine koje su se pojavile na cevima imaju oblik prstena i na početku su poredane na dendritskim ivicama aproksimativno na  $1/3$  od unutrašnje površine zida cevi. Njihov poredak prati normalu na glavni napon istezanja. Mikropukotine koje su se pojavile nastoje da se šire i mogu dovesti do curenja. Iskustva pokazuju da je proces dosta spor tako da se efektivna prognoza očekivanog preostalog životnog veka može izvesti jednostavnom kvalitativnom metalografijom poprečnog preseka na uzorku izvađene cevi.

Iskustva pokazuju da postoje dva moguća načina za poredak šupljina. U centrifugalno livenom materijalu kada je slabija veza ista, poredak i prskotine koje ih slede su usmerene u longitudinalnu ravan cevi. Kada je slabija veza zavareni spoj, poredak se može lokalizovati u transverzalnoj ravni na osu cevi i čak se može naći u centru zavara ili unutar toplije zone. Prema tome, različiti stepeni puzanja se mogu pripisati različitim delovima cevi, na osnovu raspodele šupljina i prskotina, vodeći se jednostavnim kriterijumom procena zasnovanim na kvalitativnim posmatranjima.

Veoma bitna stvar je da se širenje oštećenja puzanjem veoma retko dešava po celom poprečnom preseku cevi, tako da je to potrebno imati u vidu prilikom uzimanja uzorka za metalografska ispitivanja. Potrebno je uzeti u razmatranje ceo presek a ne samo određene segmente.

Cevi u pećima su izložene starenju na visokim temperaturama a takođe i promenama mehaničkih karakteristika. Na primer, rastegljivost cevi na sobnoj temperaturi je manja za oko 5% nego na temperaturama između  $600 \div 700$  °C. Takve karakteristike su normalne, a i geometrija peći je takva da ograničava rastegljivost što ne odgovara pogodnosti upotrebe cevi. Tako da se sam proces starenja ne uzima u obzir kao proces oštećenja cevi. Međutim, promene u mikrostrukturi materijala su koristan indikator stvarne temperature zida cevi. Može se proceniti metalografskim metodama na licu mesta ili konvencionalnim destruktivnim metalografskim tehnikama koje se primenjuju na poprečni presek žrtvovane cevi.

Mikrostrukturalne promene koje nastaju su rezultat dugovremenog izlaganja povišenim temperaturama i predstavljaju primarne promene u karbidnoj morfologiji. Vreme ekspozicije takođe ima uticaja na mikrostrukturu, ali je temperatura ipak najuticajni faktor, tako da se mikrostrukturalne promene mogu pripisati temperaturnim uticajima. Mikrostrukturalne karakteristike koje se odnose na procenu eksploatacione temperature su prikazane na slici 3.4.4, a njihovo nastajanje je detaljno opisano u sledećem paragrafu.



Slika 3.4.4. Prikaz mikrostrukture materijala HK-40 nakon perioda upotrebe od 6900 h, uzorci su uzeti transverzalno prema osi (bliže unutrašnjem zidu cevi), ispolirani su mehanički i potopljeni radi nagrizanja u zasićenom rastvoru  $\text{CuCl}_2$ . (Tamna udubljenja na slici (e i f) predstavljaju oštećenja izazvana puzanjem usled visokih temperatura.) -

Le May i sar. [47]

- a.) Stanje I – ispod  $600\text{ }^\circ\text{C}$
- b.) Stanje II –  $600 \div 700\text{ }^\circ\text{C}$
- c.) Stanje III –  $700 \div 800\text{ }^\circ\text{C}$
- d.) Stanje IV –  $800 \div 900\text{ }^\circ\text{C}$
- e.) Stanje V –  $900 \div 1000\text{ }^\circ\text{C}$
- f.) Stanje VI – iznad  $1000\text{ }^\circ\text{C}$

Mikrostrukturalne promene ispod  $600\text{ }^\circ\text{C}$  se ne mogu otkriti svetlosnim mikroskopom, i ovo je obeleženo kao Stanje I starenja materijala. Od  $600$  do  $700\text{ }^\circ\text{C}$  primarni karbidi teže da se spajaju i grupišu: tako da sekundarni karbidi obrazuju jezgro unutar austenitne matrice, taložeći se uzduž ivica krakova dendrita (Stanje II). Između

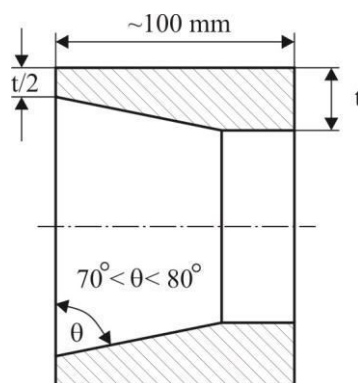
700 ÷ 800 °C primarni karbidi se kompletno transformišu iz eutektičke morfologije u formu kompaktnih blokova, a veoma fini sekundarni karbidi su rasprostrti po celoj matrici (Stanje III). Između 800 ÷ 900 °C stabilizuje se morfologija primarnih karbida a sekundarni karbidi se sjedinjavaju. Usled difuzije ugljenika u primarne karbide, nastaje gubitak sekundarnih karbida uzduž granica dendrita (Stanje IV). Kada se materijal izloži temperaturama 900 ÷ 1000 °C zapažaju se veći spojeni sekundarni karbidi, čiji je broj mnogo manji nego na nižim temperaturama. Ogoljene zone u sekundarnim talozima okružuju primarne karbide (Stanje V). Iznad 1000 °C, nestaju sekundarni karbidi a austenitna matrica ima oblik sličan kao i u sveže livenom stanju (Stanje VI).

Zapažanje transformacija čelika ove vrste indikuju da inicijalne promene u mikrostrukturi nastaju relativno brzo na datoj temperaturi (u okviru nekoliko hiljadu sati) i da se nakon toga nastavak promena veoma sporo odvija tokom vremena. Zbog toga mikrostrukturalne promene obezbeđuju prihvatljivu procenu temperaturnog profila kojoj je izložena cev tokom eksploatacije.

### 3.4.1.2 Ispitivanje penetrantima

Kada se cev ukloni iz peći radi metalografskih ispitivanja može biti od koristi da se relativno brzo utvrdi stanje oštećenja, pošto metalografska procena zahteva dosta vremena. Može se izvesti veoma jednostavno pomoću kvalifikovanih tehničara uz upotrebu ispitivanja pomoću penetranta.

Isecci se rade oko varova i pripremaju kao što je prikazano na slici 3.4.5. Površina oborenih ivica treba da se održi što je moguće glatkijom.



Slika 3.4.5. Procedura za pripremu uzorka unutrašnje površine cevi za ispitivanje penetrantima - Le May i sar. [47]

Ispitivanje penetrantima se izvodi preko oborene ivice. Ako je prisutna prskotina ona će biti u obliku longitudinalnih radijalnih prskotina u zidovima, i ona će se pojaviti kao linearna indikacija na oborenoj površini. Ako se otkriju takva oštećenja i ako su manja od 25% debljine zida u radijalnoj dimenziji, mogu se smatrati kao malim faktorima rizika, tako da se može nastaviti sa daljom eksploatacijom cevi. Međutim ako se one protežu više od 25% od debljine zida, potrebno je izvesti detaljnija metalografska ispitivanja.

### 3.4.1.3 Ispitivanje tvrdoće

Ispitivanje tvrdoće i metalografska ispitivanja se obično izvode istovremeno u cilju dobijanja dodatnih informacija o mehaničkim karakteristikama materijala. Tvrdoća varira tokom vremena, kao i temperatura i opterećenje. Uopšte tvrdoća se smanjuje tokom vremena kad god su komponente opterećene puzanjem. Jedna od mogućih primena merenja tvrdoće jeste procena stvarne radne temperature komponente. U drugu ruku otpornost na puzanje se ne može povezati sa merenjem tvrdoće. Moguća korelacija između tvrdoće i Larson – Miller-ovog parametra je sledeća [77]:

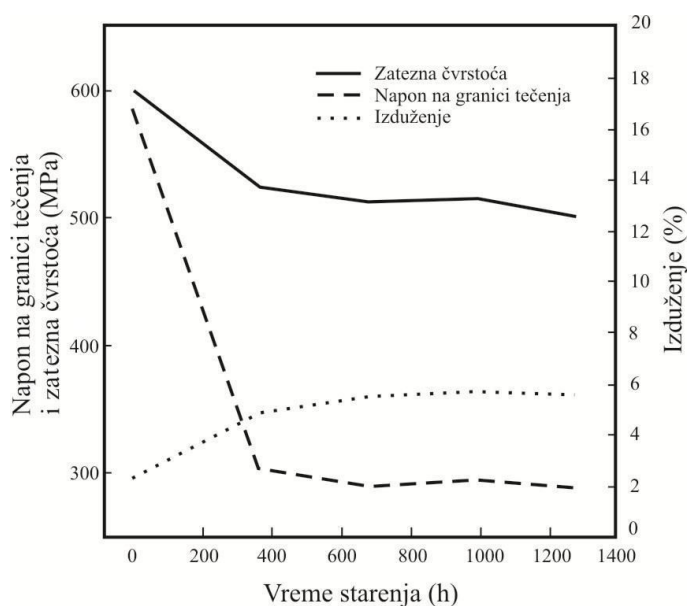
$$\frac{H}{H_0} = a \cdot PLM + b \cdot PLM^2 + c$$

gde su: a, b i c numerički koeficijenti. Partikularna primena merenja tvrdoće je mikro tvrdoća. Specijalni prototip je izveden 1956 za određivanje puzanja. Interesantna primena metoda je za direktno merenje tvrdoće.

Tvrdoća po Vikersu meri se pomoću dijamantske piramide sa uglom pri vrhu od 136° koja se utiskuje pod opterećenjem u materijal. Tvrdoća po Vikersu izračunava se prema izrazu [77]:

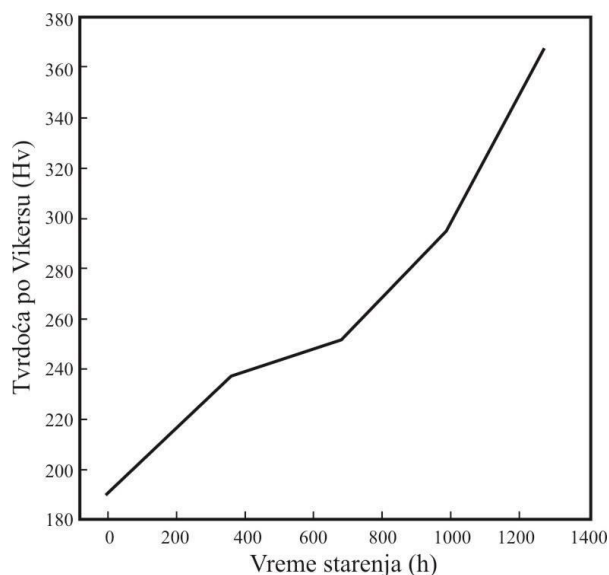
$$HV = \frac{1845F}{d^2}$$

Metoda po Vikersu naročito je pogodna za kontrolu tvrdoće veoma tvrdih površina kao što su kaljene, cementirane, nitrirane ili difuziono metalizirane. Pored toga mogu se meriti tvrdoće tankih predmeta ako se primene mala opterećenja kojima se deluje na utiskivač. Tvrdoća HV bliska je tvrdoći HB u granicama 250-600; izvan ovog intervala tvrdoće se znatno razlikuju, te za prevođenje jedne u drugu služe uporedne tablice. Na slici 3.4.6 je predstavljena zavisnost zateznih karakteristika u funkciji od vremena starenja, dok je na slici 3.4.7 predstavljena zavisnost tvrdoće po Vikersu u funkciji od vremena starenja.



Slika 3.4.6. Zavisnost zateznih karakteristika u funkciji od vremena starenja [77]





Slika 3.4.7. Zavisnost tvrdoće po Vickersu u funkciji od vremena starenja [77]

#### 3.4.1.4 Ispitivanje na puzanje

Svaki sveobuhvatni program upravljanja životnim vekom cevi treba da predvidi uklanjanje određene cevi iz peći radi ispitivanja, kod kojih je primarni model oštećenja cevi puzanje. Svrha uklanjanja cevi iz peći jeste obezbeđivanje uzoraka za ispitivanje puzanja radi utvrđivanja stvarne otpornosti materijala na puzanje. Ispitivanja mogu biti ubrzana izborom više temperature od radne u cilju obezbeđenja da će se ispitivanje izvršiti na vremenskoj bazi. Vrednost poznavanja otpornosti materijala na puzanje se ogleda u tome da se prilikom procene životnog veka ne mora usvojiti donja granica otpornosti materijala na puzanje. Time se postiže realnija procena životnog veka. Razlika u proceni životnog veka na osnovu donje granice otpornosti materijala na puzanje i životnog veka kada se koristi stvarna otpornost materijala na puzanje može iznositi 7 ÷ 12 godina. Drugim rečima, poznavanje stvarne otpornosti materijala na puzanje uliva više poverenja da će cev moći ostati u eksploataciji duže vreme. Troškovi ispitivanja materijala na puzanje su beznačajni u odnosu na troškove zamene cevi.

Sledeća prednost ispitivanja materijala cevi na puzanje je ta da omogućava tačno determinisanje preostalog životnog veka kada nema informacija koje se tiču istorijata rada peći u pogledu temperatura i pritisaka. Svaki jedinstveni set temperatura i pritisaka u prošlosti će redukovati preostalu otpornost materijala na puzanje posmatrane cevi u zavisnosti od magnitude svakog parametra i vremena tokom koga je ona izložena tom dejstvu.

Ovom vrstom ispitivanja se vrši ocena karakteristika čvrstoće i plastičnosti metala na povišenim temperaturama. Ispitivanje na povišenim temperaturama moguće je izvesti:

- sa kratkotrajnim zagrevanjem, i
- sa dugotrajnim zagrevanjem:
  - ispitivanje na puzanje, i
  - ispitivanje na relaksaciju.

Zagrevanje epruvete do određene temperature se izvodi najčešće u električnim pećima koje se montiraju na kidalici (sl.3.4.8). Kada metal ili leguru izložimo dugotrajnom dejstvu statičkog opterećenja, čak nižim od vrednosti napona tečenja, oni se sporo plastično deformišu tokom vremena. Ova zavisnost vreme-deformacija naziva se puzanje.

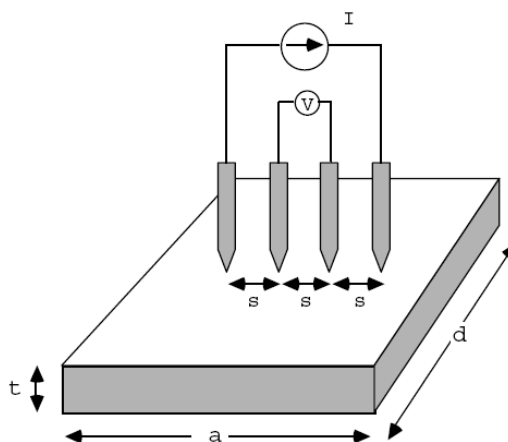


Slika 3.4.8. Električna peć za zagrevanje epruveta na kidalici

### 3.4.1.5 Procena degradacije putem merenja električne otpornosti

Praćenje el. otpornosti bi mogla postati alternativa za procenu degradacije materijala pošto je nedestruktivna a električna otpornost varira sa promenom mikrostrukture. Iako postoji mala varijacija otpornosti u cevima peći usled promene mikrostrukture u slučajevima kao što su: taloženje karbida, disocijacija čvrstih elemenata unutar matrice i promena raspodele makroskopskih defekata kao što su šupljine i pukotine, ona je veoma mala i iznosi reda veličina nekoliko  $\mu\Omega$  - cm [106], ona se ipak može otkriti modernim mernim uređajima velike osetljivosti ili rezolucije.

Električna otpornost se smanjuje sa povećanjem vremena ekspozicije. Tvrdoća prema Vickersu se povećava s porastom vremena ekspozicije. A ustanovljena je i linearna korelacija između el. otpornosti i tvrdoće, što omogućava procenu degradacije materijala cevi peći.



Slika 3.4.9. Šematski prikaz principa rada uređaja za merenje električne otpornosti u 4 tačke



Slika 3.4.10. Prikaz mernog sistema za merenje električne otpornosti u 4 tačke

Električna otpornost se određuje prema sledećem izrazu [106]:

$$\rho \text{ (el. otpornost)} = R_s \text{ (otpornost ploče)} \times t \text{ (debljina uzorka)} \quad (3.4.1)$$

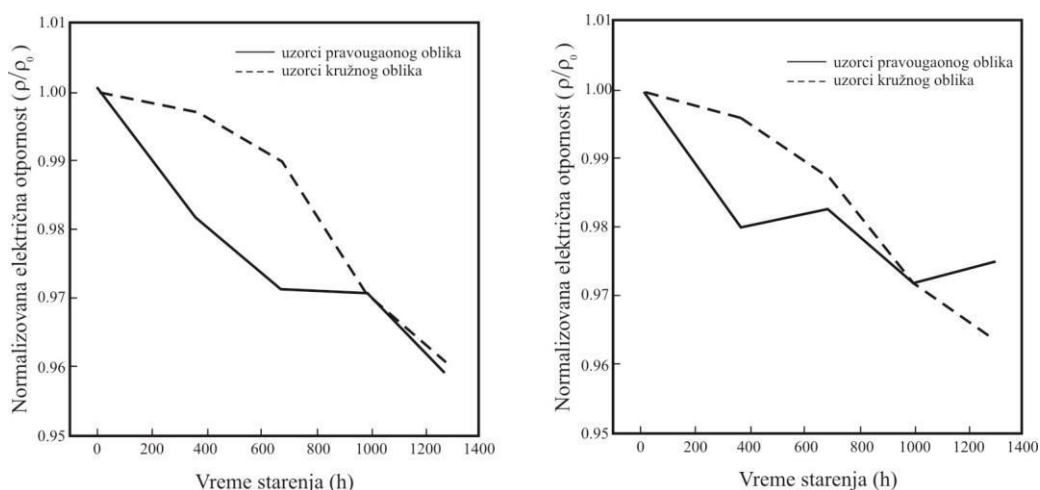
gde je:  $R_s = K_a R_a$

$K_a$  – geometrijski korekcionni faktor, i

$R_a$  – električna otpornost s jednostrukom konfiguracijom.

Ako je korekcionni faktor poznat, električna otpornost se određuje merenjem otpornosti i debljine uzorka (sl.3.4.9 i sl. 3.4.10).

Pošto se električna otpornost kontinualno smanjuje uporedo sa povećanjem vremena ekspozicije (sl.3.4.11) stepen degradacije se može proceniti merenjem električne otpornosti. Tako da se metod merenja el. otpornosti može upotrebiti za procenu stepena degradacije materijala cevi peći. Električna otpornost zavisi od oblika uzorka (na osnovu analize dobivenih rezultata otpornosti za pločaste i kružne uzorke, može se zaključiti da su kružni uzorci bolji).



a.) metod jednostruke konfiguracije

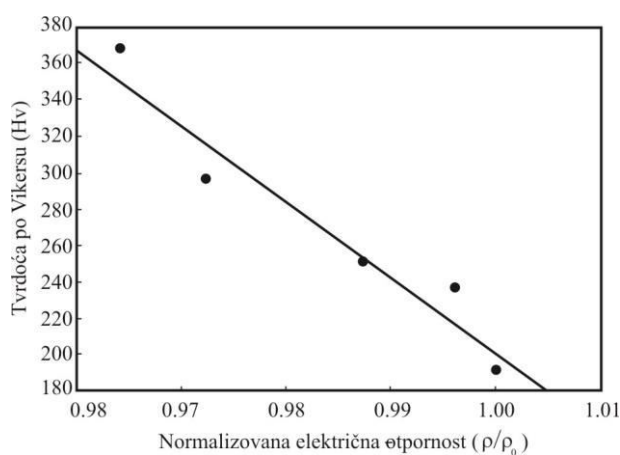
b.) metod dvostruke konfiguracije

Slika 3.4.11. Zavisnost električne otpornosti od vremena starenja materijala [106]

Na slici 3.4.12 je predstavljena korelacija između el. otpornosti i tvrdoće prema Vickersu za ispitivane uzorke. Električna otpornost je obrnuto proporcionalna prema tvrdoći po Vickersu. Postoji dobra povezanost (linearnost) između tvrdoće po Vickersu i el. otpornosti. Dobivena povezanost između njih se može predstaviti kao [106]:

$$H_V = A \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right) + B \quad (3.4.2)$$

gde su odgovarajući parametri  $A = -4161.95$  i  $B = 4363.45$ . Koristeći korelaciju moguće je postaviti pretpostavku da je tvrdoća po Vickersu upotrebljavanog materijala indirektno jednaka električnoj otpornosti. Međutim jednačina (2) se može samo primeniti do 200000 h. Međutim preostali životni vek se može izvesti merenjem vrednosti el. otpora, ako postoji raspoloživa korelacija između parametra procene životnog veka kao što je  $\Omega$  parametar i tvrdoća po Vickersu.<sup>(18)</sup>



Slika 3.4.12. Korelacija između električne otpornosti i tvrdoće po Vickersu [106]

### 3.4.2 Nedestruktivne metode

Nedestruktivne metode tokom procesa zamene cevi se fokusiraju na snimanje situacije pre početka upotrebe da bi se uspostavili bazni parametri za praćenje stanja opreme. Za ovakvu namenu najkorisnija su metalografska ispitivanja integrisana sa tehnikama merenja dimenzija. Nedestruktivne tehnike tokom perioda eksploatacije su fundamentalni alat za procenu preostalog životnog veka.

Osnove za rashodovanje cevi na osnovu poprečne deformacije prema API 530:

- HK 40 (1 ÷ 2 %)
- HP modifikovane (5 ÷ 7 %)

<sup>18</sup> Seung, Hoon, Nahm, et. al., Degradation evaluation of HK-40 steel using electrical resistivity, International Journal of Modern Physics B, Vol. 17, Nos. 8 & 9, pp.1615–1620, 2003.

### 3.4.2.1 Vizuelni pregledi

Ovo je najosnovnija tehnika koja se često nepravilno i nedovoljno koristi u cilju otkrivanja problema tokom rada. Provere se trebaju izvoditi u cilju otkrivanja ispupčenja ili iskrivljenja, koja indikuju prekomerno puzanje, ili kao što je glaziranje koje indikuje pregrevanje usled direktnog delovanja plamena na cev (plamen liže cev). Ove tehnike nisu osjetljive i neće identifikovati oštećenja unutar materijala cevi i u mnogome zavise od iskustva onoga koji vrši pregled. Ipak, ona se uvek kombinuje sa drugim metodama.

### 3.4.2.2 Ispitivanje malih uzoraka materijala sa površine

Ispitivanje malih uzoraka sa površine materijala se može smatrati nedestruktivnom tehnikom zato što se uzima ograničena količina materijala veličine diska debljine  $0.25 \div 0.5$  mm i prečnika  $8 \div 10$  mm. Obično nije potrebna sanacija mesta uzimanja uzorka. Ona je veoma efikasna i troškovno efektivna tehnika koja ima potencijal za realno određivanje karakteristika materijala (kao što je žilavost ili otpornost na puzanje) komponente koja se analizira. Ova tehnika je pod procedurom usaglašavanja (CEN WS 21) u cilju stvaranja Evropskog standarda. Značajna primena ovog metoda je u podršci procene preostalog životnog veka. Zbog ove namene je uključena u ISPEL procedure pogodnosti za upotrebu za komponente izložene puzanju.

### 3.4.2.3 Metalografska ispitivanja – na licu mesta

Ekstenzivna primena metalografskih ispitivanja komponenata izloženih puzanju je opravdana njihovom efektivnošću i jednostavnošću otkrivanja oštećenja usled puzanja u fazi rane pojave mikrošupljina.

Metalografija na licu mesta kao i njeno repliciranje treba da se rutinski sprovodi sa spoljašnje strane cevi da bi se utvrdilo stanje termičkog starenja, proveri dejstvo temperature, utvrdi stanje materijala (prekomerna inkluzija, prihvatljiva veličina zrna, itd.), i najbitnije, određivanje metalurške reakcije koja se pojavljuje. Iako se kavitacija puzanja (male prskotine koje se javljaju na visokim temperaturama usled puzanja na granicama zrna materijala) ne susreće često kod cevi peći, značaj metalografije na licu mesta u pružanju bitnih informacija o metalurškom stanju cevi se ne može podceniti. Ako je kavitacija prisutna kod tipičnih tankozidnih cevi, tada se ona prvo pojavljuje na površini ili u blizini spoljne površine pošto su temperatura i opterećenje najveće na tom mestu. Repliciranje mikrostrukture kod novih cevi je veoma korisno pošto se jasno definiše početna mikrostruktura radi kasnijeg poređenja sa rezultatima narednih pregleda.

Kod nekih čelika (kao što su  $9 \div 12$  % Cr čelici) lokalne mikrostrukturalne promene u ZUT (Zona Uticaja Temperature) se pojavljuju u kasnijim fazama životnog veka. Prema nekim autorima rezultati metalografskih ispitivanja u velikoj meri zavise od sposobnosti i umešnosti izvođača ispitivanja. Druga ograničenja se odnose na sposobnost otkrivanja samo površina ili oštećenja. Da bi se zadržala karakteristika nedestruktivnog ispitivanja veličina skinutog materijala ne sme da pređe veličinu od  $0.5 \div 1$  mm. Instrument za metalografska ispitivanja na licu mesta je prikazan na slici 3.4.13.



Slika 3.4.13. Instrument za metalografska ispitivanja na licu mesta

#### 3.4.2.4 Ultrazvučna ispitivanja

Ultrazvučne tehnike su od velike koristi za otkrivanje oštećenja usled puzanja čak iako nisu tako jasne kao metalografska ispitivanja. Među njima najznačajnija su TOFD (Time Of Flight Diffraction) i Phase Array.<sup>19</sup> TOFD je sposoban da otkrije oštećenja reda veličina mikropukotina, i u nekim slučajevima da utvrdi relativno veliku gustinu povezanih šupljina. TOFD se koristi kod provere zavarenih spojeva zbog troškovne efektivnosti i celishodnosti detekcije. Ultrazvučne tehnike zasnovane na Phased Arrays su krajnje efektivne zbog korišćenja brojnih zračnih elemenata puštenih pravovremeno sa vremenskom fazom. Vremensko kašnjenje koje se primenjuje na svaki davač omogućuje longitudinalno skeniranje, elektronsko fokusiranje i usmeravanje zrakova. Ove poboljšane karakteristike LPA (Linear Phased Arrays) omogućuju brže preglede nego TOFD. Korišćenje pregleda fokusiranim zrakovima u Phased Array tehnologiji postaje efektivnije: fokusiranje se izvodi primenom specijalnih sočiva za fokusiranje koji koncentrišu svu raspoloživu energiju na malu fokusiranu tačku. U FATS (Focused Array Transducer System) tehnologiji mala veličina tačke i visoki intenzitet snopa obezbeđuje superiorniju osetljivost i rezoluciju za otkrivanje oštećenja puzanjem u ranoj fazi.

Međutim kao i kod drugih UZ tehnika, FATS detektuje šum tako da se minimalnom detektabilnom veličinom ne može smatrati jedna šupljina nego tek kad postanu povezane. Uobičajni protokol za otkrivanje koristi kombinaciju TOFD-a i FATS-a. Na takav način moguće je izvršiti brzo skeniranje dugačkih delova (TOFD) i istražiti dublje oblasti od većeg interesa gde se očekuju oštećenja od puzanja (FATS).

---

<sup>19</sup> Kucora, I., Radovanovic, Lj., Desnica, E., *Tehnička dijagnostika cijevnih snopova peći za pirolizu benzina-nedestruktivne metode*, 23 Scientific meeting, Organisation and technology of maintenance, Proceeding, Požega, 24-25 travnja, 2014, Društvo održavatelja Osijek, Elektrotehnički fakultet Osijek, HGK Županijska komora Požega, ISBN 978-953-6032-84-6 str.87-94

### 3.4.2.5 Merenje debljine oksidnih naslaga

U cilju određivanja preostalog životnog veka osnovno je da se proceni njihova prosečna radna temperatura. Ova vrednost se može odrediti kao funkcija debljine oksidnih naslaga sa unutrašnje strane cevi. U stvari viša temperatura pare dovodi do brže kinetike oksidacije. Merenje debljine oksidnih naslaga i debljine osnovnog materijala se može istovremeno izvesti specijalnim UZ tehnikama. Kinetika oksidacije se može iskoristiti kao efektivan alat za procenu pogodnosti upotrebe koji može dati korisne informacije za određivanje intervala izvođenja pregleda.

### 3.4.2.6 Ispitivanje vrtložnim strujama

Kao i kod ultrazvučnog ispitivanja, vrtložne struje se primenjuju sa spoljne strane cevi i otkrivaju varijacije u gustini fluksa indukovanih elektromagnetnim kalemom. Osetljivost ove tehnike se dovodi u pitanje kada materijal cevi menja magnetski permeabilitet. Zbog okruženja u kome cevi rade i materijala od kojih su napravljene, postoji značajna varijacija magnetskog permeabiliteta duž cevi nadole već nakon prvog dana stavljanja u eksploataciju. Tehnike vrtložne struje takođe imaju smanjenu osetljivost na otkrivanje oštećenja sa unutrašnje strane cevi. U nekim slučajevima ove metode provere mogu dati lažne rezultate, tako da se onda sasvim ispravne cevi uklanjaju iz dalje eksploatacije. Međutim, može se desiti i suprotno, da oštećena cev prođe proveru i da nakon toga usledi već poznati scenario. Karakteristike metoda ispitivanja vrtložnim strujama:

- prate promene u karakteristikama materijala,
- potrebna je kalibracija na novoj ili korišćenoj neoštećenoj cevi,
- ne zahteva vezivnu sredinu,
- promene u permeabilitetu utiču na podatke,
- naslage i zavareni spojevi imaju uticaj na signal, i
- manja osetljivost na početna oštećenja unutrašnjeg zida.

### 3.4.2.7 Akustična emisija

Tehnike akustične emisije su pasivne tehnike za praćenje stanja koje su sposobne da otkriju „aktivna” ili rastuća oštećenja. Međutim emisioni izvori mogu biti „izvorno locirani” tehnikama vremena pristizanja. Iskustva pokazuju važnost tehnika akustične emisije za standardne preglede opreme pod pritiskom. Preliminarni AE pregledi mogu otkriti kritične oblasti koje se zatim mogu pregledati određenim NDT metodima za otkrivanje oštećenja izazvanih puzanjem.

Kao što je navedeno od strane nekih autora AE su sposobne da otkriju male šupljine. Međutim ova karakteristika AE nije potvrđena u praksi. Neki drugi autori realističnije navode da se asimilacija mikropukotina nemože otkriti AE [28].

Tehnike akustične emisije mogu on-line pratiti stanje, a inače su i troškovno efektivne. One zahtevaju zavarene vođice za cevi, dok se praćenje stanja obično sprovodi tokom celog perioda eksploatacije.

### 3.4.2.8 Holografija i tačkasta interferometrija

ESPI metodologija (Electronic Speckle Pattern Interferometry) [28] zahteva upotrebu izvora laserskog zraka i video kamere. Glavna upotreba ovih metoda je otkrivanje oštećenja i nedostataka upravo pregledom interferencije uzoraka. Poređenjem dve slike (referentnog signala i perturbovanog stanja) ovaj metod omogućava otkrivanje deformacija (omogućava vrlo precizno merenje do  $10^{-5}$ ). Korisna primena ovog metoda je praćenje kritičnih oblasti komponenata kombinacijom nekoliko NDT tehnika. ESPI i holografija se retko koristi u praktičnoj primeni.

### 3.4.2.9 Laserska profilometrija

Upotreba metoda za ispitivanje koje su zasnovane na laserskoj tehnologiji je u proteklih nekoliko godina doživela nagli rast. Pomoću ovih metoda mogu se pratiti promene na cevima tokom celog životnog veka. Proces ispitivanja pomoću laserske profilometrije se zasniva na prikupljanju miliona podataka sa tačaka prečnika cevi. Ovi rezultati se mogu vizualizovati tako da obezbeđuju podršku za sprovođenje promena u pogledu: eksploatacije i konstrukcije u cilju povišenja efikasnosti i performansi peći.

Pojavom laserske profilometrije merenje spoljašnjeg / unutrašnjeg prečnika cevi, a takođe i izduženja, je dobilo novu dimenziju tako da su prevaziđeni neki raniji nedostaci metoda merenja dimenzija.

Laserska profilometrija pruža tačno merenje cevi, tako da omogućava pouzdano određivanje životnog veka cevi. Podaci prikupljeni pomoću sondi, obrađuju se pomoću softvera za vizualizaciju i doprinose objašnjavanju pojava kod peći.

Laserskom profilometrijom je moguće otkriti:

- oštećenja puzanjem,
- krunjenje metala,
- fabričke nedostatke cevi kao što su:
  - udubljenja na unutrašnjoj / spoljašnjoj površini cevi,
  - povećan unutrašnji / spoljašnji prečnik cevi,
  - prekomerna penetracija vara, i
  - nedovoljno spajanje metala na zavarenom prečniku.

Sposobnost tačnog merenja puzanja i evidencije rasta znači da se stanje cevi može meriti od njenog prvog dana. Ne samo da se cevi individualno mogu povući iz upotrebe u odgovarajuće vreme, već se takođe može dati procena stanja cele peći.

Sonda projektuje tanak laserski snop (obično 0.5 mm u prečniku) na ciljnu površinu, što obezbeđuje precizno merenje radijusa od 0.05 mm površine cevi na svakoj tački za uzorkovanje, što za cev prečnika od 100 mm obezbeđuje detekciju puzanja veličine od 0.05%.



Laser, optika i foto detektor su smešteni u prednjem delu sonde. Kućište optike obrće se brzinom od 1800 o/min i vodi se kroz cev tako da se onda stvaraju helikoidni oblici uzoraka. Pregled jedne cevi u proseku traje  $3 \div 5$  min. Sistem poseduje mogućnosti pregleda cevi unutrašnjeg prečnika od  $11 \div 143$  mm. Dizajn instrumenta je zglobni tako da omogućuje preglede kolena sa radijusom od 152 mm. Sistem za unutrašnji pregled cevi (sl.3.4.14) je je kompaktan, omogućuje lak transport, pripremu za rad i samo izvođenje ispitivanja. Na slici 3.4.15 je prikazan uređaj za lasersku profilometriju spoljne površine cevi.



Slika 3.4.14. Izgled sonde za unutrašnju lasersku profilometriju



Slika 3.4.15. Uređaj za aplikaciju sa spoljne strane cevi

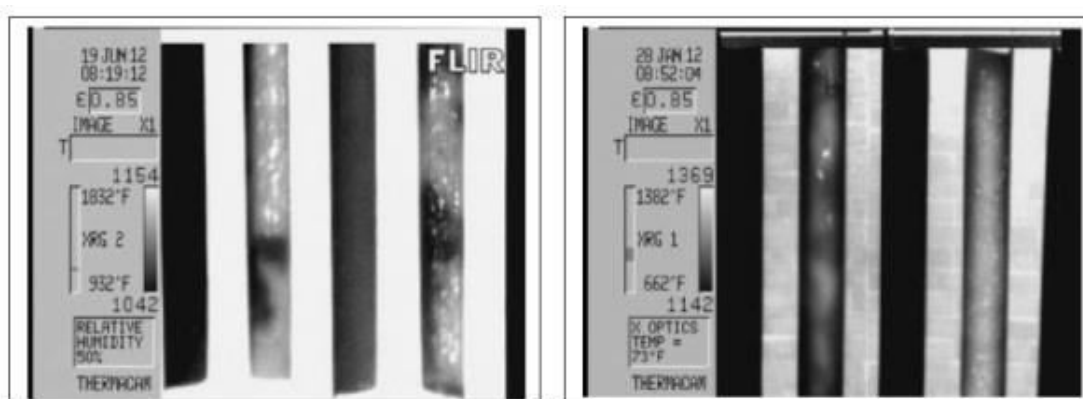
### 3.4.2.10 Termografija

Infracrvena termografija ima široku primenu u petrohemijskoj industriji. Već preko dve decenije mnoge rafinerije zavise od upotrebe termografije kao nedestruktivne metode kao podrške programu prediktivnog održavanja. Jedna od primena termografije u petrohemijama je pregled procesnih grejača i peći.

Većina problema kod petrohemijskih peći je povezana sa poremećajima tokom eksploatacije. Ovi poremećaji potiču od grešaka u radu brenera, pa do prekida toka sirovine kroz peć. Često se infracrvena termografija primenjuje nakon poremećaja u cilju utvrđivanja da li peć nadalje radi normalno.

Sledeći učestali problem je oštećenje vatrostalnog materijala koji dovodi do oštećenja metalne oplata i konstrukcije usled direktnog dejstva toplote. Tokom vremena ona će oslabiti, korodirati i na kraju oštetiti tj. otvoriće se rupe. Pošto početna oštećenja u vatrostalnom materijalu uzrokuju lokalno povećanje temperature sa spoljne strane, pravilno raspoređene termografske provere mogu blagovremeno otkriti i dokumentovati ova mesta tako da se mogu na vreme isplanirati i preduzeti mere za sanaciju. Na spoljna oštećenja mogu još uticati: slezanje peći, krpljenje i mehanička oštećenja.

Taloženje koksa na zidove cevi može dovesti do smanjenja protoka, tj. do smanjenja hlađenja cevi tako da onda temperatura zidova cevi na tom delu može biti veća i za stotinu stepeni. Na slici 3.4.16 je prikazan snimak cevi peći termo-kamerom. Svetle tačke na slikama predstavljaju mesta taloženja koksa (na tim mestima je povećana temperatura zidova cevi).



Slika 3.4.16. Snimak cevi peći termo-kamerom<sup>(20)</sup>

Infracrvene termografske kamere se mogu koristiti za dokumentovanje aktuelnog temperaturnog stanja metala cevi i mogu identifikovati lokalizovana „užarena mesta” koja mogu rezultovati oštećenjima. Gong je 2000 godine predložio nov metod koji je zasnovan na kvarcnom optičkom fiberu i digitalnoj analizi slika. Optički fiberi dobro podnose visoke temperature i imaju dobru svetlosnu provodljivost na visokim temperaturama. Temperaturne promene i promene opterećenja cevi se mogu oceniti na osnovu promena na slikama vrelih mesta načinjenih ranije, tj. u neko drugo vreme.

Poteškoće u izvođenju termografskih ispitivanja:

- izbor lokacije za posmatranje,
- ograničeno vidno polje, zbog uskih platformi, mreže cevi, i
- vratanca za gledanje plamena – emisija toplote može oštetiti kameru tako da je potrebno koristiti zaštitu.

U cilju pravilnog izvođenja termografskog ispitivanja mora se uzeti u obzir sledeće: emisionost, reflektovana temperatura, temperatura ambienta, rastojanje, sposobnost prenosa spoljne optike i vidni ugao.

<sup>20</sup> Kucora, I., Adamović, Ž., Radovanović, Lj., Otkazi cevi etilenskih peći, Energetske tehnologije, 2013., Vol.10. ,No 1., str. 47-53, ISSN 1451 9070

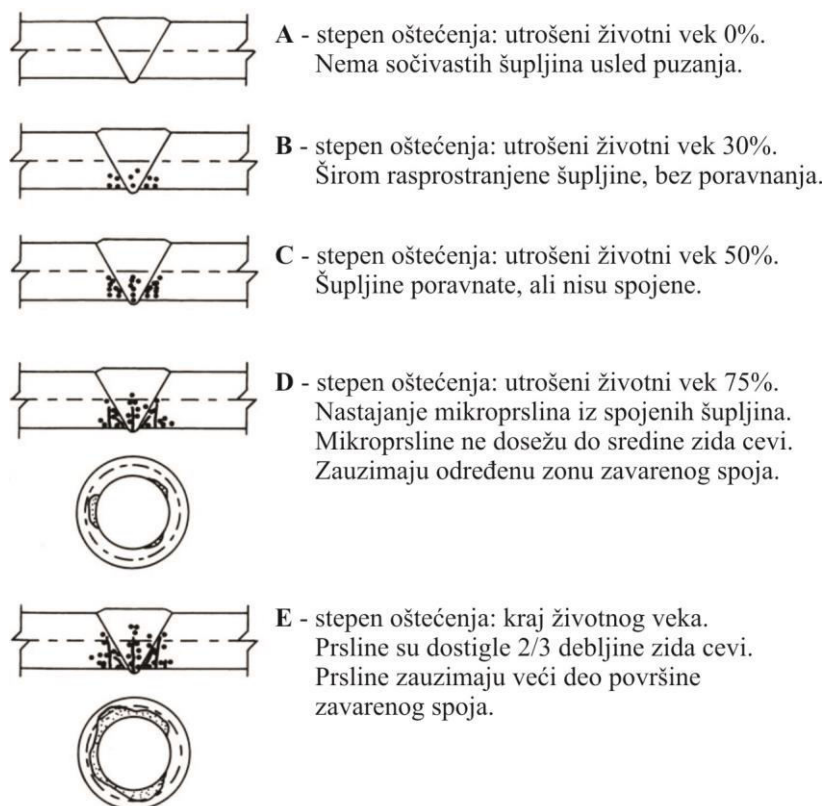
### 3.4.2.11 Gamagrafska ispitivanja

Gamagrafija je oblik radiografije koji, međutim, koristi gama zrake ( $\gamma$ ) ali se temelji na istim teoretskim principima. Pod njim se podrazumeva proces fotografisanja upotrebom gama zraka.

Na slici 3.4.17 su predstavljeni kriterijumi koji su korišćeni za ocenu stepena akumulacije oštećenja u zavarenim spojevima između centrifugalno livenih delova cevi peći [47]. Stepene oštećenja (A do E) odgovaraju onima ranije razmotrenim. U većini slučajeva životni vek zavarenog spoja je ograničen širenjem prskotina u ravni zavara i nalazi se unutar nanešenog metala. Prskotine se takođe mogu razmatrati u zoni povišenih temperatura što takođe može biti limitirajući faktor. Veoma retko se dešava da je životni vek cevi ograničen transverzalnim pukotinama u zavarenom spoju, u pravcu ose cevi, i proširen na osnovni metal centrifugalno livenih cevi.

Postoje već razvijene radiografske metode koje su pogodne za otkrivanje oštećenja različitog stepena. Koriste  $\gamma$  radiografiju usmerenu (a) u liniju sa nanesenim varom (ugao dejstva  $0^\circ$ ) i (b) sa uglom dejstva od  $15^\circ$  prema zavarenom spoju. Prvi obezbeđuje detekciju prskotina u ravni zavarenog spoja pod pravim uglom na osu cevi, dok drugi pruža bolju detekciju prskotina koje leže u zonama sa većom temperaturom. Radoigrafija se izvodi bez uklanjanja cevi iz peći.

Program ispitivanja prikazuje oštećenja u zavarenom spoju koja se mogu otkriti sa dobrom osetljivošću. U slučaju da se otkriju ozbiljnija oštećenja potrebno je ukloniti cev iz peći za potvrđujuća metalografska ispitivanja, koja inače predstavljaju daleko senzitivniju tehniku.



Slika 3.4.17. Kriterijumi koji se primenjuju za procenu akumulacije oštećenja u zavarenom spoju između centrifugalno livenih delova cevi peći - Le May i sar. [47]

### 3.5 Optimalno preventivno održavanje

Politika zamene konstantnog intervala je najjednostavniji oblik preventivnog održavanja i politike zamene. U okviru ove politike postoje dva tipa aktivnosti koje se izvode. Prvi tip je preventivna zamena koja se izvodi u fiksnim intervalima. Komponente ili delovi se menjaju u unapred utvrđenom roku bez obzira na stanje i starost. Drugi tip aktivnosti je zamena delova usled dotrajnosti. Ova politika je takođe poznata i kao politika zamene u bloku (*Elsayed, 1996*).

Održavanje ostalih komponenti je takvo da ima samo korektivnog održavanja kao i remonta koji mogu više uticati na pouzdanost ovako složenog tehničkog sistema.

Cilj preventivnog održavanja i modela zamene je determinisanje parametara politike preventivnog održavanja koja optimizira neke kriterijume. Širom prihvaćeni kriterijum je ukupni očekivani trošak zamene po jedinici vremena. Ovo je u saglasnosti s određivanjem ukupnih troškova po jedinici vremena, što će se nadalje objasniti. Neka  $c(t_p)$  predstavlja asimptotske ukupne troškove zamene po jedinici vremena kao funkciju od  $t_p$  (*Barlov 1965*). Tada dobijamo:

$$c(t_p) = \frac{\text{Ukupni očekivani troškovi u intervalu } (0, t_p]}{\text{Očekivana dužina intervala}} \quad (3.5.1)$$

Ukupni očekivani troškovi u intervalu  $(0, t_p]$  predstavljaju sumu očekivanih troškova zamene usled otkaza i troškove preventivne zamene. Tokom intervala  $(0, t_p]$ , izvršena je jedna preventivna zamena s troškovima  $c_p$  i  $M(t_p)$  zamena usled otkaza sa troškovima  $c_f$ , gde  $M(t_p)$  predstavlja očekivani broj zamena (ili obnavljanja) u toku intervala  $(0, t_p]$ . Očekivana dužina intervala je  $t_p$ . Izraz (3.5.1) se može zapisati kao:

$$c(t_p) = \frac{c_p + c_f M(t_p)}{t_p} \quad (3.5.2)$$

Očekivani broj otkaza,  $M(t_p)$ , u toku  $(0, t_p]$ , kao  $t_p$  postaje veća, i može se dobiti primenom asimptotskog oblika funkcije zamene kao:

$$M(t_p) = \frac{t_p}{\mu} + \frac{\sigma^2 - \mu^2}{2\mu^2} \quad (3.5.3)$$

gde su  $\mu$  i  $\sigma$  srednja vrednost i standardna devijacija raspodele vremena otkaza, respektivno. Na primer, srednja vrednost i variansa Weibull-ove raspodele su [24]:

$$\mu = \theta^{1/\gamma} \Gamma\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) \quad (3.5.4)$$

$$\sigma^2 = \theta^{2/\gamma} \left[ \Gamma\left(1 + \frac{2}{\gamma}\right) - \left( \Gamma\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) \right)^2 \right] \quad (3.5.5)$$

Pretpostavimo da rukovodstvo odluči da peć radi na 745 °C. Tada je srednja vrednost  $\mu=54.287$  a standardna devijacija  $\sigma=38.599$ , dok se očekivani broj otkaza dobija iz jednačine (3.5.3) kao:

$$M(t_p) = \frac{t_p}{54287} - 0.247722$$

Primenom gornjeg izraza lako je odrediti vrednost ukupnih troškova po jedinici vremena za različite vrednosti troškova preventivnog održavanja i zamene nakon otkaza koje minimizira jednačina (3.5.2). Ovo će odgovarati optimalnom intervalu preventivne zamene.

Rad peći na 725 °C rezultuje procenom srednjeg preostalog životnog veka od 12.72 godine. Godišnja proizvodnja je 159.000 m<sup>3</sup>, sa profitom od 20 n.j. (novčanih jedinica) po m<sup>3</sup> prerađene nafte. Rad na temperaturama višim od 725 °C rezultuje povećanjem sa 9.8% na 10% proizvodnje nafte za svakih 2.5 °C povećanja radne temperature, ali očekivani preostali životni vek cevi se srazmerno smanjuje. Ovo će dovesti do neophodne zamene cevi, što košta oko 250.000 n.j. Tako da optimalna radna temperatura odgovara maksimumu profita koji se dobija u okviru prihvatljivog temperaturnog opsega rada od 725 ÷ 745 °C. Izraz za određivanje profita ima oblik [26]:

$$\text{Profit na temperaturi } T = P \times N_T \times MTTF_T - \frac{(MTTF_{725} - MTTF_T)}{10.000} \times \frac{25 \times 10^6}{MTTF_{725}} \quad (3.5.6)$$

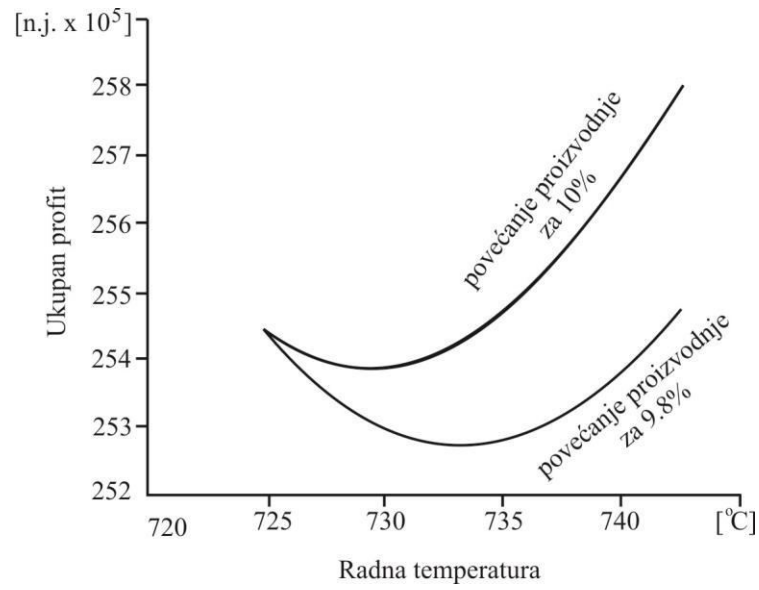
gde je:  $P$  – profit po m<sup>3</sup>, i

$N_T$  – broj proizvedenih m<sup>3</sup> na radnoj temperaturi  $T$ .

$MTTF_T$  se izračunava po sledećem izrazu [26]:

$$MTTF_T = \theta^{1/\gamma} \Gamma\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) \quad (3.5.7)$$

Procenjeni parametar razmere Weibull-ove raspodele i izračunat MTTF se koriste za određivanje profita u zavisnosti prema radnim temperaturama (sl.3.5.1). Nije ekonomično da se radi na temperaturama od 730, 732.5 i 735 °C. Pri 10% povećanju proizvodnje ekonomično je raditi na višim temperaturama od onih gore navedenih, dok u stvari povećanje od 9.8% je daleko profitabilnije za rad na temperaturi od 745 °C. Doduše, rezultati iz jednačine za profit indikuju da je daleko ekonomičnije da se radi na temperaturama iznad 750 °C. Međutim, jednačinu za profit treba proširiti s hemijskim i fizičkim uticajima procesuiranog fluida na tim temperaturama.



Slika 3.5.1. Neto profit na različitim radnim temperaturama

# Č e t v r t i d e o

## TEORIJSKA ISTRAŽIVANJA

### **4.1 Preporuke standarda zemalja EU za temperaturna oštećenja materijala**

Razvoj standarda u različitim državama se kretao u sličnim smerovima i u mnogim slučajevima metodologija je pozajmljena iz prethodno raspoloživih standarda drugih zemalja. Rani pokušaji procene preostalog životnog veka delova izloženih uticaju visoke temperature poseduju metodologiju koja se zasniva na pravilniku bez otkaza. Na primer ASME N-47 [11] i Francuski RCC-MR [99], koje imaju mnogo sličnosti, zasnovane su na proceni životnog veka neoštećenih struktura. Daleko savremenije metode izvode procenu preostalog životnog veka uz prisustvo oštećenja. Na primer Nemački pristup na osnovu osnovnih prosečnih šupljina (FBH) razmatra otkrivanje prskotina i karakterisanje, a Nemački dvokriterijumski metod [33, 34] odnosi se na stvaranje kao značajan faktor za procenu životnog veka i ne odnosi se na režime širenja prskotina. Naprednije tehnike odnose se na oštećenja izazvana interakcijom puzanjem i puzanjem/zamorom u smislu inicijalizacije i rasta oštećenja, a to su: Britanski R5 [4], BS-7910 [18] i Francuski A16 [29, 43] koji imaju jasne sličnosti u pogledu metodologije.

Dva Britanska standarda za visoke temperature BS-7910 i R5 pokušavaju da se na razuman način ophode prema procedurama procene i preostalog životnog veka koje se mogu koristiti u fazi projektovanja i eksploataciji. Oni daju naglasak na pristup proceni životnog veka koji omogućuju ekspertima da odluče o primenljivosti procena u odnosu na uslove eksploatacije. Koncept ukazuje na to da standardi trebaju da prikažu da su oba pouzdana i razumljiva širom područja stanja materijala i opterećenja koja možda nisu ranije istraživana ili potvrđena od strane autora standarda. Ovo je pogotovo značajno za nove jače čelike za koje postoji malo ili nema podataka o dugoročnim ispitivanjima karakteristika, koje su razvili ili koristili za energetske industriju.

Zbog toga je trend u razvoju standarda predlaganje povećane fleksibilnosti u obradi informacija i analizi značajan faktor. Ovakvo usvajanje činjenica da su proračuni ipak iscrpni i sofisticirani neće bezuslovno doći sa tačnim procenama usled različitih nepoznanica u proceduri procene. Nepoznanice se mogu pripisati brojnim faktorima, mnogi od njih su pod kontrolom inženjera uz primenu standarda. Oni su sledeći:

- Podaci o karakteristikama materijala koji nam stoje na raspolaganju su obično nedovoljni ili razbacani, i obično se uzimaju iz istorijata rada, rezultati su iz različitih šarži materijala ili ispitivanja iz različitih laboratorija sa nedovoljnim brojem uzoraka, često sadrže veliku disperziju.

- Disperzija i osetljivost u karakteristikama puzanja inherentno stvara veliku varijaciju u proračunima. Zbog toga se uvode donje i gornje granice koje daju širi opseg rezultata procene životnog veka.
- Procena relevantnih parametara kao što su  $K$ , koncept limitirajućeg opterećenja, nominalno naprezanje  $\sigma_{ref}$  i  $C^*$  se razlikuju od metoda derivacije.
- Upotreba kratkotrajnih laboratorijskih ispitivanja za procenu životnog veka komponenata izloženih dugotrajnom temperaturnom opterećenju nadalje povećava mogućnosti za pogrešnu procenu.
- Poteškoće u pronalaženju stepena krajnjih granica prskotine i multi aksijalnih efekata u komponentama će smanjiti tačnost procene širenja prskotina s faktorom od oko 30.
- Nepoznate prilikom modelovanja istorijata opterećenja, opterećenja komponenti sistema i druge nepoznate kao što su malo poznata ili nepoznata istorija režima eksploatacije, zaostali naponi, itd., javljaju se kao izvori grešaka u procesu procene.
- Ograničenja za nedestruktivne (NTD) metode za određivanje oštećenja u komponentama u toku rada i/ili zaustavljanja i nedovoljni podaci o merenju prskotine tokom rada, se često pridodaju greškama.

Svi ovi faktori sugerišu da se ipak rezultati iscrpnih, sofisticiranih i brižljivo tačno izvedenih kalkulacija još uvek tretiraju s oprezom. Sličnost pristupa u različitim standardima ne podrazumeva da će proračuni različitim metodama dati iste rezultate, tj. procene. Moguće je da se pod određenim kontrolisanim i dokazanim okolnostima kao što je procena A16 za nerđajući čelik 316 LN može optimizovati. Ovaj čelik je u daljnjem primeru korišćen za analizu [94]. Jasno je da je kritična komparacija moguća samo kada se koriste isti metodi za različite materijale i režime eksploatacije, ili u slučaju istog testa da se ispituje različitim standardima.

Da bi se nosili sa ovim nepoznatima u proceni životnog veka svi standardi uključuju stepen sigurnosti u većoj ili manjoj meri. Ovi faktori se baziraju na granicama eksperimentalnih podataka i na stepenu tačnosti prema kojima se parametri mogu izračunati. Neki drugi pristupi koriste statističke metode da bi dobili gornje i donje granice podataka i parametara. Ali, ako se ispravno rasuđivanje ne koristi u takvim slučajevima procena preostalog životnog veka postaje krajnje konzervativna i otuda možda beskorisna za projektovanje i eksploataciju. Zbog toga su potrebna kako kvantitativna tako i kvalitativna rasuđivanja da bi se postigla svrsishodna procena životnog veka.

Principi definisanja opterećenja prilikom rasta prskotina usled puzanja i zamora su slični u pogledu formula. Procedure definišu primarna opterećenja pri zatezanju i savijanju, sekundarna opterećenja i maksimalna opterećenja. Relevantno nominalno opterećenje je ulazni podatak za standarde za procenu parametara mehanike loma  $K$ ,  $J$ ,  $\sigma_{ref}$  i  $C^*$ . Rešenja za  $K$  i  $J$  se mogu pronaći u literaturi za većinu standardnih oblika. Za komplikovanije strukture koristi se metoda analize konačnih elemenata. Metoda limitirajućeg opterećenja se koristi da bi se odredilo  $\sigma_{ref}$  [58, 113]:



$$\sigma_{ref} = \sigma_y \frac{P}{P_{lc}} \quad (4.1.1)$$

gde je  $P_{lc}$  – napon loma slomljenog tela,  
 $\sigma_y$  – napon razvlačenja.

Vrednost  $P_{lc}$  zavisi od pretpostavljenog mehanizma loma i da li deluje opterećenje u ravni ili naprezanje u ravni.  $\sigma_{ref}$  se koristi za određivanje  $C^*$  uz pomoć ostalih komponenti [58, 113]:

$$C^* = \sigma_{ref} \dot{\epsilon}_{ref} \left( \frac{K}{\sigma_{ref}} \right)^2 \quad (4.1.2)$$

gde je  $\dot{\epsilon}$  stepen napona puzanja pri nominalnom opterećenju. U ovom slučaju numeričke, analitičke i eksperimentalne informacije se mogu uključiti za procenu parametra  $C^*$ . R5 i A16 procedure takođe obuhvataju izvode parametara mehanike loma za relevantne geometrije loma i navode na to da se glavni parametri mogu izračunati primenom odgovarajuće analize konačnih elemenata. FBH pristup za procenu naprezanja je u skladu sa Nemačkim standardima (TRD, KTA) a takođe i sa ASME standardima za sudove i cevovode pod pritiskom sa III delom.

Pristup na osnovu nominalnog napona naprezanja [5] se zasniva na konceptu da se deformacija u strukturi može pratiti istim putem kao i deformacija u jednoosnom ispitivanju na odgovarajuće izabranom opterećenju definisanom kao nominalno opterećenje. Njegova jednostavnost je zasnovana na činjenici da se detaljna kalkulacija konačnih elemenata ne zahteva pošto ona još uvek koristi koncept analize krajnjih opterećenja za izračunavanje nominalnog opterećenja. Međutim rešenje za  $C^*$  primenom jednačine (4.1.2) koja koristi  $K$ , kao i,  $\sigma_{ref}$  su suštinski izvori razlika koje determinišu izlaze rezultata s određenim odstupanjima, pošto će različiti metodi procene dati veoma različite rezultate.<sup>(21)</sup> Različiti metodi su korišćeni za određivanje  $\sigma_{ref}$  u svim procedurama u zavisnosti od vrednosti upotrebljenog kriterijuma.

Za standardna laboratorijska ispitivanja [13, 90, 113] gde su uzorci za mehaniku loma upotrebljeni za dobijanje karakteristika rasta prskotine na povišenoj temperaturi,  $C^*$  je izvedeno eksperimentalno primenom stope dislokacije linije opterećenja [11] tako da dobijamo:

$$C^* = \frac{P \dot{\Delta}}{B_n W} F \quad (4.1.3)$$

za uzorak debljine  $B_n$  između žleba, i širine  $W$  izložene opterećenju  $P$ . U ovom izrazu  $\dot{\Delta}$  je eksperimentalno izmereno opterećenje stope dislokacije puzanja a  $F$  je bezdimenzioni faktor koji zavisi od osetljivosti puzanja  $n$  i veličine prskotine  $a$  [13, 90, 113]. Najviše podataka se zasniva na eksperimentalnom širenju prskotina usled puzanja jed.(4.1.3) za analizu ali bez pravilne validacije između dva metoda koji možda izražavaju jasnu neusklađenost između rezultata dobivenih jednačinom (4.1.2) i (4.1.3).

<sup>21</sup> Webster, G.A., Nikbin, K., Chorlton, M.R., Celard N.J.C., Ober M., A comparison of high temperature defect assessment methods. Journal of Material High Temperature, Vol.15 (3/4), pp.337-347.

Procena  $\dot{\Delta}$ , i  $\dot{\varepsilon}_f$  korištene u jednačini (4.1.2) i (4.1.3) koja je izvedena iz raspodele eksperimentalnog opterećenja, odnosa opterećenje / istežanje ili opterećenje / lom je takođe faktor koji će determinisati tačnost rezultata procene životnog veka. Možemo zaključiti da za obe vrste podataka, jednoosno puzanje i podaci o širenju prskotina usled puzanja će inherentno sadržati eksperimentalno rasipanje dijapazona koji će trebati da se razmatra u proceduri procene životnog veka<sup>22</sup>.

Iz pregleda prezentovanih standarda pojavljuje se da procena životnog veka zasnovana samo isključivo na proceduralnim i determinističkim proračunima specificiranih u standardu neće bezuslovno dati korektne odgovore. Veoma je značajno da se nove procedure prihvataju s razumevanjem a pristupi prošire s usvajanjem raznih metodologija za predikciju početka stvaranja prskotine usled puzanja kao i njenog daljeg širenja na osnovu determinističkih i probabilističkih tehnika. Takođe je važno da se nove procedure u većoj meri zasnivaju na bazi znanja i iskustvu korisnika. U takvim slučajevima informacije i relevantni saveti mogu se nadograditi tokom vremena iz iskustva stečenog u prethodnim analizama ili iz novih ispitivanja i baza podataka ili direktno iz iskustva iz fabrika [21]. Ova vrsta analize osetljivosti može biti prikladno razvijena primenom interaktivnog metoda izračunavanja. Faze određivanja su:

- I faza – Ulaz 1: definisanje problema – projektovanje ili procena životnog veka
- II faza – Ulaz 2: karakteristike materijala (podaci iz baze podataka ili drugih izvora) – stvarne / srednje / gornje / donje granice podataka
- III faza – Ulaz 3: geometrija: laboratorijska ispitivanja / ispitivanje karakteristika / komponente – oblik loma, veličina
- IV faza – Ulaz 4: napon / opterećenje / istorijat opterećenja / zaostala opterećenja sistema – stvarno / srednje / gornje i donje granične vrednosti.
- V faza – Izlaz: izračunavanje  $K / \Delta K / J / \sigma_{ref} / C^*$  na različitim mestima pukotine – gornje / donje granice u zavisnosti od metoda procene
- VI faza – Provere: statičke provere za brz lom i lomljenje
- VII faza – Provere: analiza puzanja ligamenta razaranjem
- VIII faza – Analiza 1: početak puzanja ili puzanja / zamora
- IX faza – Analiza 2: širenje prskotine usled zamora
- X faza – Analiza 3: širenje prskotine usled puzanja
- XI faza – Analiza 4: interakcija puzanje / zamor
- XII faza – Analiza 5: analiza osetljivosti / komparacija / probabilistička analiza

Ove faze se mogu razviti do detalja da bi se mogle dobro koristiti za različite stvari kao što su opterećenje i strukturalne varijacije.[21] One su opisane nadalje u doktorskoj disertaciji.

<sup>22</sup> Cepic, Z., Kucora, I., Radovanovic, Lj., Desnica, E., Pekez, J., *Analysis of EU states code for life cycle assessment of components exposed to high temperatures*, The 15<sup>th</sup> International Symposium "Young People and Multidisciplinary Research, Timisoara, 14 - 15 November 2013, Editura Politehnica Temisvar, pp. 9-14 (ISSN 1843-6609)

### ***Početne informacije o materijalu – faze 1 ÷ 4***

Faze 1 ÷ 4 su ulazi za fazu informisanja gde je važno podsetiti korisnika o granicama i tačnosti podataka koji će biti primenjeni u fazi izračunavanja. U ostalim procedurama za procenu životnog veka, gde se uzimaju u obzir karakteristike materijala, ističe se pet delova:

- izgradnja sveobuhvatne baze podataka o materijalima iz programa ispitivanja da bi se upotpunile postojeće raspoložive informacije,
- interpretacija podataka iz ispitivanja karakteristika i ispitivanja komponenata ako su raspoloživi,
- interpretacija istorijskih podataka iz aktuelnih komponenata ako su raspoloživi,
- prikupljanje relevantnih karakteristika materijala potrebnih za fazu modelovanja, i
- detaljno poznavanje istorijata rada.

### ***Izračunavanje – faza 5***

Relevantno nominalno opterećenje je određeno upotrebom informacija o primarnom opterećenju u istežanju i savijanju, sekundarnom opterećenju, i maksimalnom opterećenju. Istorijat opterećenja i temperature se treba što bolje analizirati da bi se dobili što verodostojniji podaci za dalji rad. Ove informacije se koriste za procenu ispravnog nominalnog opterećenja koje je relevantno za izračunavanje parametara mehanike loma  $K$ ,  $J$ ,  $\sigma_{ref}$ . Jednačine (4.1.1) i (4.1.2) se koriste za izračunavanje  $C^*$ . U ovoj fazi nepostoji univerzalno prihvaćen metod za određivanje parametara, bitno je da korisnik dobije granice i različite metode za određivanje parametara, kada je moguće. Raspoloživi metodi za procenu relevantnih parametara mehanike loma takođe će obezbediti stepen osetljivosti ovih parametara s obzirom na krajnje kalkulacije. Ove informacije se mogu nadograditi kada se izvrši validacija za pojedine situacije.

### ***Predanalizne provere – faze 6 – 7***

Predanalizna faza je gde se struktura proverava protiv katastrofalnog ligamentnog loma i plastičnog i puzajućeg loma. Ove faze inkrementalno proveravaju status strukture s obzirom na lom i oštećenja usled puzanja. Univerzalno prihvaćene metode [5] su raspoložive da postupaju sa ovim fazama izračunavanja. Pošto se izvrše provere i preporučuje se granice, one zavise od tačnosti karakteristika materijala i metoda izračunavanja  $K$  i  $\sigma_{ef}$ . Sledeći ove faze, faze 8 ÷ 11 postupaju sa početkom prskotine i razvojem širenja prskotine u puzajućem materijalu pod statičkim i cikličnim opterećenjem.

### ***Modeliranje inicijalizacije – faza 8***

Metode analize za inicijalizaciju su ukratko dole opisane. Sve promenljive se trebaju pažljivo proveriti i kompletirati u prethodnoj fazi. Osnovna pretpostavka u analizi jeste prisustvo oštećenja i njegovo širenje usled puzanja i/ili zamora. Faza 8

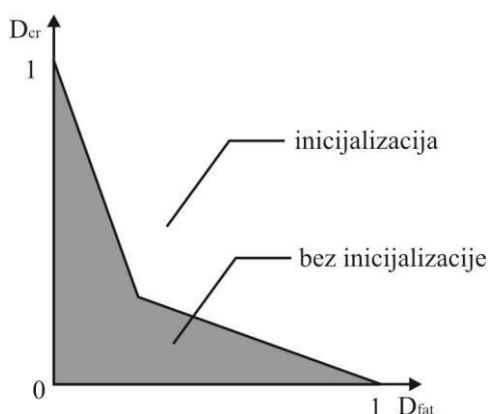
pretpostavlja da se početni deo životnog veka komponente uzima iz širenja oštećenja gde se prskotina ne širi nakon predefinisane dužine. Dužina je uzeta iz granica tačnosti NDT merenja ili je definisana standardom (obično se bira opseg  $100 \div 500 \mu\text{m}$ ). Za potpunija laboratorijska ispitivanja ASTM E1457 preporučuje  $200 \mu\text{m}$ , koji se mogu naći unutar ustaljenog stanja regiona loma [102] za većinu inženjerskih materijala i uslova opterećenja.

Ovaj region inicijalizacije može biti glavni period života i kao rezultat ravnomernog pada praćenog širenjem oštrog loma, što je relativno beznačajno za dužinu prskotine. Prezentovani standardi se bave ovim regionom sa širokom paletom različitih metoda. Uobičajno je za standarde da ne uzimaju u obzir inicijalizaciju kada je prisutan zamor. Predloženi metodi su veoma uspešno primenjeni u različitim Evropskim standardima. Pošto postoji mala univerzalna validacija za obrazloženje izbora jednog metoda u odnosu na drugi, predloženo je uvođenje četiri modela za inicijalizaciju prskotina u ovoj fazi. Predloženi su sledeći modeli:

### **Metod 1: $\sigma_D$ pristup**

Postupak je baziran na izračunavanju akumulacije oštećenja puzanjem i zamorom u oštećenoj strukturi [29, 43] i ovaj metod je produžetak iste metodologije za neoštećene strukture sa izuzetkom da je specifično opterećenje  $\sigma_D$  definisano na specifičnoj distanci od nastalog oštećenja. Metod determiniše opseg izduženja  $\Delta\epsilon_i$ , napon  $\sigma_i$  (bilans za elastični + plastični + puzajući napon) na distanci  $D$ , koji zavisi od materijala i obično se uzima oko  $50\mu\text{m}$  od pojave oštećenja. Oštećenje puzanjem se determiniše kalkulacijom opsega opterećenja za sve cikluse u životnom veku  $N_L$ . Broj ciklusa do pojave oštećenja za svaki opseg opterećenja determiniše se iz podataka otpornosti na zamor.

I na kraju svi odnosi brojeva ciklusa izraženi za svaki opseg opterećenja preko maksimalnog broja ciklusa su sumirani prema opsegu opterećenja. Kalkulacija za oštećenje puzanjem je ista kao i za zamor samo što kalkulacija oštećenja uključuje elastični, plastični i puzajući napon. Oštećenje puzanjem je determinisano za sve cikluse, a vremena oštećenja do istrošenja su determinisana iz količnika sume svih odnosa brojeva ciklusa. Ako se količnik zamora i puzanja ( $D_{fat}$ ,  $D_{cr}$ ) nalazi unutar dijagrama interakcije puzanje – zamor neće doći do pojave kao što je prikazano na slici 4.1.1. Ako dođe do pojave onda se vreme pojave  $t_f$  determiniše kroz iterativne procedure. Poslednja tačka na preseku granica do pojave, determiniše vremenski određene cikluse do pojave.



Slika 4.1.1. Primer dijagrama interakcije puzanje - zamor

**Metod 2:  $\delta_I/C^*$  pristup za nastajanje**

U ovom metodu mehanika loma bazirana na nelinearnom modelovanju upotrebljava se za analizu perioda nastajanja širenja malih oštećenja [4, 5]. Ovaj metod koristi nominalno opterećenje za procenu  $C^*$  i pretpostavlja da opterećenje koje dovodi do oštećenja može opisati stacionarnim stanjem  $C^*$ . Ako su eksperimentalni podaci raspoloživi vreme nastajanja  $t_I$  se može odrediti prema [4, 5]:

$$R' = \left( \frac{K}{\sigma_{ref}} \right)^2 \quad (4.1.4)$$

$$t_I = \left[ \frac{(\delta_I / R')^{n/(n+1)} - \sigma_{ref} / E}{D\sigma_{ref}^n} \right]^{1/p} \quad (4.1.5)$$

gde je:  $\delta_I$  – istisnina otvarajućeg oštećenja prilikom pojave (zavisi od materijala),  
 $E$  – Young-ov modul,  $i$   
 $D, n, p$  – karakteristike puzanja materijala.

Vreme inkubacije je merljivo iz uzoraka a upoređuje rezultate ispitivanja uzoraka sa datim komponentama [4, 5]:

$$\left( \frac{t_{Icomp}}{t_{I spec}} \right) = \left( \frac{C_{spec}^*}{C_{comp}^*} \right)^{n/(n+1)} \quad (4.1.6)$$

gde je  $t_{Icomp}$  – nepoznato vreme do nastajanja za komponentu,  
 $t_{I spec}$  – je poznato vreme do nastajanja za uzorak,  $i$   
 $C_{comp}^*$  – je poznati parametar koji definiše stopu širenja oštećenja usled puzanja za komponentu.

Ako je prisutan zamor onda se za vreme nastajanja uzima nula.

**Metod 3: dvokriterijumski pristup**

Ovaj metod [33, 34] je samo relevantan za nastajanje puzanja i ne razmatra zamor materijala. Nastajanje se dobija ako tačka leži u specifičnom dvokriterijumskom dijagramu, koji zavisi od materijala ili manje od karakteristika grupe materijala. Ono upoređuje oštećenje ligamenata naspram vrste loma materijala gde je [33, 34]:

$$R_K = K/K_I$$

$$R_\sigma = \sigma_{no}/R_{mt}$$

ovde je:  $\sigma_{no}$  – nominlno opterećenje u udaljenijoj zoni ranije oštećene komponente (potpuno preraspodeljeno opterećenje),  
 $R_{mt}$  – je otpornost na puzanje ravnomerno napregnutog uzorka (funkcija vremena, npr. za  $10^4$  h),  
 $K$  – je elastična vrednost na mestu oštećenja komponente,

$K_I$  – je vrednost  $K$  na mestu nastajanja oštećenja puzanjem eksperimentalno određena kao funkcija od vremena, (npr. za  $10^4$  h).

Ako je prisutan zamor onda se za vreme nastajanja uzima nula.

#### **Metod 4: $C^*$ prelazni metod**

Ovaj metod takođe koristi principe mehanike loma za određivanje potrebnog vremena za oštećenje puzanjem akumuliranog na mestu loma počevši prvo od inicijalnog elastičnog naprezanja [58, 113]. Uglavnom stacionaran rast oštećenja puzanjem  $\dot{a}$  se može povezati na zadovoljavajući način u pogledu  $C^*$  s relacijom [58, 113]:

$$\dot{a} = D_o C^{*\Phi} \quad (4.1.7)$$

gde su  $D_o$  i  $\Phi$  konstante materijala koje se mogu eksperimentalno odrediti primenom NSW modela [90] zasnovanom na modelu zone puzanja. Jednačina (4.1.7) se može aproksimirati na [58, 113]:

$$\dot{a}_s = \frac{3C^{*0.85}}{\varepsilon_f^*} \quad (4.1.8)$$

gde je:  $\dot{a}_s$  - stacionarna stopa rasta oštećenja u mm/h,

$\varepsilon_f^*$  - napon oštećenja kao količnik, i

$C^*$  - je u MJ/m<sup>2</sup>h.

Relevantna istegljivost potrebna za širenje oštećenja je  $\varepsilon_f^* = \varepsilon_f$  (jednoosna istegljivost) i ona se može redukovati u granicama putem sledećeg faktora  $\varepsilon_f^* = \varepsilon_f / 30$  u ravni stacionarnog režima. Ovaj opseg opisuje uticaj ograničenja na rast oštećenja usled karakteristika materijala i geometrijskih faktora.

Početna faza oštećenja prema stacionarnom širenju izražava prelaznu pojavu [13, 58, 90, 91, 113] usled stvaranja oštećenja kod prskotine prema nastanku karakteristika oblika. Ovo može dovesti do perioda stvaranja (kao što je prikazano na sl.4.1.1) pre nego što se može merenjem otkriti oštećenje [58]. Ako se minimalno širenje oštećenja može pouzdano rešiti preko  $\Delta a$  onda je period inkubacije  $t_i$  dat sledećim izrazom [58]:

$$t_i = \int_0^{\Delta a} \frac{dr}{\dot{a}} \quad (4.1.9)$$

gde je  $dr$  rastojanje od pojave oštećenja. Granice za  $t_i$  se mogu dobiti predstavljanjem stope oštećenja njegovom početnom vrednošću  $\dot{a}_o$ , a njena stacionarna vrednost je  $\dot{a}_s$ . Početna stopa oštećenja se može aproksimirati prema stacionarnoj stopi u jednačini (4.1.7) s [58, 113]:

$$\dot{a}_o = \dot{a}_s / (n+1) \quad (4.1.10)$$

Vrednost  $n$  za većinu materijala je obično u opsegu  $5 \div 10$ , ono sugerise da je  $\dot{a}_o$  aproksimativno po redu veličine manje nego vrednost njegovog stacionarnog stanja.

Tako da na taj način jednačina (4.1.7) za uslove stacionarnih stanja daje niže vrednosti za period inkubacije [58, 113]:

$$t_{iL} = \Delta a / DC^{*Q} \quad (4.1.11)$$

ili primenjujući aproksimativno jednačinu (4.1.8) [58, 113]:

$$t_{iL} = \frac{\Delta a \varepsilon_f^*}{3C^{*0.85}} \quad (4.1.12)$$

Alternativno ako se period inkubacije određuje iz inicijalne prelazne stope stvaranja pukotina  $\dot{a}_o$ , dobivene iz jednačine (4.1.10) aproksimativna gornja granica  $t_{iU}$  za vreme početka dobija oblik [58, 113]:

$$t_{iU} = \frac{(n+1)\Delta a \varepsilon_f^*}{3C^{*0.85}} \quad (4.1.13)$$

U jednačinama (4.1.11 ÷ 4.1.13) period inkubacije je proporcionalan  $\Delta a$ . Limit pouzdanog otkrivanja prskotine je najbolji na  $\pm 100 \mu\text{m}$  (što je podešeni nivo za standardna CT ispitivanja u ASTM E1457-98) i ponekad može biti veći i do 0.5 mm. Ovaj opseg je analiziran u istraživanju.

### ***Modelovanje puzanja i širenja oštećenja usled puzanja/zamora – faza 9 ÷ 11***

Pošto se ovaj deo disertacije isključivo bavi razmatranjem procedura za procenu stvaranja oštećenja i širenjem oštećenja, sledeći deo će se uglavnom baviti poređenjem različitih standarda s aspekta njihovih metodologija u postupanju s problemima stvaranja oštećenja puzanjem i širenjem pod statičkim i cikličnim opterećenjem. Odnos dat u jednačini (4.1.7) za procenu širenja oštećenja je isti u svim standardima.

Na sobnoj temperaturi pod cikličnim uslovima opterećenja, širenje oštećenja obično nastaje mehanizmom zamora gde Paris-ov zakon može opisati ciklus širenja oštećenja  $(da/dN)_F$  u pogledu opsega faktora intenziteta opterećenja  $\Delta K$  pomoću [33]:

$$\left( \frac{da}{dN} \right)_F = C \Delta K^m \quad (4.1.14)$$

gde su  $C$  i  $m$  parametri koji zavise od materijala, koji može biti osetljiv na koeficijent  $R$  od minimalnog do maksimalnog opterećenja ciklusa. Na povišenim temperaturama mogu nastati kombinacije puzanja i širenja oštećenja usled zamora. Prethodne studije su pokazale da se zakon jednostavnog kumulativnog oštećenja može upotrebiti za opisivanje ovih karakteristika. Zakon tvrdi da se ukupno oštećenje širenje / ciklus  $(da/dN)$  može dobiti iz [33]:

$$\left( \frac{da}{dN} \right) = C \Delta K^m + \dot{a} / f \quad (4.1.15)$$

gde je  $f$  – frekvencija,  $\dot{a}$  – komponenta puzanja oštećenja koja se može dobiti iz jednačine (4.1.7) ili iz nekih prethodnih modela širenja oštećenja usled puzanja [113]. Zato određivanje stope širenja oštećenja prema jednačini (4.1.7) i (4.1.15) postaje [33]:

$$\left( \frac{da}{dN} \right)_c = \int_0^{t_n} \dot{a} [C^*(a)] dt \quad (4.1.16)$$

gde se vrednost parametra  $C^*$  može uzeti kao početak vremena zadržavanja na gornjoj granici ali izrazi koji su raspoloživi za njegovo određivanje su pod uslovima kontrolisanog pomaka. Dva činioca u jednačini (4.1.15) su sumirani u toku ciklusa rada, ažuriranje veličine oštećenja je neophodno. Zakon kumulativnog linearnog oštećenja se koristi za analizu i usvajanje malih oštećenja ili oštećenja bez interakcija između vremenski zavisnog puzanja i vremenski nezavisne komponente zamora.

### ***Pregled rezultata i osetljivosti (tačnosti) analize – faza 12***

Poređenja, provere i saveti za korisnike treba da budu uključeni u svaku fazu. Ova faza je nazvana analiza osetljivosti gde se korisnik navodi da proceni rezultate menjajući ulaze i metode za kalkulaciju u fazama 1 ÷ 5. Upotreba gornjih / donjih granica će obelodaniti za korisnika osetljivost predviđanja. Implementacija probablističkih metoda procene [20, 82] je samo jedna od opcija u sistemu baze znanja (KBS) koja se treba implementirati. KBS u okviru HIDA projekta je napisana na takav način da omogućava fleksibilnost u implementaciji dodatnih modula u cilju proširenja mogućnosti analize i procene KBS u budućnosti. Pogotovo kada se razvijaju probablističke metode u okviru KBS koje treba da se prilagode novim kalkulacijama.



## 4.2 Procena preostalog životnog veka prema API RP 530 (ISO 13704)

Ovo poglavlje objašnjava jedan od načina procene oštećenja cevi i preostalog životnog veka. Pošto su neodređenosti uključene u ovaj proračun, odluka o povlačenju cevi iz upotrebe ne treba da se bazira samo na osnovu ovih kalkulacija. Potrebno je uzeti u obzir i druge faktore kao što su debljina zida cevi i povećanje prečnika cevi, koji treba da imaju prioritet u donošenju odluka o povlačenju cevi iz upotrebe.

Postoje tri glavne oblasti neodređenosti u ovom proračunu. Prvi, za procenu akumulisanog oštećenja cevi (koeficijent dotrajalosti cevi), gde se zahteva aproksimacija radne istorije. Istorija mora obuhvatati: radni pritisak, temperaturu materijala cevi, i koeficijent korozije. Neodređenosti kod ovih faktora, pogotovo kod temperature, mogu imati značajan uticaj na procenu. Drugi, poznavanje aktuelnog napona na granici kidanja za datu cev nije pouzdano. Na kraju, proračun oštećenja cevi koristi zakon linearnosti oštećenja, gde ograničenja hipoteze nisu u potpunosti razumljiva. Uprkos svim ovim neodređenostima, procena koja se izvodi korišćenjem opisane procedure u ovom poglavlju može pružiti informacije koje mogu pomoći u donošenju odluka o preinačavanju nominalnih karakteristika i povlačenju cevi iz upotrebe.

Suština ove procedure se ogleda u sledećem [8]:

- istorijat rada se deli u periode u kojima su: pritisak, temperatura materijala cevi i stopa korozije konstantni,
- za svaki od ovih perioda određuje se stopa dotrajalosti cevi,
- suma stopa dotrajalosti cevi predstavlja ukupno akumulirano oštećenje cevi,
- preostali životni vek se dobija oduzimanjem ove sume od celine, i
- preostali životni vek se transformiše u procenjeni očekivani životni vek za odgovarajuće uslove eksploatacije.

Procedure za određivanje se najbolje mogu objasniti kroz primere. Za ovaj primer, usvajaju se sledeći uslovi:

- materijal – 8Cr-10NiCb (Tip 347) prohromski čelik,
- spoljni prečnik – 168.3 mm,
- početna minimalna debljina – 6.8 mm,
- istorijat rada dat u tabeli 4.2.1,
- periodi rada ne moraju biti jednaki,
- radni pritisak i temperatura nisu konstantni, ali se u toku jednog perioda uzimaju za konstantne,
- usvojene vrednosti za jedan period moraju predstavljati tipične vrednosti,

- dužina perioda zavisi od varijacije pritiska i temperature, i
- istorijat promene debljine zida se mora aproksimirati.

Istorijat kretanja debljine zida se obično dobija iz merenja debljine pre prvog pokretanja postrojenja ili prilikom zamene cevi, i tokom redovnog pregleda cevi. Za sve ove procene usvaja se da spoljni prečnik ostaje konstantan.

Tabela 4.2.1. Aproksimirani istorijat rada

PERIOD RADA	TRAJANJE	RADNO OPTEREĆENJE	TEMPERATURA CEVI	MINIMALNA DEBLJINA			
				na početku		na kraju	
	[godina]	[Mpa]	[ °C]	[in]	[mm]	[in]	[mm]
1.	1.3	3.96	649	0.268	6.81	0.252	6.40
2.	0.6	4.27	665	0.252	6.40	0.244	6.20
3.	2.1	4.07	660	0.244	6.20	0.217	5.51
4.	2.0	4.34	665	0.217	5.51	0.190	4.83

Ove informacije se mogu upotrebiti za određivanje koeficijenta životnog veka prikazanog u tabeli 4.2.2.

Tabela 4.2.2. Koeficijent životnog veka za svaki period

PERIOD RADA	PROSEČNO OPTEREĆENJE	Larson – Miller-ove vrednosti		VREME DO POJAVE OŠTEĆENJA			
		minimalna	prosečna	pri minimalnom opterećenju		pri prosečnom opterećenju	
	[Mpa]	[ °C]	[ °C]	[godina]	[k.ž.v]	[godina]	[k.ž.v]
1.	48.25	19.06	19.48	54.0	0.02	154.8	0.01
2.	54.91	18.83	19.25	13.1	0.05	35.8	0.02
3.	56.66	18.77	19.19	15.0	0.14	42.1	0.05
4.	68.78	18.41	18.83	4.7	0.43	13.1	0.15
Akumulirano oštećenje					0.64	0.23	

Za korodirane cevi može se razviti jednačina za koeficijent životnog veka koja je slična jednačini [8]:

$$F(T) = \frac{t_s^n}{(n-1)RL_d} \left[ \left( \frac{1}{t_0 - RT} \right)^{n-1} - \left( \frac{1}{t_0} \right)^{n-1} \right] \quad (4.2.1)$$

međutim to nije potrebno, pošto se postiže dovoljna tačnost za ovaj proračun korišćenjem prosečnog opterećenja za svaki period (prosečno opterećenje na početku i kraju perioda).

Minimalne i prosečne vrednosti za Larson-Miller-ov parametar u tabeli 4.2.2. su dobivene iz prosečnog opterećenja primenom Larson-Miller-ovih krivih za minimalni i prosečni napon na granici kidanja (sa dijagrama za materijal 347).

Sa ovim vrednostima Larson-Miller-ovih parametara i temperaturom materijala cevi za svaki period, izraz za Larson-Miller-ov parametar je rešen za vreme loma prema izrazu sa dijagrama 4S iz API 530, tj. izraz 4.2.2.

Pošto izraz predstavlja vreme loma, vrednost se mora pretvoriti u godine. Rezultujuća vremena zasnovana na minimalnom i prosečnom naponu na granici kidanja prikazana su u tabeli 4.2.2.

Sledeći primer ilustruje način određivanja vremena minimalnog napona na granici kidanja za prvi period rada. Jednačina se rešava kao:

$$(T_d + 273)(C + \log l_{10} L_d) \times 10^{-3} \quad (4.2.2)$$

$$(T_d + 273)(C + \log l_{10} L_d) \times 10^{-3}$$

$$19.06 = (648 + 273)(15 + \log L_r) \times 10^{-3}$$

$$\log L_r = 5.67$$

$$L_r = 4.73 \times 10^5 \text{ h} = 54 \text{ god.}$$

Koeficijent životnog veka je jednostavno rečeno količnik vremena rada i vremena do pojave loma koje odgovara tom periodu. Koristeći vreme minimalnog napona na granici kidanja (gore određeno), koeficijent za prvi red u tabeli 4.2.2 je  $1.3/54=0.02$ , dok je akumulirano oštećenje suma koeficijenata.

Uticao nepouzdanosti napona na granici kidanja je evidentna u tabeli 4.2.2. Ako je aktuelni napon na granici kidanja ove cevi u donjem delu opsega disperzije (blizu minimalnog napona na granici kidanja), tada će 64% životnog veka cevi biti iskorišćeno. Ako je aktuelno naprezanje u sredini opsega disperzije (blizu prosečnog napona na granici kidanja), tada je samo iskorišćeno 23% životnog veka cevi. Ako je aktuelni napon na granici kidanja veći, čak postoji i manjak iskorišćenja životnog veka cevi.

Uticao nepouzdanosti radne temperature je takođe razmatran. Pretpostavimo da je stvarna temperatura materijala cevi bila veća za 5°C od one prikazane u tabeli 4.2.1. Za procenu uticaja ove razlike kalkulacija koeficijenta životnog veka u tabeli 4.2.2 je izvedena sa nešto višim temperaturama. Odgovarajući koeficijenti akumuliranog oštećenja su 0.81 i 0.28 respektivno. Oni se moraju uporediti sa vrednostima 0.64 i 0.23 koje su prethodno već određene.

Koeficijent preostalog životnog veka se određuje na sledeći način:

- za minimalni napon na granici kidanja  $1-0.64=0.36$
- za prosečni napon na granici kidanja  $1-0.23=0.77$

Sada se nameću sledeća pitanja:

- Koji je procenjeni životni vek cevi za dati pritisak, temperaturu cevi i stopu korozije ?
- Kojoj temperaturi se cev može izložiti da bi mogla podneti minimalni period vremena za specificirani radni pritisak i stopu korozije ?
- Koliko treba umanjiti radni pritisak ili temperaturu materijala cevi da bi se produžio očekivani životni vek cevi za dati procenat ?

Za ovaj primer očekivani uslovi eksploatacije su:

- radni pritisak – 4.27 Mpa,
- temperatura materijala cevi – 660 °C, i
- stopa korozije 0.33 mm/god.

Iz ovih vrednosti se može dobiti tabela za koeficijente životnog veka koja se u tabeli 4.2.3 odnosi na minimalni napon na granici kidanja, a u tabeli 4.2.4 na prosečni napon na granici kidanja. Kao i ranije, i ovde je prosečno opterećenje, opterećenje na početku i kraju svakog perioda rada.

Pošto cev u ovom primeru korodira, procena životnog veka se određuje u koracima. U ovom primeru je korišćen raspon od godinu dana. Kao što se može i videti iz ovih tabela, procenjeni životni vek ovih cevi je između 1.5 i 4.5 godina. Ako je napon na granici kidanja u gornjem delu opsega disperzije (iznad prosečnog napona na granici kidanja), procenjeni životni vek će biti duži.

Za cevi koje ne korodiraju, procena životnog veka je daleko lakša. Životni vek se određuje isto kao i gore iz procenjenog opterećenja i temperature. Preostali životni vek je jednostavno rečeno preostalo vreme do pojave oštećenja. U ovakvim slučajevima tabele kao što su 4.2.3 i 4.2.4 nisu potrebne.

Gore dat primer predstavlja odgovor na prvo pitanje. Za odgovor na drugo postavljeno pitanje će se koristiti pritisak i stopa korozije da bi se odredilo prosečno opterećenje na osnovu kojeg će se dobiti Larson-Miller-ove vrednosti sa krivi predstavljenih na slikama 4A-4S u API RP 530 standardu. Sa ovim vrednostima i vremenom do pojave oštećenja koje je određeno deljenjem zahtevanog vremena sa koeficijentom preostalog životnog veka, jednačina Larson-Miller-ovog parametra se može rešiti za maksimalnu temperaturu. Ostali odgovori se mogu dobiti na sličan način.

*Tabela 4.2.3. Budući koeficijenti životnog veka – minimalno opterećenje*

VREME	MINIMALNA DEBLJINA		PROS. OPT.	MINIMLANA LM – vrednost	VREME DO OŠTEĆENJA	KOEUF.	PREOSTALI KOEF.
	[in]	[mm]					
[godina]			[MPa]	[ °C]	[godina]	/	/
0	0.190	4.83	-	-	-	-	0.36
1	0.177	4.50	75.99	18.25	4.1	0.24	0.12
1.5	0.171	4.34	79.19	18.14	3.1	0.16	-0.04

*Tabela 4.2.4. Budući koeficijenti životnog veka – prosečno opterećenje*

VREME	MINIMALNA DEBLJINA		PROS. OPT.	MINIMLANA LM – vrednost	VREME DO OŠTEĆENJA	KOEUF.	PREOSTALI KOEF.
	[in]	[mm]					
[godina]			[MPa]	[ °C]	[godina]	/	/
0	0.190	4.83	-	-	-	-	0.77
1	0.177	4.50	74.99	18.66	11.4	0.09	0.68
2	0.164	4.17	80.87	18.53	8.2	0.12	0.56
3	0.151	3.84	87.74	18.37	5.5	0.18	0.38
4	0.138	3.51	95.84	18.22	3.8	0.26	0.12
4.5	0.132	3.35	102.76	18.07	2.6	0.19	-0.07

### 4.3 Procena preostalog životnog veka prema API RP 579 standardu

Deseto poglavlje standarda API 579 opisuje procedure za procenu pogodnosti za upotrebu procesne opreme koja radi u režimu eksploatacije koji izaziva puzanje. Temperaturne granice pri kojima se pojavljuje puzanje su date u tabeli 4.3.1 za različite materijale. Procedure opisane u ovom poglavlju se upotrebljavaju za procenu stanja opreme u smislu: da li oprema može nastaviti sa radom u postojećim uslovima eksploatacije, ili je potrebno preinačavanje nominalnih karakteristika.

*Tabela 4.3.1. Temperaturne granice pri kojima se pojavljuje puzanje za različite materijale [API 579]*

MATERIJAL		GRANIČNA TEMPERATURA	TVRDOĆA PO BRINELL-U	SADRŽAJ UGLJENIKA
		[°C]	[HB]	[%]
Ugljenični i niskolegirani čelici	Carbon Steel UTS ksi $\leq$ (60)	343	95	
	Carbon Steel UTS ksi $>$ (60)	371	100	
	Carbon Steel - Graphitized	371	100	
	C – ½Mo	399	110	
	1 - ¼Cr – ½Mo Normalized & Tempered	427	130	
	1 - ¼Cr – ½Mo Annealed	427	120	
	2 - ¼Cr – 1Mo Normalized & Tempered	427	140	
	2 - ¼Cr – 1Mo Annealed	427	130	
	2 - ¼Cr – 1Mo Quenched & Tempered	427	150	
	2 - ¼Cr – 1Mo – V	441	180	
	3Cr – 1Mo – V	441	180	
	5Cr – ½Mo	427	130	
	7Cr – ½Mo	427	130	
	9Cr – 1Mo	427	140	
	9Cr – 1Mo – V	454	180	
12Cr	482	180		
Austenitni i visokolegirani čelici	AISI Type 304 & 304H	510		0.04
	AISI Type 316 & 316H	538		0.04
	AISI Type 321	538		0.04
	AISI Type 321H	538		0.04
	AISI Type 347	538		0.04
	AISI Type 347H	538		0.04
	Alloy 800	565		0.03
	Alloy 800H	565		0.04
	Alloy 800HT	565		0.05
	HK-40	649		0.30

Procedure za procenu pogodnosti upotrebe za elemente koji rade u režimu eksploatacije koji izaziva puzanje zahtevaju i procenu preostalog životnog veka. Definisane su procedure za elemente kod kojih se pojavljuje ili ne pojavljuje naprslina a koji su izloženi stalnim ili cikličnim uslovima eksploatacije. Ako element sadrži naprslinu i nije izložen uslovima eksploatacije koji izazivaju puzanje mogu se primeniti procedure iz 9. poglavlja API 579 standarda za procenu pogodnosti za upotrebu. Naravno, primena ovih procedura se ne zahteva za opremu koja je projektovana prema priznatim standardima i koja radi u okviru projektovanih uslova eksploatacije. Uslovi eksploatacije koji opravdavaju primenu procene pogodnosti za upotrebu obuhvataju:

- eksploataciju koja rezultuje porastom pritiska i temperature, ili druge vrste opterećenja koja može izazvati oštećenje puzanjem, a nije obuhvaćena originalnim projektom,
- gubitak materijala elementa iznad granica propisanih projektom; gubitak materijala će ovde rezultovati porastom opterećenja dela van vrednosti obuhvaćenih proračunom,
- oštećenje vatrom koje može prouzrokovati kratkotrajno pregrevanje,
- otkrivanje naprslina; naprsline tokom izrade i eksploatacije, i
- otkrivanje lokalnih istanjenja zidova, rupičasta korozija, ekscentričnost prilikom varenja, ispupčenja, udubljenja, ili njihova kombinacija koja može rezultovati lokalnom akumulacijom napona usled puzanja i subsekventnim prskotinama; potrebno je izvršiti procenu usled uočenih grešaka tokom izrade, a i tokom eksploatacije.

### **Primenljivost i ograničenja procedure**

**Prvostepena procena** se zasniva na komparaciji radnih uslova sa nižim granicama temperature pojave puzanja. Osim toga, izvode se provere tvrdoće, sadržaja ugljenika i vizuelna ispitivanja u cilju procene mogućnosti oštećenja puzanjem na osnovu deformacije komponente, promene boje ili nastajanja naslaga. Prvostepena procena se primenjuje samo ako su zadovoljeni sledeći uslovi [API 579]:

- a. principi projektovanja da su u skladu sa sledećim standardima:
  - ASME B&PV Code, Section VIII, Division 1,
  - ASME B&PV Code, Section VIII, Division 2,
  - ASME B&PV Code, Section I,
  - ASME B31.3 Piping Code,
  - ASME B31.1 Piping Code,
  - API 650, i
  - API 620.
- b. deo nije izložen višim režimima rada od onih propisanih projektom,
- c. gubitak materijala da je manji od propisanog projektom,

- d. da deo nije izložen požaru, ili ako je bio izložen požaru tada moraju da budu zadovoljene propisane procedure iz 11. poglavlja standarda,
- e. da komponente ne sadrže:
  - lokalna istanjenja zidova ili prskotine oblika žljeba,
  - rupičastu koroziju (pitting),
  - ekscentričnost prilikom varenja, ekscentričnost, ili ispupčenja koja su van tolerancija datih projektom,
  - udubljenja ili kombinaciju ispupčenja i udubljenja, i
  - prskotine.

**Drugostepena procena** se može koristiti za opšte strukture omotača gde se opterećenje komponente može lako odrediti primenom teorije elastičnosti, čak i iz zatvorenih struktura (cilindrični omotači, ili cevi peći) ili iz analize konačnih elemenata. Drugostepena procena se primenjuje samo ako su zadovoljeni sledeći uslovi:

- a. principi projektovanja da su u skladu sa gore pomenutim standardima,
- b. istorijat rada,
- c. da su komponente izložene manjem broju ciklusa od 100 uključujući tu pokretanje i zaustavljanje postrojenja,
- d. da komponente nemaju neka od gore pomenutih oštećenja, i
- e. da se iz karakteristika materijala izloženih puzanju može odrediti preostali životni vek.

**Trećestepena procena** se može upotrebiti za procenu onih slučajeva koji ne odgovaraju prethodnim procenama. Potrebna je detaljna analiza opterećenja da bi se procenilo oštećenje nastalo puzanjem ili širenje oštećenja na većim strukturalnim diskontinuitetima. Trećestepena procena se izvodi kada se ne može izvesti prvostepena ili drugostepena procena, ili kada ove procene daju krajnje konzervativne rezultate. Uslovi koji obično iziskuju trećestepenu procenu obuhvataju sledeće:

- potrebu za naprednim tehnikama analize naprezanja u cilju definisanja stanja naprezanja zbog komplikovane geometrije i/ili uslova opterećenja,
- izloženost komponenti cikličnim opterećenjima, i
- komponente sadrže gore pomenuta oštećenja. Detaljne procedure za procenu su date za slučaj prskotina; međutim, ove procedure se ne mogu primenjivati za procenu prskotina nastalih usled korozije, oksidnog zaklinjenja, ili sličnih pojava u radnom okruženju.

### **Određivanje preostalog životnog veka**

Određivanje preostalog životnog veka je potrebno za sve komponente koje rade u uslovima eksploatacije koji izazivaju puzanje. Naponska stanja za procedure prvostepene i drugostepene procene gde su komponente izložene takvim opterećenjima mogu se odrediti primenom linearne analize elastičnosti, i u takvim slučajevima se ne dešavaju značajnije preraspodele napona. Osim toga, ove procedure za procenu su

ograničene na komponente koje nisu izložene cikličnom radu i/ili na komponente koje nemaju oštećenja oblika prskotina.

Ovde opisane procedure za procenu omogućuju najbolju procenu integriteta strukture komponente koja radi na povišenim temperaturama. U standardu API 579 predstavljeno je pet procedura.

1. **Životni vek materijala do oštećenja usled puzanja** – Ova procedura procene se koristi za komponente izložene stacionarnim uslovima rada u režimu puzanja koje ne sadrže oštećenja oblika prskotina. Za ovu procenu se preporučuje primena nelinearne analize napona. A u slučaju primene linearne analize napona preporučuje se primena sledećih standarda:
  - ASME Code, Section III, Subsection NH,
  - Nuclear Electric R-5,
  - BS 7910,
  - EPRI Remaining-Life of Boiler Pressure Parts-crack Growth Studies,
  - WRC 440 A Synthesis of the Fracture Assessment methods proposed in the French RCC-MR Code for High Temperature.
2. **Interakcija puzanja i zamora materijala** – Ova procedura procene se koristi za komponente koje su izložene cikličnom radu u režimu puzanja i koje nemaju oštećenja oblika prskotina. Za ovu procenu se preporučuje primena nelinearne analize napona.
3. **Širenje naprsline uzrokovane puzanjem** – Ova procedura se koristi za oba radna stanja (stacionarno i ciklično) za komponente u režimu puzanja koje sadrže prskotine. Za ovu procenu se preporučuje primena nelinearne analize napona.
4. **Izvijanje usled puzanja** – Ova procedura procene se može koristiti za određivanje vremena u kome se komponenta u režimu puzanja može izložiti strukturalnoj nestabilnosti zbog kompresivnog polja napona. Procedura se može koristiti za komponente sa i bez prskotine.
5. **Procena zamora materijala različitih zavarenih spojeva usled puzanja** – Ova procedura se može koristiti za procenu pogodnosti različitih zavarenih spojeva komponenti koje rade u režimu puzanja.



## 4.4 Komparacija rezultata procene životnog veka dobivenih metodom Omega, API 530 i API 579

Peć je izložena kratkotrajnom prekoračenju temperature. Preduzeće želi da zna koliko je dodatnog oštećenja nastalo na cevima, da bi saznali kako prekoračenje temperature utiče na preostali životni vek cevi. Informacija će se iskoristiti za donošenje odluke: da li je potrebno da se po izvođenju peći izvrši zamena dotrajalih cevi ili peć može da se koristi još neki ciklus. Potrebno je izvršiti procenu pogodnosti upotrebe za još jedan ciklus rada.

Podaci o materijalu cevi:

- materijal – SA-335 Grade P22 Year 1998
- radni uslovi – 210 psig na 1115 °F – 14 bar na 601.7 °C
- spoljni prečnik – 8.625 in – 219 mm
- debljina zida cevi – 0.322 in – 8.179 mm
- dozvoljeni stepen korozije – 0.10 in – 2.54 mm
- efikasnost zavarenog spoja – 1.0
- slobodna dužina – 144 in – 3657.6 mm
- vreme u radu (j=1) – 131400 h
- vreme u radu (j=2) – 336 h
- buduće očekivano vreme u radu (j=1) – 43800 h

Podaci o prekoračenju:

- pritisak – 210 psig – 14.5 bar
- temperatura – 1220 °F – 660 °C
- vreme – 336 h

### Rezultati izvedenog pregleda

Nema vizuelnih oštećenja cevi, nema ispućenja, gubitka materijala, ili prekomernih naslaga. UZ merenje debljine je pokazalo gubitak materijala u okviru dozvoljenog stepena korozije. Iz uvida u istorijat rada peći, ovo je bilo prvo prekoračenje temperature u oblast puzanja materijala. Nema znakova topljenja u radijacionoj sekciji ložišta.

Izvešće se prvostepena procena za komponente izložene puzanju. Svaka komponenta se mora analizirati zasebno. U ovom primeru, krivljenje cevi je nastalo izvan radijacione sekcije ložišta, tako da će se samo analizirati cilindrični deo cevi. Pretpostavimo da su cevi dobro uležištene na nosačima i da je obodni (površinski) pritisak ograničavajući faktor za projektovanje.

**Prvostepena procena**

- a.) **I korak** - Određivanje maksimalne radne temperature, pritiska i vremena trajanja prekoračenja radnih parametara. Pošto komponenta ne sadrži znakove topljenja materijala, onda nije neophodno dodati 25° maksimalnoj temperaturi. Izložilac „j” označava sa vrednošću 1 normalne radne uslove (projektovane), a sa 2 prekoračenje temperature.

$$T_{\max}^1 = 1115 \text{ }^\circ\text{F} - 601.7 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$P_{\max}^1 = 210 \text{ psig} - 14 \text{ bar}$$

$$time_{total}^1 = 131400 + 43800 = 175200 \text{ h}$$

$$T_{\max}^2 = 1220 \text{ }^\circ\text{F} - 660 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$P_{\max}^2 = 210 \text{ psig} - 14 \text{ bar}$$

$$time_{total}^2 = 336 \text{ h}$$

- b.) **II korak** – Određivanje nominalnog napona za komponente u svakom režimu rada definisanom u I koraku primenom Anexa A API 579. Izračunati nominalni napon treba da obuhvati i uticaje smanjenja debljine zida usled prolaska procesnog fluida.

Definicija opštih varijabli [12]:

$$R = \frac{OD}{2} - t_{nom} + FCA = \frac{8.625}{2} - 0.322 + 0.1 = 4.0905 \text{ in}$$

$$t_c = t_{nom} - FCA = 0.375 - 0.1 = 0.275 \text{ in}$$

Suplementarni naponi se ne razmatraju.

Površinski napon cilindričnog omotača [12]:

$$\sigma_m^c = \frac{P}{E} \left( \frac{R}{t_c} + 0.6 \right)$$

$$\sigma_m^c = \frac{210}{1.0} \left( \frac{4.0905}{0.222} + 0.6 \right)$$

$$\sigma_m^c = 3995 \text{ psi}$$

Longitudinalni napon cilindričnog omotača [12]:

$$\sigma_m^L = \frac{P}{2E} \left( \frac{R}{t_c} - 0.4 \right)$$

$$\sigma_m^L = \frac{210}{2(1.0)} \left( \frac{4.0905}{0.222} - 0.4 \right)$$

$$\sigma_m^L = 1893 \text{ psi}$$

$$\sigma_{\max} = \max(\sigma_m^c, \sigma_m^L)$$

$$\sigma_{\max} = \max(3995, 1893)$$

$$\sigma_{\max} = 3995 \text{ psi}$$

- c.) **III korak** – Utvrđivanje vrste materijala od kojeg je deo izrađen i pronalaženje krivih oštećenja koje će se koristiti za I nivo procene sa slika 10.3 do 10.25 iz API 579 standarda.

Cilindrični omotač je izrađen od SA-335 P22, 2.25Cr-1.0Mo ojačani čelik.

- d.) **IV korak** – Određivanje stope oštećenja usled puzanja  $R_c^j$ , i odgovarajućeg oštećenja puzanjem  $D_c^j$  za svaki  $j$  radni režim definisan u I koraku, pomoću krive dobivene iz III koraka, nominalnog opterećenja iz II koraka, i temperature iz I koraka. Oštećenje puzanjem za svaki režim rada  $j$  se određuje pomoću sledeće jednačine [12], gde je vreme rada određeno u I koraku.

$$D_c^j = R_c^j (t_{se}^j)$$

Stopa oštećenja puzanjem  $R_c^j$  i odgovarajuće oštećenje puzanjem  $D_c^j$  za normalne radne režime ( $j=1$ ) je [12]:

$$R_c^1 = 1.75 \times 10^{-6} \text{ 1/ Hr}$$

$$D_c^1 = R_c^1 (t_{se}^1)$$

$$D_c^1 = 1.75 \times 10^{-6} (175200)$$

$$D_c^1 = 0.3066$$

Stopa oštećenja puzanjem  $R_c^j$  i odgovarajuće oštećenje puzanjem  $D_c^j$  za prekoračenje temperature ( $j=2$ ) je [12]:

$$R_c^2 = 6.5 \times 10^{-5} \text{ 1/ Hr}$$

$$D_c^2 = R_c^2 (t_{se}^2)$$

$$D_c^2 = 6.5 \times 10^{-5} (336)$$

$$D_c^2 = 0.0218$$

- e.) **V korak** – Određivanje oštećenja puzanjem za ukupan broj radnih režima  $J$  vrši se pomoću jednačine [12]:

$$D_c^{total} = \sum_{j=1}^J D_c^j$$

Oštećenje puzanjem za ukupan broj radnih režima  $J$  je određeno kao [12]:

$$D_c^{total} = \sum_{j=1}^J D_c^j$$

$$D_c^{total} = \sum_{j=1}^2 D_c^j$$

$$D_c^{total} = (D_c^1 + D_c^2)$$

$$D_c^{total} = (0.3066 + 0.0218)$$

$$D_c^{total} = 0.3284$$

- f.) **VI korak** – Ako ukupno oštećenje puzanjem određeno iz V koraka zadovoljava uslov  $D_c^{total} \leq D_c^{allow}$ , onda je komponenta prihvatljiva prema proceduri prvostepene procene. Inače, ako komponenta nije prihvatljiva onda se postupa prema zahtevima iz API 579.

$$D_c^{total} \leq 0.25$$

U tom slučaju, ukupno oštećenje usled puzanja je određeno u V koraku,  $D_c^{total} = 0.3284$  prekoračuje dozvoljeno  $D_c^{total} \leq D_c^{allow}$  **tako da zbog toga uslovi prvostepene procene nisu zadovoljeni.** Isti problem se dalje podvrgava drugostepenoj proceni.

### Drugostepena procena

- a.) **I korak** – Određivanje istorijata opterećenja na osnovu prošlog i nadalje planiranog režima eksploatacije. Istorijat opterećenja u ovom primeru obuhvata tri režima rada tab.4.4.1.

Tabela 4.4.1. Radna istorija i planirani režimi eksploatacije

	Rad u prošlosti	Rad u preopterećenju	Plan za dalji rad
	(m=1)	(m=2)	(m=3)
Projektovani pritisak (P)	210 psig 14 bar	210 psig 14 bar	210 psig 14 bar
Projektovana temperatura (T)	1115 °F 601.7 °C	1220 F 660 °C	1115 F 601.7 °C
Vreme u radu (h)	131400	336	43800

- b.) **II korak** – Za tekući radni ciklus m, odrediti ukupno vreme ciklusa  $^m t$ , i podeliti ciklus u vremenske intervale  $^n t$ . Definirati N kao ukupan broj vremenskih intervala u radnom ciklusu m.

Za ovaj primer, N je 2 iako su režimi u svakom podciklusu isti. Uopšteno govoreći, N treba da se usvoji tako da manifestuje sve promene u pritiscima, temperaturi ili debljini zida cevi. Svaki ciklus rada u istorijatu se deli na podcikluse respektivno (tab. 4.4.2).

Tabela 4.4.2. Podela ciklusa rada na podcikluse

	Rad u prošlosti		Rad u preopterećenju		Plan za dalji rad	
	(m=1)		(m=2)		(m=3)	
Podciklus	n=1	n=2	n=1	n=2	n=1	n=2
Projektovani pritisak (bar)	14	14	14	14	14	14
Vreme u radu (h)	65700	65700	168	168	21900	21900

c.) **III korak** – Određivanje temperature procene  ${}^nT$  za vremenski interval  ${}^nt$ .

Tabela 4.4.3. Utvrđivanje temperature za svaki interval

	Rad u prošlosti		Rad u preopterećenju		Plan za dalji rad	
	(m=1)		(m=2)		(m=3)	
Podciklus	n=1	n=2	n=1	n=2	n=1	n=2
Projektovani pritisak (bar)	14	14	14	14	14	14
Vreme u radu (h)	65700	65700	168	168	21900	21900
Projektovana temperatura (°C)	601.7	601.7	660	660	601.7	601.7

d.) **IV korak** – Određivanje komponenti napona  ${}^n\sigma_{ij}$  za vremenski interval  ${}^nt$ . Prvo se moraju proveriti dimenzije cevi da bi se raščistilo da li se radi o tankozidim ili debelozidim cevima.

$$\frac{OD}{t_{nom}} > 6$$

$$\frac{8.625}{0.322} > 6$$

$$26.8 > 6$$

Pošto je zadovoljen kriterijum za tankozide cevi, može se primeniti jednačina za napon na srednjem prečniku. U ovom primeru se zbog pojednostavljenja koristila cev sa postignutom dozvoljenom granicom za koroziju. Daleko realističniji pristup je da se odredi napon u funkciji debljine naspram stepena korozije u prošlosti i procenjenog stepena u budućnosti. Primer proračuna je dat za prvi vremenski interval prvog ciklusa. Za preostale vremenske intervale ciklusa proračun se izvodi na isti način [12]:

$${}^n\sigma_1 = {}^n\sigma_{mean} = \frac{P(D_{mean})}{2(t_{corr})}$$

$${}^1\sigma_1 = \frac{P(OD - t_{nom} + FCA)}{2(t_{nom} - FCA)}$$

$${}^1\sigma_1 = \frac{210(8.625 - 0.322 + 0.1)}{2(0.322 - 0.1)}$$

$${}^1\sigma_1 = 3974 \text{ psi} = 274 \text{ bar}$$

$${}^n\sigma_2 = 0.5({}^n\sigma_{mean})$$

$${}^1\sigma_2 = 0.5({}^1\sigma_1)$$

$${}^1\sigma_2 = 0.5(3974)$$

$${}^1\sigma_2 = 1987 \text{ psi}$$

$${}^n\sigma_3 = 0.0 \text{ psi}$$

$${}^n\sigma_e = 0.866({}^n\sigma_{mean})$$

$${}^1\sigma_e = 0.866({}^1\sigma_1)$$

$${}^1\sigma_e = 0.866(3974)$$

$${}^1\sigma_e = 3442 \text{ psi}$$

Svaka od komponenti napona je prikazana u tabeli 4.4.4.

Tabela 4.4.4. Komponente napona za svaki interval

Radni ciklus	Rad u prošlosti		Rad u preopterećenju		Plan za dalji rad	
	(m=1)		(m=2)		(m=3)	
Podciklus	n=1	n=2	n=1	n=2	n=1	n=2
Projektovani pritisak (bar)	14	14	14	14	14	14
Vreme u radu (h)	65700	65700	168	168	21900	21900
Projektovana temperatura (°C)	601.7	601.7	660	660	601.7	601.7
${}^n\sigma_{xx} = {}^n\sigma_1$ (psi) - bar	3974 274	3974 274	3974 274	3974 274	3974 274	3974 274
${}^n\sigma_{yy} = {}^n\sigma_2$ (psi) - bar	1987 137	1987 137	1987 137	1987 137	1987 137	1987 137
${}^n\sigma_{zz} = {}^n\sigma_3$ (psi) - bar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
${}^n\tau_{xy}$ (psi) - bar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
${}^n\sigma_e$ (psi) - bar	3442 237.3	3442 237.3	3442 237.3	3442 237.3	3442 237.3	3442 237.3

- e.) **V korak** – Utvrđivanje otpornosti na gubitak plastičnosti. Ako je primarni referentni napon  ${}^n\sigma_{ref}^p$  manji od 75% minimalnog napona na granici tečenja, kriterijum gubitka plastičnosti materijala je zadovoljen [12]. Naponi u komponenti su konstantni, tako da su dole dobijeni rezultati validni za sve podcikluse i cikluse rada.

$${}^n\sigma_{ref}^p = \frac{{}^nP_b + \left( {}^nP_b^2 + 9({}^nP_L^2) \right)^{0.5}}{3}$$

$${}^n\sigma_{ref}^p = \frac{0 + \left( 0^2 + 9(3974^2) \right)^{0.5}}{3}$$

$${}^n\sigma_{ref}^p = 3974 \text{ psi}$$

$$\sigma_{ys}(1115) = 19851 \text{ psi}$$

$$\sigma_{ys}(1220) = 15034 \text{ psi}$$

$${}^n\sigma_{ref}^p \leq \min \left[ 0.75(\sigma_{ys}(1115)), 0.75(\sigma_{ys}(1220)) \right]$$

$${}^n\sigma_{ref}^p \leq \min[0.75(19851), 0.75(15034)]$$

$$3974 \text{ psi} \leq 11276 \text{ psi}$$

$$274 \text{ bar} \leq 777.5 \text{ bar}$$

- f.) **VI korak** - Određivanje glavnih napona  ${}^n\sigma_1, {}^n\sigma_2, {}^n\sigma_3$  i efektivnog napona  ${}^n\sigma_e$ . Tankozide cevi trpe bi-aksijalno naprezanje dok je napon smicanja jednak nuli, tako da se onda glavni napon određuje pomoću komponenti napona određenih u IV koraku ( ${}^n\sigma_{xx} = {}^n\sigma_1, {}^n\sigma_{yy} = {}^n\sigma_2, {}^n\sigma_{zz} = {}^n\sigma_3$ ). Tabela 4.4.4 data na kraju IV koraka obuhvata glavne napone.
- g.) **VII korak** – Određivanje preostalog životnog veka sa stepenom opterećenja  ${}^n\sigma_e$  i temperaturom  ${}^nT$  za vremenski interval  ${}^nt$  pomoću podataka o lomu materijala puzanjem i označavanjem ove vrednosti sa  ${}^nL$ . Sva opterećenja su izražena u KSI a sve temperature u °F, dok je odgovarajuće vreme do loma izraženo u časovima. Podaci za konstante materijala za procenu preostalog životnog veka Omega metodom dati su u dodatku F API 579 u tabeli F.30 za 2.25Cr-1Mo žareni.

$$A_0 = -21.86$$

$$A_1 = 50205$$

$$A_2 = -5436$$

$$A_3 = 500$$

$$A_4 = -3400$$

$$B_0 = -1.85$$

$$B_1 = 7205$$

$$B_2 = -2436$$

$$B_3 = 0.0$$

$$B_4 = 0.0$$

Za cilindar ili kupu  $\alpha_\Omega = 2$ . MPC Project Omega parametar se definiše kao  $\beta_\Omega = \frac{1}{3}$ . Primer određivanja preostalog životnog veka na stepenu opterećenja  ${}^n\sigma_e$  i temperaturi  ${}^nT$  za vremenski interval  ${}^nt$  je prikazan dole. U ovom primeru su korekcionni faktori za tegljivost puzanjem  $\Delta_\Omega^{cd}$  i izduženje puzanjem  $\Delta_\Omega^{sr}$  usvojeni 0.

$$S_l = \log_{10}({}^n\sigma_e)$$

$$S_l = \log_{10}(3.442)$$

$$S_l = 0.5368$$



$$\log_{10} \dot{\varepsilon}_{co} = - \left\{ (A_0 + \Delta_{\Omega}^{sr}) + \left[ \frac{1}{460 + {}^nT} \right] [A_1 + A_2 S_1 + A_3 S_1^2 + A_4 S_1^3] \right\}$$

$$\log_{10} \dot{\varepsilon}_{co} = - \left\{ (-21.86 + 0.0) + \left[ \frac{1}{460 + 1115} \right] \times \left[ 50205 + (-5436)0.5368 + 500(0.5368)^2 + (-3400)0.5368^3 \right] \right\}$$

$$\log_{10} \dot{\varepsilon}_{co} = -7.921$$

$$\dot{\varepsilon}_{co} = 1.199 \times 10^{-8} \text{ 1/Hr}$$

$$\log_{10} \Omega = (B_0 + \Delta_{\Omega}^{cd}) + \left[ \frac{1}{460 + {}^nT} \right] [B_1 + B_2 S_1 + B_3 S_1^2 + B_4 S_1^3]$$

$$\log_{10} \Omega = (-1.85 + 0.0) + \left[ \frac{1}{450 + 1115} \right] [7205 + (-2436)0.537 + 0.0(0.537)^3]$$

$$\log_{10} \Omega = 1.894$$

$$\Omega = 78.406$$

$$n_{BN} = - \left\{ \left[ \frac{1}{460 + {}^nT} \right] [A_2 + 2A_3 S_1 + 3A_4 S_1^2] \right\}$$

$$n_{BN} = - \left\{ \left[ \frac{1}{460 + 1115} \right] [-5346 + 2 \cdot 500 \cdot 0.537 + 3(-3400)0.537^2] \right\}$$

$$n_{BN} = 4.977$$

$$\Omega_n = \max [(\Omega - n_{BN}), 3.0]$$

$$\Omega_n = \max [(78.406 - 4.977), 3.0]$$

$$\Omega_n = 73.429$$

$$\delta_{\Omega} = \beta_{\Omega} \left( \frac{{}^n\sigma_1 + {}^n\sigma_2 + {}^n\sigma_3}{{}^n\sigma_e} - 1.0 \right)$$

$$\delta_{\Omega} = \frac{1}{3} \left( \frac{3974 + 1987 + 0.0}{3442} - 1.0 \right)$$

$$\delta_{\Omega} = 0.244$$

$$\Omega_m = \Omega_n^{\delta_{\Omega} + 1} + \alpha_{\Omega} \cdot n_{BN}$$

$$\Omega_m = 73.429^{0.244+1} + 2 \cdot 4.977$$

$$\Omega_m = 219.43$$

$${}^nL = \frac{1}{\dot{\varepsilon}_{co} \Omega_m}$$

$${}^1L = \frac{1}{1.199 \times 10^{-8} \cdot 219.43}$$

$${}^1L = 380090 \text{ h}$$

Preostali životni vek za ostale vremenske intervale izračunava se na ovakav način.

- h.) **VIII korak** – Ponavljanje III do VII koraka za svaki vremenski interval  ${}^n t$  u mesečnom ciklusu do određivanja vremena loma,  ${}^n L$ , za svaki interval. Rezultati za vremenske periode su predstavljeni u tabeli 4.4.5.

Tabela 4.4.5. Preostali životni vek za svaki interval

Radni ciklus	Rad u prošlosti		Rad u preopterećenju		Plan za dalji rad	
	(m=1)		(m=2)		(m=3)	
Podciklus	n=1	n=2	n=1	n=2	n=1	n=2
Projektovani pritisak (bar)	14	14	14	14	14	14
Vreme u radu (h)	65700	65700	168	168	21900	21900
Projektovana temperatura (°C)	601.7	601.7	660	660	601.7	601.7
${}^n \sigma_{xx} = {}^n \sigma_1$ (psi) - bar	3974 274	3974 274	3974 274	3974 274	3974 274	3974 274
${}^n \sigma_{yy} = {}^n \sigma_2$ (psi) - bar	1987 137	1987 137	1987 137	1987 137	1987 137	1987 137
${}^n \sigma_{zz} = {}^n \sigma_3$ (psi) - bar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
${}^n \tau_{xy}$ (psi) - bar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
${}^n \sigma_e$ (psi) - bar	3442 237.3	3442 237.3	3442 237.3	3442 237.3	3442 237.3	3442 237.3
Preostali životni vek ${}^n L$ (h)	380090	380090	10330	10330	380090	380090

- i.) **IX korak** - Određivanje akumuliranog oštećenja puzanjem za sve tačke u mesečnom ciklusu pomoću jednačine [12]:

$${}^m D_c = \sum_{n=1}^N \frac{{}^n t}{{}^n L}$$

$${}^1 D_c = \sum_{n=1}^2 \frac{{}^n t}{{}^n L}$$

$${}^1D_c = \frac{{}^1t}{{}^1L} + \frac{{}^2t}{{}^2L} = \frac{65700}{380090} + \frac{65700}{380090} = 0.346$$

- j.) **X korak** – Ponavljanje od II do IX koraka za svaki radni ciklus definisan u I koraku. Rezultati za svaki radni ciklus su predstavljeni u tabeli 4.4.6.

Tabela 4.4.6. Akumulirano oštećenje za svaki ciklus

Radni ciklus	Rad u prošlosti		Rad u preopterećenju		Plan za dalji rad	
	(m=1)		(m=2)		(m=3)	
Podciklus	n=1	n=2	n=1	n=2	n=1	n=2
Projektovani pritisak (bar)	14	14	14	14	14	14
Vreme u radu (h)	65700	65700	168	168	21900	21900
Projektovana temperatura (°C)	601.7	601.7	660	660	601.7	601.7
${}^n\sigma_{xx} = {}^n\sigma_1$ (psi) - bar	3974 274	3974 274	3974 274	3974 274	3974 274	3974 274
${}^n\sigma_{yy} = {}^n\sigma_2$ (psi) - bar	1987 137	1987 137	1987 137	1987 137	1987 137	1987 137
${}^n\sigma_{zz} = {}^n\sigma_3$ (psi) - bar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
${}^n\tau_{xy}$ (psi) - bar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
${}^n\sigma_e$ (psi) - bar	3442 237.3	3442 237.3	3442 237.3	3442 237.3	3442 237.3	3442 237.3
Preostali životni vek ${}^nL$ (h)	380090	380090	10330	10330	380090	380090
Oštećenje ${}^mD_c$	0.346		0.033		0.115	

- k.) **XI korak** – Određivanje ukupnog oštećenja puzanjem za sve cikluse rada [12]:

$$D_c^{total} = \sum_{m=1}^M {}^mD_c \leq D_c^{allow}$$

$$D_c^{total} = \sum_{m=1}^3 {}^mD_c \leq D_c^{allow}$$

$$D_c^{total} = {}^1D_c + {}^2D_c + {}^3D_c \leq D_c^{allow} = 0.346 + 0.033 + 0.115 \leq 0.80$$

$$D_c^{total} = 0.494 \leq 0.80$$

- 1.) **XII korak** – Sa ovom tačkom se završava procena oštećenja puzanjem za komponentu. U ovom primeru pošto je ukupno oštećenje  $D_c^{total} = 0.494$  manje od dozvoljenog oštećenja  $D_c^{allow} = 0.80$  onda je komponenta prihvatljiva za dalji rad, uključujući i rad u narednom periodu od pet godina (radni uslov  $m=3$ ). Preostali životni vek se može odrediti ponavljajući ovu proceduru sve dok se ne zadovolji jednakost  $D_c^{total} = D_c^{allow}$ .

### Larson – Miller-ova parametarska metoda

- g.) Alternativa **VII koraka** – Određivanje preostalog životnog veka za stepen opterećenja pomoću Larson – Miller-ovog parametra Dodatak F API 579 tabela F.31 za SA335 Grade P22 materijal (2.25 Cr-1Mo) tabela 4.4.7.

Tabela 4.4.7. Minimalni i prosečni Larson–Miller-ovi parametri za posmatrani materijal i opterećenje

Parametri	Minimalni Larson-Miller-ov Parametar - LMP <sub>m</sub>	Prosečni Larson-Miller-ov Parametar – LMP <sub>a</sub>
A <sub>0</sub>	4.3981719E+01	4.3494159E+01
A <sub>1</sub>	-8.4656117E-01	-6.0165638E-01
A <sub>2</sub>	-4.0483005E+01	-2.8040471E+01
A <sub>3</sub>	2.6236081E-01	2.0644229E-01
A <sub>4</sub>	1.5373650E+01	1.0982290E+01
A <sub>5</sub>	4.9673781E-02	2.8393767E-02
A <sub>6</sub>	6.6049429E-01	3.6067024E-01
C <sub>LMP</sub>	20.0	20.0

Larson –Miller-ov parametar je dat preko  $\sigma$  u KSI [12]:

$$LMP_{m,a} = \frac{A_0 + A_2 \sqrt{\sigma} + A_4 \sigma + A_6 \sigma^{1.5}}{1 + A_1 \sqrt{\sigma} + A_3 \sigma + A_5 \sigma^{1.5}}$$

Životni vek se procenjuje pomoću jednačina [12]:

$$\log_{10} {}^n[L] = \frac{1000 \cdot LMP({}^n S_{eff})}{({}^n T + 460)} - C_{LMP}$$

gde je:

$${}^n S_{eff} = {}^n \sigma_e \exp \left[ 0.24 \left( \frac{J_1}{S_s} - 1 \right) \right]$$

$$J_1 = {}^n \sigma_1 + {}^n \sigma_2 + {}^n \sigma_3$$

$$S_s = \left( {}^n\sigma_1^2 + {}^n\sigma_2^2 + {}^n\sigma_3^2 \right)^{0.5}$$

$$J_1 = (3974 + 1987 + 0) = 5961$$

$$S_s = \sqrt{3974^2 + 1987^2 + 0^2} = 4443$$

$${}^nS_{eff} = 3442 \exp \left[ 0.24 \left( \frac{5961}{4443} - 1 \right) \right] = 3736$$

Određivanje preostalog životnog veka pomoću minimuma Larson – Miller-ovog parametra [12]:

$$\begin{aligned} LMP_{\min} &= \frac{A_0 + A_2 \sqrt{S_{eff}} + A_4 S_{eff} + A_6 S_{eff}^{1.5}}{1 + A_1 \sqrt{S_{eff}} + A_3 S_{eff} + A_5 S_{eff}^{1.5}} \\ &= \frac{43.981719 + (-40.483005 \sqrt{3.736}) + (15.37365 \cdot 3.736) + (0.66049429 \cdot 3.736^{1.5})}{1 + (-0.84656117 \sqrt{3.736}) + (0.26236081 \cdot 3.736) + (0.049673781 \cdot 3.736^{1.5})} \\ &= 39.765 \end{aligned}$$

$$\log_{10} L = \left[ \frac{1000 \cdot LMP_{\min}}{(T + 460)} - C_{LMP} \right] = \left[ \frac{1000 \cdot 39.765}{(1115 + 460)} - 20 \right] = 5.2476$$

$${}^1L = 10^{5.2476} = 176.850 \text{ h}$$

$${}^1t = 67.700 \text{ h}$$

$$\text{Koeficijent životnog veka za prvi podinterval} = \left( \frac{65700}{176.850} \right) = 0.3715$$

Na isti način se određuje i za sledećih 5 podintervala, tako da onda imamo: 0.3715, 0.0359, 0.0359, 0.1238, 0.1238 tako da je

$$D_c^{total} = [0.3715 + 0.3715 + 0.0359 + 0.0359 + 0.1238 + 0.1238] = 1.06 > 0.80$$

Prema drugostepenoj proceni, primenom metode Larson–Miller-ovog parametra komponenta nije prihvatljiva.

### Poređenje sa metodom API 530

Ako se isti podaci analiziraju primenom metode API 530 potrebno je zameniti Huddleston-ovo jednoosno opterećenje  $S_{\text{eff}}=3.736$  ksi sa obimnim opterećenjem srednjeg prečnika  $\sigma_{\text{mean}}=3.974$  ksi. Pošto je  $S_{\text{eff}}=0.94 \times \sigma_{\text{mean}}$  odgovarajući koeficijent potrošenog životnog veka pomoću API 530 biće veći.

a.) Upotreba minimalnih LMP podataka:

Koeficijenti potrošenog životnog veka su: 0.5068, 0.5068, 0.0481, 0.0481, 0.1689, 0.1689. Koeficijent ukupnog životnog veka  $D_c^{\text{total}}=1.448$  poreden sa  $D_c^{\text{total}}=1.063$  pomoću  $S_{\text{eff}}$  i  $D_c^{\text{total}}=0.494$  pomoću podataka Omega analize sa oba korekciona faktora za izduženje puzanjem i istegljivošću puzanjem postavljenim kao 0.

b.) Upotreba prosečnih LMP podataka:

Koeficijenti potrošenog životnog veka su: 0.1685, 0.1685, 0.0171, 0.0171, 0.0562, 0.0562. Koeficijent ukupnog životnog veka  $D_c^{\text{total}}=0.484$  poreden sa  $D_c^{\text{total}}=0.373$  pomoću  $S_{\text{eff}}$  i  $D_c^{\text{total}}=0.494$  pomoću podataka Omega analize sa oba korekciona faktora za izduženje puzanjem i istegljivošću puzanjem postavljenim kao 0.

c.) Analiza korodirane debljine zida cevi

Pretpostavljanje tačne i pouzdane istorije stope korozije zida cevi je moguće, aktuelna debljina zida cevi se može koristiti za dobijanje tačnije procene preostalog životnog veka i koeficijenta životnog veka.

U ovom primeru smo usvojili da cev korodira 0.127 mm/god. sa unutrašnje površine, istorijat opterećenja odgovara dimenzijama cevi tokom svakog radnog ciklusa i pod intervala tako da se on može izvesti. Preostali životni vek i rezultati oštećenja dobiveni različitim metodama su sumarizovani u tabeli 4.4.8. Sva kumulativna oštećenja su ispod 0.80.

Tabela 4.4.8. Preostali životni vek i rezultati kumulativnog oštećenja dobiveni različitim metodama

Radni ciklus		Rad u prošlosti		Rad u preopterećenju		Plan za dalji rad	
		(m=1)		(m=2)		(m=3)	
Podciklus		n=1	n=2	n=1	n=2	n=1	n=2
Vreme u radu - $L_{\text{hour}}$	h	65.700	65.700	168	168	21.900	21.900
Projektovani pritisak - $P_{\text{avg}}$	bar	14	14	14	14	14	14
Projektovana temperatura - $T_{\text{avg}}$	°C	601.7	601.7	660	660	601.7	601.7
Faktor korozije un.prečnika - $Cr_{\text{id}}$ 0.0254 mm/god.		5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
Spoljni prečnik - početni - $Do_b$	mm	219.07	219.07	219.07	219.07	219.07	219.07
Spoljni prečnik - krajnji - $Do_e$	mm	219.07	219.07	219.07	219.07	219.07	219.07
Unutrašnji prečnik - poč. - $Di_b$	mm	202.72	204.62	206.53	206.53	206.53	207.16
Unutrašnji prečnik - kraj. - $Di_e$	mm	204.62	206.53	206.53	206.53	207.16	207.80
Debljina zida cevi - poč. - $t_b$	mm	8.178	7.239	6.274	6.274	6.274	5.943
Debljina zida cevi - kraj. - $t_e$	mm	7.239	6.274	6.274	6.274	5.943	5.639
Spoljni prečnik - pros. - $Do_{\text{avg}}$	mm	219.07	219.07	219.07	219.07	219.07	219.07
Unutrašnji prečnik - pros. - $Di_{\text{avg}}$	mm	203.68	205.59	206.53	206.53	206.86	207.49
Debljina zida cevi - pros. - $t_{\text{avg}}$	mm	7.696	6.756	6.274	6.274	6.121	5.791
<b>Omega metod</b>							
Glavno opterećenje 1 - $\sigma_1$	bar	198.64	227.73	245.59	245.73	252.35	266.55
Glavno opterećenje 2 - $\sigma_2$	bar	99.35	113.83	122.79	122.86	126.17	133.27
Glavno opterećenje 3 - $\sigma_3$	bar	0	0	0	0	0	0
Efektivno opterećenje - $\sigma_e$	bar	172.02	197.19	212.70	212.77	218.49	230.84
$\Omega$ Vreme do pojave oštećenja - $L\Omega$	h	879.235	633.665	13.839	13.825	482.208	412.347
$\Omega$ Iskorišćeni životni vek - $L/L\Omega$		0.075	0.104	0.012	0.012	0.045	0.053
Kumulativno oštećenje - $\Sigma(L/L\Omega)$		0.075	0.178	0.191	0.203	0.248	0.301
<b>LMP uz primenu Huddelston-ovog uniaksijalnog opterećenja</b>							
$J_1=(\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3)$	bar	297.99	341.56	368.38	368.52	378.52	399.82
$S_s=(\sigma_1^2+\sigma_2^2+\sigma_3^2)^{0.5}$	bar	222.14	254.62	274.61	274.68	282.13	297.99
Huddelston-ovo uniaks. opt. - $S_{\text{EFF}}$	bar	186.77	214.08	230.90	230.97	237.17	250.55
Minimalni LMP za $S_{\text{EFF}}$		40.721	40.350	40.122	40.120	40.036	39.858
Vreme do pojave oštećenja - $L_{\text{EFF}}$	h	715.601	416.094	7.620	7.607	263.013	202.581
Iskorišćeni životni vek - $L/L_{\text{EFF}}$		0.092	0.158	0.022	0.022	0.083	0.108
Kumulativno oštećenje - $\Sigma(L/L_{\text{EFF}})$		0.092	0.250	0.272	0.294	0.377	0.485
Prosečni LMP za $S_{\text{EFF}}$		41.263	40.965	40.780	40.779	40.710	40.562
Vreme do pojave oštećenja - $L_{\text{EFF}}$	h	1.579.314	1.022.363	18.775	18.748	703.860	567.314
Iskorišćeni životni vek - $L/L_{\text{EFF}}$		0.042	0.064	0.009	0.009	0.031	0.039
Kumulativno oštećenje - $\Sigma(L/L_{\text{EFF}})$		0.042	0.106	0.115	0.124	0.155	0.193
<b>API RP 530</b>							
Opt. na srednjem prečniku - $\sigma_{\text{mean}}$	psi	198.63	227.73	245.59	245.72	252.34	266.55
Minimalni LMP za $\sigma_{\text{mean}}$		40.560	40.164	39.924	39.923	39.835	39.649
Vreme do pojave oštećenja - $L_{530}$	h	565.463	317.115	5.810	5.800	195.805	149.182
Iskorišćeni životni vek - $L/L_{530}$		0.116	0.207	0.029	0.029	0.112	0.147
Kumulativno oštećenje - $\Sigma(L/L_{530})$		0.116	0.323	0.352	0.381	0.493	0.640
Prosečni LMP za $\sigma_{\text{mean}}$		41.134	40.814	40.617	40.616	40.534	40.387
Vreme do pojave oštećenja - $L_{530}$	h	1.308.211	820.247	15.023	15.000	551.484	439.088
Iskorišćeni životni vek - $L/L_{530}$		0.050	0.080	0.011	0.011	0.040	0.050
Kumulativno oštećenje - $\Sigma(L/L_{530})$		0.050	0.130	0.142	0.153	0.192	0.242

## 4.5 Primena API 581 standarda na cevi peći

Devedesetih godina prošlog veka postalo je očigledno da je nedostatak jednostavnih i odgovarajućih kvantitativnih uputstava za određivanje rizika bio osnovni problem za sve korisnike sudova pod pritiskom koji su pokušavali da odrede prioritete u programu preventivnih periodičnih pregleda. Uputstva za preglede moraju biti praktična i moraju uzeti u obzir mehanizam oštećenja, tehnike pregleda, efektivnost pregleda, stopu razvoja oštećenja, i druge tehničke faktore.

American Petroleum Institute (API) je pokrenuo Maja 1993. godine Risk Based Inspection Project (RBI). Cilj API je bio da RBI postane koristan i razumljiv alat za planiranje pregleda industrijskih postrojenja pomoću pojednostavljenja kompleksnih modela primenom standardizovanih praktičnih procedura za petrohemijska postrojenja. RBI analiza pokušava da analizira rizik i kvalitativnu i kvantitativnu efektivnost pregleda, i traga za faktorima potrebnim za izradu plana pregleda uključujući verovatnoću i posledice otkaza. Tehnički moduli u API 581, izvorni dokument za RBI, obuhvata istanjenje, lom usled dejstva korozije, dejstvo vodonika na visokim temperaturama, mehanički zamor materijala (samo za cevi), dugotrajno puzanje, kratkotrajno pregrevanje, krt lom, taloženje na opremu, i spoljna oštećenja.

Ovo poglavlje istražuje poteškoće u primeni API RBI na cevi peći. Pošto API koristi Britanske merne jedinice, ove jedinice se onda nalaze i u tabelama u radu. Usled složenosti pojedinih jednačina konverzija svih mernih jedinica na SI sistem mernih jedinica nije neophodna već samo krajnjih rezultata.

Semikvantitativna RBI analiza je izvedena pomoću organizovane metodologije razvijene od strane API u dokumentu API Base Resource Document API 581. API RBI Appendix J (dodatak J) razmatra oštećenja cevi peći usled puzanja i pregrevanja. Podaci koji su dati u standardu API RBI u dodatku J se odnose na feritne čelike (ugljenični čelici i niskougljenični čelici do 12 Cr) i austenitne čelike (304, 316, 321 i 347).

U našem slučaju cevi su projektovane prema API 530 standardu ali su cevi od materijala (HK40 i HP) koji se ne razmatraju u standardu API 581. U ovom delu rada ćemo pokazati primenu postupka na materijale koji nisu obuhvaćeni standardom. Podaci o procesu i projektovane vrednosti su prikazane u tabeli 4.5.1.

### 4.5.1 Analiza verovatnoće

Analiza verovatnoće je rezultat brojnih faktora ali u semikvantitativnoj RBI samo se podfaktori tehničkog modula (TMSF) koriste za određivanje verovatnoće otkaza. TMSF definiše mehanizam oštećenja i starost opreme u tekućoj eksploataciji u cilju procene stope oštećenja. Podfaktori tehničkog modula se mogu rangirati kao visoki ako su 1000 ili viši, dok su drugi podfaktori relativno mali (<10) [9].

Ključ za razumevanje TMSF se nalazi u odeljku 9.4.3 API 581 standarda. Ovde postaje jasno ako je TMSF manje od 10 da tada nastaje veoma malo oštećenje. Iznad 10,



stopa oštećenja postaje daleko značajnija i tada postoji povećana potreba za pregledima i drugim preventivnim merama (tab. 9.15 – 9.17 API 581). Sa TMSF iznad 500 već vlada zabrinutost da je životni vek već iskorišćen.

Analiza verovatnoće započinje određivanjem trenutnog (stvarnog) prečnika cevi i određivanjem temperaturnih granica elastičnosti cevi i granica elastičnosti naprezanja. Ako je aktuelna temperatura materijala cevi (TMT) manja od temperaturne granice elastičnosti ili je aktuelno naprezanje cevi (koje se izračunava uzimanjem u obzir radnog pritiska i stvarnog prečnika cevi) manje od napona na granici elastičnosti, onda se dugoročno puzanje ne uzima u razmatranje [9]:

$$TMT < T_{elas} \text{ i } S < S_{elas}$$

Aktuelna temperatura materijala cevi, koja se određuje direktnim merenjem iznosi  $TMT=905^{\circ}C$ . API 581 definiše temperaturnu granicu elastičnosti za materijal cevi ili kritičnu temperaturu materijala cevi kao „temperatura na kojoj će cev dostići 100.000 h projektovanog rada koristeći krivu minimalne čvrstoće pri raskidu prema API 530 [8].” Temperaturna granica elastičnosti za neke materijale je data u tabeli J-4 u API 581.

Pošto se materijali koje mi proučavamo ne nalaze u API 581, podaci o  $T_{elas}$  za pomenute materijale iz tabele J-4 (API RBI Appendix J) su prikazani sa Larson – Miller-ovim krivama u API 530 za poređenje i predviđanje temperature elastičnosti za HP i HK40. (HK40 se pojavljuje u API 530 standardu ali ne i HP). Napominje se da Larson-Miller-ove krive prikazuju ovu temperaturu kao tačku u kojoj se seku linije dozvoljenog naprezanja na granici elastičnosti i linije dozvoljenog napona na granici kidanja.

Dozvoljeno naprezanje na granici elastičnosti iznosi 2/3 napona na granici razvlačenja na temperaturi za feritne čelike i 90% napona na granici razvlačenja na temperaturi za austenitne čelike [8]. Za HK i HP Larson-Miller-ove krive pokazuju da je dozvoljeno naprezanje na granici elastičnosti veće od 100MPa. Kao rezultat, Larson-Miller-ove krive za HK40 (API 530) i HP pokazuju da kada se naviše pomere krive dozvoljenog naprezanja na granici elastičnosti, da će se seći sa krivom dozvoljenog naprezanja u tački kidanja na temperaturi koja je manja ili se nalazi na oko  $600^{\circ}C$ . Tako da procenjena vrednost za  $T_{elas}$  može da bude oko  $600^{\circ}C$ . Odatle sledi da je potrebno određivanje dugoročnog puzanja zato što je  $T_{elas}$  manje od TMT.

Tabela 4.5.1. Projektovani i stvarni parametri eksploatacije za razmatrani primer

	Jed.	CEV	KOLENO 180°
Materijal		HK40	HP
Debljina zida cevi	mm	14	15
Projektovani pritisak	MPa	1.73	1.68
Unutrašnji prečnik	mm	110	110
Projektovana temperatura	C°	925	1015
Stvarna temperatura cevi	C°	905	905
Dozvoljeno opterećenje	MPa	13.4*0.8(T44)	9.8*0.8(T64)
Stvarno opterećenje	MPa	5.49	5.17
$P_{in}$	MPa	1.24	1.24
$P_{out}$	MPa	1.17	1.17
$T_{in}$	C°	557	557
$T_{out}$	C°	860	860

Granica elastičnosti (granica proporcionalnosti) je najveće opterećenje koje materijal može podneti i još uvek se vratiti u njegove početne dimenzije nakon prestanka opterećenja. Tabela J-5 API 581 sadrži napone na granici elastičnosti za razmatranje puzanja za navedene materijale. Ova tabela ne obuhvata materijale koji se tiču ovog rada, tako da su naponi na granici elastičnosti za HK i HP materijale izračunati na osnovu podataka od strane proizvođača. Napon na granici elastičnosti je procenjen na 4-6 MPa za projektovanu graničnu temperaturu. Tabela 4.5.1 prikazuje da aktuelno opterećenje cevi može biti veće od napona na granici elastičnosti. Iz ovoga se vidi da se za cevi peći treba uzeti u obzir dugoročno puzanje.

## 4.5.2 Određivanje verovatnoće pojave oštećenja usled puzanja tokom dužeg vremena eksploatacije

Jednačina dole prikazana iz API 581 dodatak J se koristi za određivanje podfaktora dugoročnih tehničkih modula [9]:

$$lm = (TMT + 460) \times (\log t_i + C) / 1000 \quad (4.5.1)$$

$$X = (LM_{avg} - lm) / LM_{delta} \quad (4.5.2)$$

$$FF_{LT} = \min\left(1.10^{-0.6723X^3 + 0.2854X^2 - 0.5905X - 0.3001}\right) \quad (4.5.3)$$

$$TMSF_{LT} = 0.55e^{13FF} \quad (4.5.4)$$

$$TMSF_{adjusted} = TMSF_{LT} \times \text{redukциони faktor efektivnosti pregleda} \quad (4.5.5)$$

Im je definisano API 581 kao Larson-Miller-ov parametar u aktuelnim radnim uslovima. Jednačina (4.5.1) se koristi za određivanje Im za HP i HK materijale u aktuelnim uslovima eksploatacije.

Tabela 4.5.2. Larson-Miller-ov parametar i verovatnoća oštećenja usled dugoročnog puzanja

Larson-Miller-ov parametar	HK	HP
Im	44.16	57
LM <sub>delta</sub>	0.8	0.3
LM <sub>avg</sub>	46.02481-1.88469 lnS	65.05956-2.17933 lnS
Analiza dugoročnog puzanja		
FF <sub>LT</sub> (koeficijent oštećenja)	1.00E-300	0
TMSF <sub>LT</sub> (podfaktor tehničkog modula)	0.55	0.55

$LM_{\text{delta}}$  se definiše kao prosečna razlika između sredine i minimuma Larson-Miller-ove krive u API 530. Ovde je  $LM_{\text{delta}}$  određeno pomoću sredine i minimuma Larson-Millerove krive u API 530 a takođe i na osnovu podataka od proizvođača. Za određivanje sredine Larson-Miller-ovog parametra za HP i HK materijale korišćena je metoda regresije najmanjeg kvadrata u Microsoft Excel-u. Rezultati za HK i HP materijale su aproksimativno isti. Analiza ovih podataka pokazuje da HP i HK imaju TMSF manje od jedan za različita opterećenja. Rezultati dugoročne analize puzanja su prikazani u tabeli 4.5.2.

API 581 unosi sigurnost na osnovu efektivnosti pregleda za usklađivanje  $TMSF_{LT}$ . S obzirom na kategoriju pregleda „uobičajno efektivno” koje se definiše kao „vizuelna inspekcija, ultrazvučno merenje debljine svih cevi” i N (broj pregleda, tj. inspekcija) jednako 1, TMSF se usaglašava za HP i HK materijale i iznosi oko 0.1366.

### 4.5.3 Određivanje verovatnoće pojave oštećenja nastalih u kratkom vremenskom intervalu

API 581 dokumentuje da su oštećenja nastala u kratkom vremenskom intervalu rezultat nepredviđenih uslova, kao što su greške u radu ili ljudske greške, a one su teške za kvantitativnu procenu. Verovatnoća kratkotrajnih oštećenja, prema  $TMSF_{ST}$  se određuje razmatranjem vremena izlaganja pregrevanju i dostignutoj temperaturi materijala cevi. Za određivanje  $TMSF_{ST}$  API 581 uvodi sledeće formule:

$$\Delta T_{5\%} = 35.5 \ln(1029 / t_{oh}) \quad (4.5.6)$$

$$FF_{ST} = \min\left(0.05 e^{0.0422(\Delta T_{oh} - \Delta T_{5\%})}, 1\right) \quad (4.5.7)$$

$$TMSF_{ST} = 0.55 e^{13FF} \quad (4.5.8)$$

$\Delta T_{5\%}$  - temperatura pregrevanja,  $\Delta T_{5\%}$  odgovara vrednosti  $\Delta T_{oh}$  koja rezultuje 5% verovatnoćom oštećenja prema LM krivama [9].  $\Delta T_{oh}$  – temperatura pregrevanja,  $t_{oh}$  – vreme izloženosti pregrevanju.

API 581 tvrdi da  $\Delta T_{oh}$  može biti 149°C više od projektovane temperature materijala tokom 10 ÷ 1000 h i zavisi od istorijata pregrevanja, teškog koksovanja, eksploatacije, ili problema povezanih s radom brenera. Tabela 4.5.3 prikazuje faktore oštećenja i  $TMSF_{ST}$  u slučajevima pregrevanja za 100, 50 i 10 °C u toku jednog dana, jedne nedelje i jednog meseca bez podrazumevanog on-line monitoringa. Za pregrevanje od 10°C tokom 1 meseca  $TMSF_{ST}$  je veće od 10. Primenom metoda on-line monitoringa sačinjenog od dnevnih vizuelnih pregleda i podešavanja brenera od strane rukovalaca,  $TMSF_{ST}$  će se smanjiti na 0.24.

Tabela 4.5.3. Koeficijent oštećenja usled kratkotrajnog pregrevanja i podfaktor tehničkog modula bez on-line monitoringa<sup>23</sup>

PERIOD PREGREVANJA	TEMPERATURA PREGREVANJA (C°)	FF <sub>ST</sub>	TMSF <sub>ST</sub>
Jedan dan	100	17	vrlo veliko
Jedna nedelja	50	0.4	0.82
	10	0.019	0.56
	100	330	vrlo veliko
Jedan mesec	10	0.35	0.78
	50	7.40	906
	100	2923	Veliko
	10	3.14	12
	50	65	vrlo veliko

U ovom radu nema nekih sređenih podataka o istorijatu pregrevanja koji bi obezbedili informaciju o problemima pregrevanja u fabrici ili o neočekivanim režimima eksploatacije. Pretpostavlja se da pregrevanje do 40°C tokom 20 ÷ 30 h može nastati nepravilnom proizvodnjom ili ljudskom greškom. Kratkoročni podfaktor tehničkog modula (TMSF<sub>ST</sub>) u ovom opsegu je manji ili jednak 1. API 581 tvrdi da se on-line monitoring faktori trebaju koristiti za usaglašavanje TMSF<sub>ST</sub>. Tabela J-9 u dodatku J se koristi za određivanje on-line monitoring faktora. Ako je on-line monitoring metod dnevno vizuelni a podešavanje brenera prema radu, TMSF<sub>ST</sub> se smanjuje na 0.02.

#### 4.5.4 Analiza konsekvenci

Ispitujući verovatnoću oštećenja predstavljenu preko TMSF-a i njegove efekte, druga polovina analize rizika je analiza konsekvenci. Analiza konsekvenci započinje određivanjem reprezentativnog fluida i njegovih karakteristika, kalkulacijom stope verovatnoće njegovog ispuštanja, identifikacijom vrste ispuštanja, i stepenom širenja nakon ispuštanja. I na kraju, ispuštena masa se određuje za svaku od mesta ispuštanja, da bi se mogla odrediti zapaljiva i konsekventna toksična oblast.

Konsekventna analiza cevi peći ne obuhvata eksploziju oblaka isparenja, vatrene lopte, ili plamena koji izlazi iz cevi zbog toga što ložište služi kao izvor paljenja. Ovo smanjuje verovatnoću oblaka isparenja preko 10.000 lb (4535.92 kg) na veoma nizak nivo.

Kao prvo, treba napomenuti da je teško pronaći sve podatke smeše za RBI analizu. Redukovani gas nije čist materijal. Tako da se u API 581 preporučuje izbor jednog materijala na kome se zasnivaju karakteristike u smeši. API 581 preporučuje za izbor reprezentativnog fluida, fluid sa najnižom tačkom ključanja (NTK). U ovom slučaju, vodonik ima najveći procentualni udeo u redukovanom gasu, sa najnižom tačkom NTK u smeši, tako da nakon eliminacije inertnih materijala ono postaje

<sup>23</sup> American Petroleum Institute, *Risk-Based Inspection, Base Resource Document*, API 581, Washington, 2000.

alternativa za modelovanje. Reprezentativni fluid je ovde modelovan kao vodonični fluid, čije su karakteristike date u tabeli 4.5.4.

Tabela 4.5.4. Karakteristike i sastav redukovanog gasa u radijacionoj i konvekcionalnoj sekciji [9]

SASTAV	%	Mm	TSP C°	TK C°	Gustina Kg/m <sup>3</sup>	*C <sub>p</sub>	*K
H <sub>2</sub>	52.37	2	400	-252	71	1.64E+01	1.14E+00
CH <sub>4</sub>	24.03	16	595	59.4	1.81	1.43E+01	1.16E+00
CO <sub>2</sub>	3.33	44.01	/	-78.5	1.954	-7.38E-01	2.71E-01
CO	9.39	28	620	-191.6	0.961	2.61E-01	-1.51E-01
H <sub>2</sub> O	1.53	18	/	100	997.95	1.95E-01	-1.09E-02
N <sub>2</sub>	9.24	28.02	/	195.7	1.16	1.69E-01	-9.27E-01
H <sub>2</sub> S	25 ppmv	34.08	260	-59.4	61.993	...	...
Smeša		11.8533	410.67	-118.8	1.62	3.06E+01	2.22E+00

TSP – temperatura samopaljenja  
Mm – molekularna masa  
K=C<sub>p</sub>/(C<sub>p</sub>-R)

TK – tačka ključanja  
C<sub>p</sub>=A+BT+CT<sup>2</sup>+DT<sup>3</sup>  
R=1.987 BTU/(lb mol)(F)

Za izračunavanje stope ispuštanja, na početku je definisano kao ispuštanje koje se javlja u gasnom obliku. Gas ističe kroz mali otvor brzinom zvuka ili podzvučnom brzinom. Jednačina (4.5.9) se koristi da se odredi priroda protoka gasa. Ako je pritisak veći od P<sub>trans</sub> nastaje nadzvučna brzina. Rezultat iz jednačine (4.5.9) daje P<sub>trans</sub>=0.17MPa a procesni podaci pokazuju uzlazni pritisak 1.24 MPa, tako da gas ističe brzinom zvuka [9]:

$$P_{trans} = P_a \left( \frac{k+1}{2} \right)^{k/k-1} \quad (4.5.9)$$

Stopa ispuštanja se određuje za svaku veličinu otvora pomoću sledeće jednačine [9]:

$$W_g (sonic) = C_d A P \left[ \left( \frac{KM}{RT} \right) \frac{g_c}{144} \left( \frac{2}{K+1} \right)^{k+1/k-1} \right]^{1/2} \quad (4.5.10)$$

Tabela 4.5.5. Vrednosti isticanja za vodonik kroz otvore raznih veličina<sup>24</sup>

VODONIK					
koeficijent isticanja - C <sub>d</sub> =0.85					
OŠTEĆENJE	Isticanje kroz oštećenje		Količina ispuštanog gasa za 3 minuta		Vreme pražnjenja
	lb/s	kg/s	lb	kg	
Rupa prečnika 1 in – 25.4 mm	0.84	0.381	151.2	68.583	99.15
Rupa prečnika 4 in – 101.6 mm	13.44	6.096	2419.2	1097.330	6.19
Pucanje cevi	30.25	13.721	5445	2469.810	2.75

<sup>24</sup> American Petroleum Institute, *Risk-Based Inspection, Base Resource Document*, API 581, Washington, 2000.

API 581 modeluje sva ispuštanja kao trenutna ili kontinualna i postavljeni su kao pojednostavljeni metodi za modelovanje ispuštanja identifikacijom veličine otvora i količinom ispuštanja u roku od 3 min. U ovom radu ispuštena količina u roku od 3 min. je određena da potvrdi vrstu ispuštanja i utvrđeno je da je manje od 10.000 lb (4535.92 kg) u roku od 3 min. Ovo podržava Dodatak J za vrste ispuštanja za cevi peći u kontinualnoj formi. Imamo izračunate stope i količine ispuštanja za 3 min. za svaku veličinu otvora za vodonik i one su predstavljene u tabeli 4.5.5.

Na kraju, za određivanje ispuštanja, klasa zaliha je pronađena iz tabele B-3 dodatak B API 581. Klasa zaliha je B, tako da je 5000 lb (2267.96 kg) korišteno za određivanje oblasti konsekvence. U dodatku podacima o zalihama analitičar treba da evidentira i temperaturu samopaljenja reprezentativnog fluida u cilju određivanja oblasti konsekvenci zapaljivog i toksičnog fluida. U našem slučaju ispuštanje je kontinualno, a temperatura samopaljenja vodonika iznosi 400 °C. API 581 tvrdi da samopaljenje nije moguće ako je temperatura procesa manja od temperature samopaljenja plus 27°C. Iz podataka o procesu je nađeno da je samopaljenje moguće i plamen će izići iz otvora.

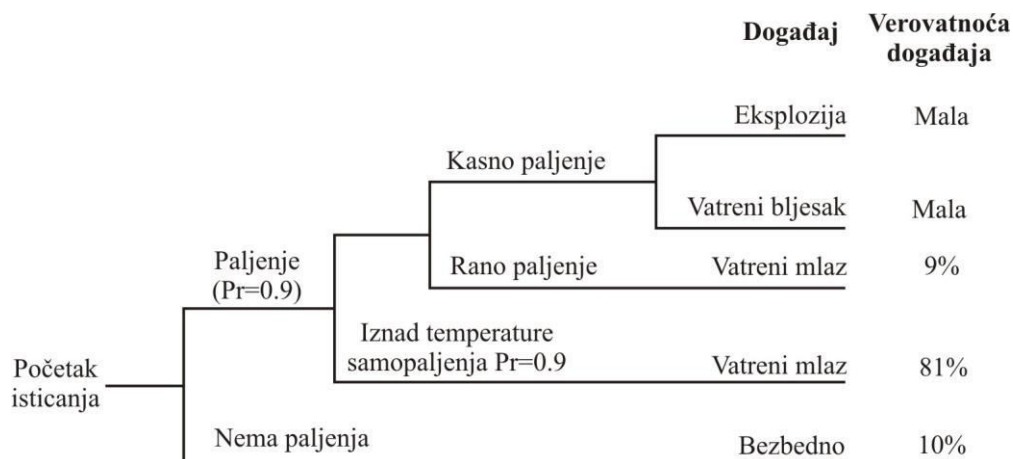
Tabela 4.5.6. Ukupna masa iscurelog fluida prema veličini oštećenja i zahvaćena oblast [9]

Površina opreme $A^*=1146X_a$				Zahvaćena površina $A=3072X_a$			
X	$X_{correct}$	A	$A_{correct}$	X	$X_{correct}$	A	$A_{correct}$
lb/s - kg/s	lb/s - kg/s	ft <sup>2</sup> - m <sup>2</sup>	ft <sup>2</sup> - m <sup>2</sup>	lb/s - kg/s	lb/s - kg/s	ft <sup>2</sup> - m <sup>2</sup>	ft <sup>2</sup> - m <sup>2</sup>
0.84	0.21	240.66	48.13	0.84	0.21	645.12	129.02
0.381	0.095	22.358	4.471	0.381	0.095	59.933	11.986
13.44	3.36	3850.56	770.11	15.5	3.36	10321	2064.36
6.096	1.524	357.728	71.545	7.030	1.524	958.852	191.785
30.25	7.56	8666.62	1733.3	35.25	7.56	23232	4646.4
13.721	3.429	805.155	161.028	15.989	3.429	2158.323	431.664
Verovatnoća pojave iznad tačke samopaljenja							
Paljenje		Vatreni mlaz		Vatreni bljesak		Eksplozija	
0.9		0.9		zanemarljivo		zanemarljivo	

X – ukupna stopa isticanja ili masa lb/s - kg/s

A – površina kontinualnog isticanja vodonika ft<sup>2</sup> - m<sup>2</sup>

Pre izračunavanja oblasti konsekvence, a stopa ispuštanja se treba podesiti za smanjivanje, otkrivanje i izolaciju sistema, koji može smanjiti oblast konsekvenci. U našem slučaju sistem za detekciju u fabrici je projektovan da otkrije ispuštanja prilikom promena u radu, a takođe i da zaustavi postrojenje bez uticaja rukovaoca. Stopa usaglašenog ispuštanja je označena sa  $X_{correct}$  i predstavljena je u tabeli 4.5.6. API 581 daje podešene oblasti konsekvenci za oslabljene sisteme, koji je u ovom slučaju sistem za gašenje požara vodom i sistem monitora, 20% manje od izračunate vrednosti. Podešena oblast konsekvenci je prikazana kao  $A_{correct}$  u tabeli 4.5.6. Stablo događaja se koristi za određivanje verovatnoće ispuštanja za zapaljive konsekvence. Stablo događaja prikazano na slici 4.5.1. koristi se za određivanje verovatnoće ispuštanja za zapaljive konsekvence.



Slika 4.5.1. Stablo događaja [9]

Razmatrajući toksične konsekvence u ovom slučaju, neophodno je da se uzme u obzir da je vodonik-sulfid veoma toksičan prilikom inhalacije i da može prouzrokovati oštećenje nervnog sistema. Redukcioni gas sadrži 25 ppmv H<sub>2</sub>S. Granična vrednost štetnosti njegove koncentracije je 10 ppm. Iz ovoga sledi da vodonik-sulfid može prouzrokovati toksični efekat nakon ispuštanja. Stopa ispuštanja u vreme trajanja ispuštanja se koriste za određivanje oblasti konsekvence za ovaj toksični gas. Rezultati analize konsekvenci su prikazani u tabeli 4.5.7.

Tabela 4.5.7. Analiza konsekvenci zapaljivosti prema veličini oštećenja

KONSEKVENCE	OŠTEĆENJE		
	Rupa prečnika 1 in – 25.4 mm	Rupa prečnika 4 in – 101.6 mm	Pucanje cevi
Frekvencija oštećenja usled puzanja	4.62x10 <sup>-6</sup>	1.32 x10 <sup>-6</sup>	6.60 x10 <sup>-7</sup>
Koeficijent veličine otvora	0.7	0.2	0.1
Konsekvencija zapaljivosti opreme	55.58	891.58	2006.07
Konsekvencija zapaljivosti opreme prema veličini otvora	38.90	178.31	200.60
Konsekvencija zapaljivosti postrojenja	148.92	2390.01	5377.53
Konsekvencija zapaljivosti postrojenja prema veličini otvora	104.24	478.00	537.75
Toksična konsekvencija	~7000	~100.000	...
Toksična konsekvencija prema veličini otvora	~4900	~20.000	...
Suma frekvenci oštećenja	6x10 <sup>-6</sup>	6x10 <sup>-6</sup>	6x10 <sup>-6</sup>
Površina konsekvence zapaljivosti opreme	417.82	417.82	417.82
Površina konsekvence zapaljivosti postrojenja	1119.99	1119.99	1119.99
Površina toksične konsekvence	24.900	24.900	24.900

### 4.5.5 Određivanje rizika

API 581 pruža semikvantitativni metod za procenu rizika za svaku komponentu. Ova analiza koristi matricu sa frekvencama na vertikalnoj osi (naveden po kategorijama 1 ÷ 5 sa 5 kao najvišom frekvencom događaja) i konsekvencama na horizontalnoj osi (naveden kao A ÷ E sa E kao najvišom konsekvencom). Delovi matrice indikuju postojanje visokog, srednje visokog, srednjeg, i niskog rizika, koji su obeleženi slovima V, SV, S, N u matrici rizika. Ova matrica je reinterpretacija Farmer-ove krive koja je prva objavljena kao kriterijum rizika 1967 [36].

Matrica rizika za ovaj slučaj za četiri različite vrste konsekvenci je prikazana na slici 4.5.2. Rezultati ove analize nisu dovoljno detaljno objašnjeni u API 581 iako su rezultati više od komparativnog značaja između različitih delova iste fabrike. Odbačena oprema radi u V ili u oblasti visokog rizika koja može biti potencijalno opasna. Ako obratimo pažnju na regulative visokog rizika iz Victoria Guidance Note 19 [111], one takođe daju slične grafike u dodatku 1. Međutim, gornji delovi grafa su identifikovani kao neprihvatljivi „društveni rizici”. Rezultati rada su zasnovani na klauzulama API 581 i prikazani su u tabeli 4.5.8.

Verovatnoća	5	SV	SV	SV	V	V	
	4	S	S	SV	SV	V	(I) - Konsekvenca zapaljivosti opreme
	3	N	N	S	SV	V	(II) - Konsekvenca zapaljivosti postrojenja
	2	N	N	S (IV)	S	SV	(III) - Toksična konsekvencija
	1	N	N	S (I)	S (II)	SV (III)	(IV) - Kvalitativni rezultat RBI
		A	B	C	D	E	Kategorija konsekvence

Slika 4.5.2. Semikvantitativna i kvalitativna matrica rizika za cevi peći izrađene od HK i HP materijala

Tabela 4.5.8. Intervali pregleda cevi peći na osnovu TMSF-a [9]

INTERVAL PREGLEDA	KARAKTERISTIKA PREGLEDA
20 godina	visokoefektivan
10 godina	efektivan
5 godina	niskoefektivan



## 4.5.6 Intervali pregleda

Za planiranje intervala pregleda API 581, za cevi peći preporučuje intervale pregleda zasnovane na TMSF, ako je manje ili veće od 10. Ako je aktuelni TMSF manji od 10, vremenski interval  $t_i$  (vreme u radu) 10.000 (~1 godina) dok TMSF ne dostigne 10. Broj vremenskih intervala je vreme do sledećeg pregleda,  $T_{insp}$  [8]. U ovom slučaju TMSF je manje od 10, sa povećanjem vremena u radu TMSF se nije promenilo. Posmatrajući API RBI tabelu 9-16 plan pregleda je prikazan u tabeli 4.5.9.

Tabela 4.5.9. Pregled rezultata RBI analize

Semikvantitativni rezultati	HK	HP
$FF_{LT}$	1.00E-300	0
$TMSF_{LT}$	0.55	0.55
$TMSF_{LT}$	0.02	0.02
Konsekvenca zapaljivosti opreme	C	C
Konsekvenca zapaljivosti postrojenja	D	D
Toksična konsekvenca	E	E
Kategorija verovatnoće	1	1
Kvalitativni rezultati		
Ukupna konsekvenca	D	D
Kategorija verovatnoće	2	2

## 4.5.7 Analiza standarda API 581

**Kako je uprošćen metod ?** API 581 je uprošćeni metod za RBI analizu peći. Dokument je veoma koristan ali ipak ima neke nedostatke. Dobre strane su:

- set predefinisanih dimenzija otvora koji se koristi za analizu verovatnoće,
- model konsekvenci za zapaljive, toksične, ekološke i poslovno loše događaje, model obuhvata:
  - o jednostavne metode za modelovanje emisije,
  - o pristup za modelovanje smeša koje ističu,
  - o jednostavne procedure za određivanje količine fluida koja je isticala u okolinu tokom neželjenog događaja,
  - o metode za određivanje pogođene oblasti prilikom isticanja,
  - o standardizovano stablo događaja,
  - o stvaranje uprošćene metodologije za procenu efektivnosti različitih tipova sistema sanacije, i
  - o obezbeđenje jednostavnih uputstava za određivanje zaliha.
- primena matrice rizika koja obuhvata konsekvence i verovatnoću radi procene rizika.

Neki nedostaci kod materijala kao što su HP i HK40 koji se koriste za izradu cevi peći nisu modelovani API 581 standardom. Brojne aktivnosti kao što su pretraživanje literature, korišćenje podataka od proizvođača su iskorišćeni u ovom radu radi generisanja neophodnih podataka. Da se primetiti da je RBI analiza na ovaj način vremenski zahtevna metoda a što se tiče podataka oni mogu biti i netačni.

Rizik u API 581 se koristi za preporuku frekvenci pregleda na osnovu konsekvenci i verovatnoće. API RBI uvodi intervale pregleda na osnovu TMSF ili analize verovatnoće. Glavni faktor za određivanje TMSF-a je sredina Lrason-Millerovog parametra, koji se ne može tačno odrediti na osnovu podataka od proizvođača.

U izrazima za određivanje TMSF-a za dugoročno puzanje jedini faktor koji se menja tokom vremena jeste vreme u radu koje se koristi za utvrđivanje vremena do naredne inspekcije. Za slučaj u našem radu za 100 godina TMSF je aproksimativno konstantno i manje je od 1. Kao rezultat za cevi peći sa srednjim rizikom krajnje efektivan period pregleda je na svakih 20 godina. Ovo je veoma dug period i veoma je atraktivan za rukovaoce. Međutim, nameće se pitanje: šta se u stvari predlaže ?

Krajnje efektivan predloženi pregled u API 581 se definiše kao UZ merenje debljine svih cevi i povezivanje mernih mesta UZ i FMR na različitim mestima. Razmatranje:

- FMR nije definisana u API 581. FMR se koristi u radu Valbuena i dr. [9] za prosečno polje metalografskih ponavljanja. Ovo je metod za otkrivanje oštećenja puzanjem, ali je takođe po nekim autorima i krajnje nepouzdan osim ako se ne koristi često (najmanje jednom godišnje, i ako postoji originalni uzorak bez oštećenja puzanjem.
- UZ merenjem se obično ne meri oštećenje puzanjem, nego se nameće pitanje šta se tu stvarno ispituje ?
- Povezivanje nije obuhvaćeno ovim standardom, ali ako to znači primenu mehaničkog povezivanja; svrha i dugoročni opstanak takvih veza nije jasan.
- Predloženi pregledi ne obuhvataju merenje prečnika, merenje oksidnih naslaga ili merenje prskotina koje su inače značajne za otkrivanje problema povezanih sa puzanjem.

Po razmatranju ovih detalja nije nam jasno na koji način režimi pregleda daju efektivan odgovor na različite kategorije rizika, pogotovo na one u H oblasti. Jasno je da postoji potreba za nekim promenama da li u radu operatera, ili u procesu, ako se utvrdi da postoji određeni rizik.

Primenili smo API 581 na cevi peći. Cevi peći koje se razmatraju u ovom radu nisu navedene u standardu API 581, tako da odatle i polazi poteškoća primene na naše cevi.

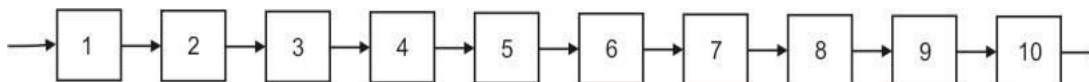
Takođe postoje poteškoće oko saznanja koje implikacije RBI su za preglede. U našem primeru, glavni rezultat je da rizik oštećenja važi (određen TMSF treba da bude manji od 10) za veoma dug period, tako da se inspekcije zahtevaju svakih 20 godina. Pošto projektovani životni vek važi 20 godina, ispada da po ovom standardu cevi nikad ne bi trebalo pregledati. Ovako dobijen rezultat izgleda veoma optimistično, ali se ipak ne može primeniti za cevi peći koje rade u režimu puzanja.

## 4.6 Novi model pouzdanosti pirolitičkih peći sa interaktivnim otkazima komponenti

Na osnovu eksploatacionih istraživanja pouzdanosti sekcije pirolitičkih peći u okviru fabrike etilena sprovedenim od 2005. do 2015. godine i postojeće baze podataka o pogonskim stanjima sistema u tom periodu izvršena je dekompozicija sekcije pirolitičkih peći na 10 komponenti. Inače klasifikacija je predefinisana u obimnoj bazi podataka. Deo baze podataka podrazumeva evidenciju pogonskih stanja sledećih sistema koji su inače numerisani na sledeći način:

- sistem napojne vode - 01
- sistem pare - 02
- sistem sirovine - 03
- sistem loživog gasa - 04
- ventilator - 05
- radijaciona sekcija - 06
- konvekciona sekcija - 07
- oplata i izolacija - 08
- izmenjivači toplote - 09
- merno-regulaciona oprema - 10

U skladu sa izrečenim blok dijagram pouzdanosti jedne peći (identičan za sve peći) predstavljen je na slici 4.6.1.



Slika 4.6.1. Blok dijagram pouzdanosti pirolitičke peći

Baza podataka je sa preko 2000 radnih stanja za svaku pirolitičku peć. Kako su baze podataka velikog obima promene radnih stanja „u otkazu“ su prikazane u tabeli 4.6.1, a prema klasifikaciji iz baze podataka za pirolitičke peći.

Model koji uvažava interakciju komponenti zasniva se na kombinovanom uticaju komponenti što će reći da otkaz jedne komponente utiče na drugu promenom nivoa pouzdanosti i hazarda putem „ostarivanja komponente“ za određeni vremenski interval. Uticaj afektujuće komponente će prouzrokovati postepeni ili momentalni otkaz afektovane komponente u zavisnosti od veličine vremenskog intervala kojim se komponenta „ostarila“.

Pretpostavke ovog modela su:

- sistem kontinuirano radi,
- sistem se održava kombinovano i to korektivno po otkazu komponente sistema za datu komponentu, a preventivno tokom remonta,
- svaka komponenta sistema nakon otkaza biva zamenom ili popravkom dovedena na nivo pouzdanosti od 100%,

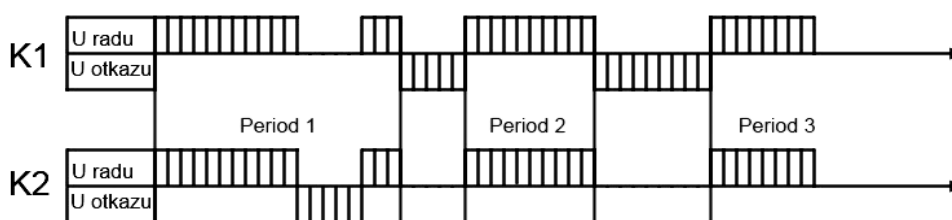
- sistem jednom godišnje ima remont – veliku periodičnu opravku, nakon koje biva doveden u stanje pouzdanosti 100%,
- model polazi od pretpostavke da sve komponente sistema mogu imati interakciju čime se ne stvara mogućnost previda pojedinih interakcija.

Tabela 4.6.1. Broj otkaza komponenti prema klasifikaciji iz baze podataka

PIROLITIČKA PEĆ	KOMPONENTA									
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10
F1-A	3	25	9	154	19	129	4	5	78	230
F1-B	2	27	8	172	11	135	5	4	45	208
F1-C	10	18	3	121	16	118	9	7	49	198
F1-D	1	22	6	109	18	108	6	3	52	221
F1-E	7	8	13	155	14	114	1	8	64	215
F1-F	4	12	8	142	15	121	7	6	65	228
F1-G	8	21	5	138	19	126	8	7	71	204
F1-H	11	19	7	161	21	131	3	5	59	214

### Deriviranje vremena otkaza i vremena u radu iz baze podataka

Za svaku komponentu sistema treba utvrditi vremena u otkazu i vremena u radu. Zasebno treba odvojiti vremena bezotkaznog rada prema broju međuotkaza svake od ostalih komponenti kako bi se utvrdio uticaj svake od njih. Prikaz je dat na slici 4.6.2. i ukazuje na odnos otkaza afektovane i afektujuće komponente. Obeleženi periodi rada ukazuju na mogućnost da postoje međuotkazi afektujuće komponente ( $K2$ ) tokom bezotkaznog rada afektovane komponente ( $K1$ ) poput perioda 1 ili da ih nema poput perioda 2 i perioda 3. Naravno postoji i mogućnost višestrukih međuotkaza.

Slika 4.6.2. Odnos otkaza afektovane ( $K1$ ) i afektujuće ( $K2$ ) komponente

### Kvadratna regresiona analiza srednjeg vremena do pojave otkaza ( $MTTF$ ) afektovane komponente u zavisnosti od broja međuotkaza afektujuće komponente

Analizom srednjeg vremena do pojave otkaza afektovane komponente za različite brojeve međuotkaza potencijalno afektujuće komponente dobija se jasna slika o postojanju i karakteru interakcije komponenti koje su obuhvaćene analizom. Rezultat je kvadratna jednačina koja može poslužiti i trendovanju. Kriterijum valjanosti regresione jednačine je koeficijent determinacije ( $R^2$ ). Broj kombinacija koje treba analizirati zavisi

od dekomponovanja sistema i potrebno je svaku komponentu smatrati potencijalno afektujućom u odnosu na sve ostale komponente sistema.

Jednačina je oblika [75]:

$$y = ax^2 + bx + c, \quad x \geq 0, y \geq 0, x \in \mathbb{N}_0 \quad (4.6.1)$$

gde je:

$y$  - zavisna promenljiva (srednje vreme do pojave otkaza afektovane komponente),

$x$  - nezavisna promenljiva (broj međuotkaza afektujuće komponente).

Koeficijenti polinoma  $a$  i  $b$  omogućuju identifikovanje uticaja održavanja i interakcije komponenti ukoliko oni postoje.

### **Selekcija slučajeva u kojima postoji interakcija otkaza komponenata**

Prvi kriterijum selekcije slučajeva u kojima postoji interakcija je broj stepena slobode. Kako je broj stepena slobode jednak  $n - 2$  gde je  $n$  broj tačaka *MTTF* za određeni broj međuotkaza i kako je kao kriterijum uzet minimum stepena slobode 3 to je minimalni broj tačaka 5. Kada se izuzmu slučajevi koji ne ispunjavaju ovaj kriterijum ostaje 90 slučajeva za preostale peći koji ispunjavaju i mogu se dalje razmatrati.

Kao sledeći kriterijum selekcije je odabran da vrednost koeficijenta determinacije bude veća od 0,9 ( $R^2 > 0,9$ ).

### **Određivanje odgovarajuće raspodele pojave otkaza između Vejbulove troparametarske (u daljem tekstu W3) ili dvoparametarske (u daljem tekstu W2)**

Da bi se ovaj zadatak obavio opet se mora posegnuti za softverskim rešenjem usled velikog broja proračuna koji se očekuje. Matematičko rešenje je kompleksno pa je efikasan način numeričko rešavanje problema koje treba da nađe odgovarajuću raspodelu a onda i vrednosti parametara raspodele sa zadovoljavajućom tačnošću. Ovaj proračun terba da uzme u obzir samo otkaze afektovanih komponenti koje nemaju međuotkaze njihovih afektujućih komponenti kako bi se došlo do raspodele. Određivanje parametara se svodi na pokušaj određenja u okvirima W3 raspodele a onda ukoliko nema rešenja koje zadovoljava parametar položaja raspodele  $\gamma$  dobija vrednost 0 i nastavlja se sa određivanjem parametara W2 raspodele.<sup>25</sup> Za rešavanje ovog problema moguće je koristiti bilo koji ranije opisan metod određivanja ovih parametara.

### **Stvaranje matrice interakcije**

Potrebno je formirati matricu oblika [75]:

$$Y := (y_{k_1, k_2})_{m \times m} \quad (4.6.2)$$

gde je:

$y_{k_1, k_2}$  - regresiona kvadratna funkcija,

$k_1$  - afektovana komponenta,

$k_2$  -afektujuća komponenta,

<sup>25</sup> Kucora, I., Radovanovic, Lj., Milosevic, D., Vulovic, S., Kovacevic, M., Otic, G., Adamovic, Z., 2016, Increasing Safty of Power Plant Using a New Model of Reliability, Energy Sources Part B: Economics, Planning, and Policy, (UESB-2016-0082; DOI: 10.1080/15567249.2016.1185481)

$m$  - broj komponenta sistema,  
i važi:

$$y_{k_1,k_2} = a_{k_1,k_2}x^2 + b_{k_1,k_2}x + c_{k_1,k_2}. \quad (4.6.3)$$

Ovaj korak treba da obezbedi formiranje slike sveukupne interakcije među komponentama sistema. Ukoliko ne postoji interakcija između komponenti tada je  $y_{k_1,k_2} = 0$ . Potrebno je da simulacioni softver učitava vrednosti iz matrice, te u trenutku pojave otkaza utvrdi vrednost promene *MTTF* afektovane komponente *K1* usled pojedinog otkaza afektujuće komponente iz matrice.

Da bi softver mogao da simulira rad sistema prema pouzdanosti potrebno je prethodno definisati promene pouzdanosti afektovane u trenutku pojave otkaza afektujuće komponente. U tu svrhu služi matrica interakcije i kao opšte rešenje za sve slučajeve možemo navesti sledeći proračun.

Posle svakog otkaza afektujuće komponente *K2* dolazi do promene vrednosti *MTTF* afektovane komponente *K1* u smislu njenog smanjenja kada se komponente „ostaruje“ ili povećanja kada se komponenta „podmlađuje“. Ovaj vremenski „pomak“ vrednosti *MTTF* afektovane komponente *K1* bi se mogao formulisati uvođenjem nove promenljive  $\tau_p$  koja za negativne vrednosti ( $\tau_p < 0$ ) označava ostarivanje komponente a za pozitivne ( $\tau_p > 0$ ) njeno podmlađivanje nakon otkaza afektujuće komponente i preventivnog održavanja. Kako bi se došlo do opšteg obrasca za ovu promenljivu potrebno je razmotriti šta se dešava u svakom od međuohtaka pojedinačno.

Lako je izraziti poneke vrednosti *MTTF* u opštim brojevima kao [75]:

$$MTTF_x - MTTF_{x-1} = (2x-1) \cdot a_{k_1,k_2} + x \cdot b_{k_1,k_2} \quad (4.6.4)$$

Sada je neophodno utvrditi za koliko to treba afektovanu komponentu sistema podmladiti ili ostariti sa svakim otkazom afektujuće komponente kako bi se promena  $MTTF_x - MTTF_{x-1}$  izvršila za celokupno kretanje pouzdanosti. Pošto se u trenutku prvog međuohtaka  $t_1$  događa zastoj sistema i preventivno održavanje afektovane komponente *K1*, vrednost pouzdanosti se menja od  $R_{k_1}(t)_0$  u vrednost  $R_{k_1}(t)_1$ . Ove dve vrednosti se nalaze u sledećoj relaciji [75]:

$$R_{k_1}(t)_1 = R_{k_1}(t + \tau_p)_0. \quad (4.6.5)$$

Kako je već prethodno definisano vrednost vremenskog pomaka  $\tau_p$  definiše da li će nakon međuohtaka vrednost pouzdanosti afektovane komponente opasti ili porasti. Negativna vrednost promenljive  $\tau_p$  podmlađuje komponentu i time povećava pouzdanost afektovane komponente dok pozitivne vrednosti promenljive  $\tau_p$  ostaruju afektovanu komponentu i smanjuju vrednost pouzdanosti. Promene se posledično događaju i po pitanju hazarda pa je model kombinovan jer obuhvata promene i hazarda i pouzdanost. Pitanje na koje treba dati odgovor je: Kako definisati vrednost promenljive  $\tau_p$  kako bi se nakon međuohtaka afektujuće komponente dogodila odgovarajuća promena srednje vrednosti do pojave otkaza afektujuće komponente  $MTTF_x - MTTF_{x-1} = (2x-1) \cdot a_{k_1,k_2} + x \cdot b_{k_1,k_2}$ ?

Ukoliko vrednost  $MTTF$  posmatramo kao vremensku tačku koja površine ispod krive pouzdanosti deli na dva jednaka dela onda možemo zaključiti da vremenski pomak  $\tau_p$  menjajući samo pouzdanost nakon međutokaza utiče na ukupnu vrednost  $MTTF$  u zavisnosti od odnosa vrednosti pouzdanosti pre međutokaza  $R_{k_1}(t_1)_0$  i preostale pouzdanosti u slučaju da se međutokaz nije ni dogodio, tj. nepouzdanosti afektovane komponente  $F_{k_1}(t_1)_0 = 1 - R_{k_1}(t_1)_0$ . Tako je vremenski pomak za slučaj prvog otkaza definisan kao [55]:

$$\tau_p = \frac{2 \cdot (MTTF_1 - MTTF_0) \cdot (1 - R_{k_1}(t_1)_0)}{R_{k_1}(t_1)_0} = \frac{2 \cdot (MTTF_1 - MTTF_0) \cdot F_{k_1}(t_1)_0}{R_{k_1}(t_1)_0} \quad (4.6.6)$$

Predstavljajući promene u opštim brojevima nakon  $x$ -tog međutokaza može se napisati [75]:

$$\tau_p = \frac{2 \cdot (MTTF_x - MTTF_{x-1}) \cdot (1 - R_{k_1}(t_x)_{x-1})}{R_{k_1}(t_x)_{x-1}} \quad (4.6.7)$$

Povezivanjem jednačina 4.6.4 i 4.6.7 dobija konačni oblik potrebnog vremenskog pomaka afektovane komponente  $\tau_p$  nakon međutokaza  $x$  afektujuće komponente [75]:

$$\tau_p = \frac{2 \cdot ((2x-1) \cdot a_{k_1,k_2} + x \cdot b_{k_1,k_2}) \cdot (1 - R_{k_1}(t_x)_{x-1})}{R_{k_1}(t_x)_{x-1}} \quad (4.6.8)$$

gde je

$x$  - redni broj međutokaza afektujuće komponente,

$k_1$  - afektovana komponenta,

$k_2$  - afektujuća komponenta,

$R_{k_1}(t_x)_{x-1}$  - pouzdanost afektovane komponente pre pojave međutokaza.

Sledi stvaranje matrice interakcije oblika  $Y := (y_{k_1,k_2})_{m \times m}$  a prema m formuli 4.6.2 gde je prema 3  $y_{k_1,k_2} = a_{k_1,k_2} \cdot x^2 + b_{k_1,k_2} \cdot x + c_{k_1,k_2}$ . Potrebno je formirati matricu interakcije za svaku peć na sekciji. Da je neka od vrednosti  $y_{k_1,k_2} = 0$ , jasno je da otkaz komponente  $k_2$  ne ostvaruje uticaj na  $MTTF$  komponente  $k_1$ . Matrica interakcije komponentata peći F1-A je data kao: (4.6.9)

$$Y_{F1-A} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -658,3 \cdot x^2 + 51.634 \cdot x + 31.434 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1.446 \cdot x^2 + 46.435 \cdot x + 65.324 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1.225 \cdot x^2 + 52.211 \cdot x + 3.876,5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2.220 \cdot x^2 - 1.185 \cdot x + 31.187 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

a matrica interakcije komponenata peći F1-B je data kao:

$$Y_{F1-B} := \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -589,1 \cdot x^2 + 56,587 \cdot x - 53,634 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1,321,3 \cdot x^2 + 10,156 \cdot x + 32,431 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1,463 \cdot x^2 + 89,523 \cdot x - 21,589 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1,563 \cdot x^2 + 102,768 \cdot x - 13,567 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (4.6.10)$$

### Korekcija parametara i simulacije pouzdanosti sekcije pirolitičkih peći

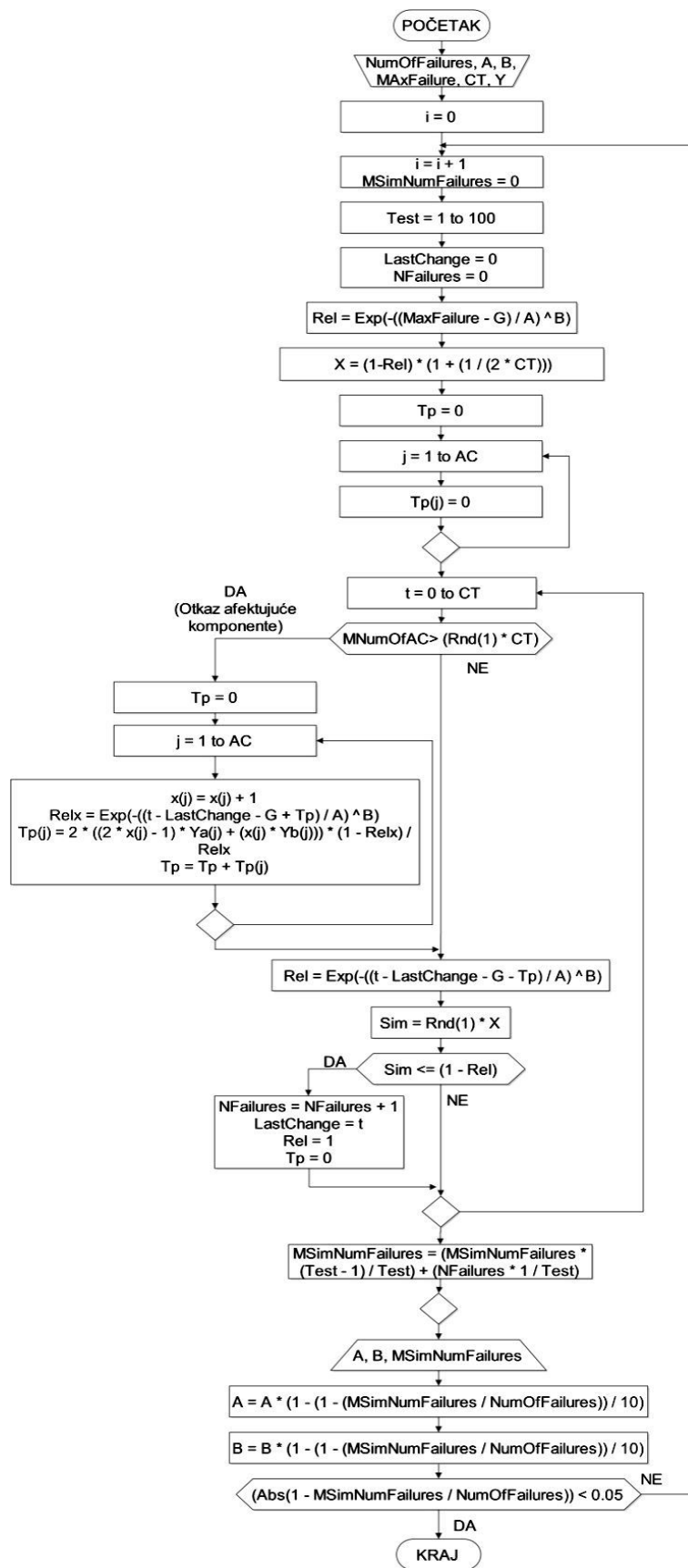
Pošto su definisani matematizmi za ostvarivanje modela dalje je neophodno obezbediti da simulacija bude validna. Potrebno je da broj otkaza u simulaciji reprezentuje broj otkaza iz baze podataka. Nakon toga treba kreirati simulaciju pouzdanosti celog sistema. Ovo je neophodno uraditi u 3 koraka:

- kreiranje softvera za prikupljanje neophodnih podataka iz baze,
- korekcija parametara putem simulacije (validacija),
- simulacija rada sistema.

Nakon dobijanja potrebnih podataka drugi korak jeste korekcija parametara W3 ili W2 raspodele. Inicijalni parametri se odnose na kontinualne promenljive i prelazak na diskretne je neophodan radi formiranja simulacije rada sistema. Svakako da broj tačaka proračuna utiče na to koliko će iznositi vrednosti korigovanih parametara raspodele pa je neophodno da one budu identične za vreme obe simulacije, tj. i za vreme korekcije parametara i simulacije pouzdanosti sistema. Algoritam korekcije parametara je prezenotovan na slici 4.6.3.

Ovaj algoritam je kompleksniji u toliko u koliko je neophodno simulirati i otkaze afektovane komponente i svih njoj afektujućih komponenti. Kada ne postoje afektujuće za datu komponentu sve je dosta simplifikovano. Kada je prisutna samo jedna, nešto složenije, no još složenije sa više afektujućih komponenti. Ipak najkompleksniji slučajevi mogu biti i oni kod kojih je više komponenti afektovanih i afektujućih uzajamno i u takvoj situaciji korekcija parametara je nemoguća usled toga što su sve promenljive i zavisne i nezavisne istovremeno. Ovde se mora pribeći univerzalnom rešenju preko srednjeg broja otkaza afektujuće komponente tokom godine i preko kvazi slučajne promenljive simlifikovano simulirati broj otkaza afektujućih komponenti. Ovime se postiže mogućnost da se jedna po jedna komponenta izlože simulaciji i koriguju njeni parametri raspodele pojave otkaza. Ovime se pravi jedna aproksimacija te pojava otkaza afektujuće komponente smatra jednako verovatnom u svakom trenutku vremena. Ovo nije gruba greška usled toga što na dugi period simulacije nije od ključne važnosti kada je nastao otkaz afektujuće komponente pa je aproksimacija zadovoljavajuća.





Slika 4.6.3. Algoritam korekcije parametara sistema sa interaktivnim otkazima komponenti [75]

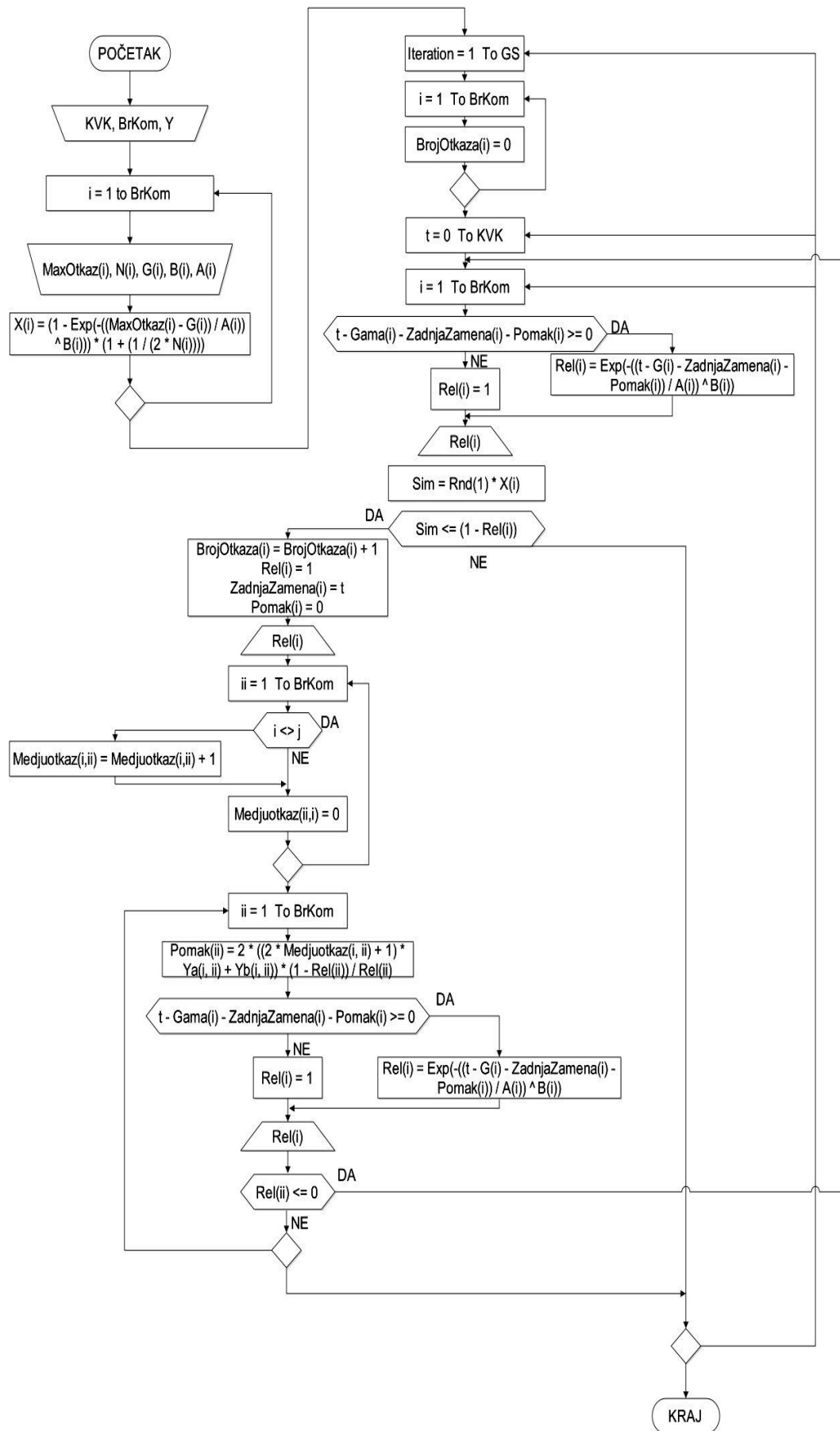
Na slici 4.6.3 u algoritmu simulacije važi:

*NumOfFailures* - broj otkaza afektovane komponente,  
*G, B, A* - parametri položaja, oblika i razmere raspodele afektovane komponente,  
*MaxFailures* - vreme maksimalnog otkaza afektovane komponente,  
*CT* - krajnje vreme kalkulacije,  
*Y* - Matrica interakcije  
*LastChange* - vreme poslednje zamene/popravke afektovane komponente,  
*X* - promenljiva koja određuje otkaz afektovane komponente,  
*Sim* - pseudo-slučajni broj čija vrednost određuje otkaze komponente (podсистема),  
*Tp* - vreme pomaka usled međuotkaza afektujućih komponenti,  
*Tp(i)* - vreme pomaka usled međuotkaza afektujuće komponente *i*,  
*MSimNumFailures* - srednji broj otkaza afektovane komponente tokom simulacije.

Ovi podaci su neophodni inputi drugog koraka - korekcije parametara W3 ili W2 raspodele. Ovaj korak znači primenu softvera prezentovanog algoritmom na slici 4.6.4 koji simulira rad svake pojedinačne komponente. Softver menja vrednosti parametara proporcionalno tako da se prosečan broj otkaza prema simulaciji dovede na stvarni godišnji prosek. Nakon toga se dobijaju konačne vrednosti parametara za slučajeve. Softver dakle koriguje vrednosti parametara *i* u skladu sa verovatnoćom pojave otkaza afektujućih komponentata te u skladu sa već definisanim vremenskim pomakom  $\tau_p$  koriguje trenutni nivo pouzdanosti komponente. U ovim slučajevima nije bilo teškoća da se realizuje simulacija pogotovu što nije bilo pojave kružnog afektovanja komponenti koji bi mogao da zada određene ne male probleme u realizaciji ovog koraka.

Na slici 4.6.4 u algoritmu simulacije važi:

*KVK* - krajnje vreme kalkulacije,  
*BrKom* - broj komponenti sistema,  
*Y* - Matrica interakcije,  
*MaxOtkaz* - vreme maksimalnog otkaza afektovane komponente,  
*N(i)* - broj otkaza komponente *i*,  
*G, B, A* - parametri položaja, oblika i razmere raspodele,  
*GS* - broj iteracija testa tj. broj godina simulacije rada sistema,  
*BrojOtkaza(i)* - simulacioni broj otkaza komponente *i*,  
*Rel(i)* - pouzdanost komponente *i*,  
*X* - promenljiva koja određuje otkaz pojedine komponente,  
*Sim* - pseudo-slučajni broj čija vrednost određuje otkaze komponente (podсистема),  
*Zadnja zamena* - vreme poslednje zamene/popravke afektovane komponente,  
*Pomak(i)* - vreme pomaka usled međuotkaza afektujuće komponente *i*.  
*Medjuotkaz* - simulacioni broj medjuotkaza afektujuće komponente,



Slika 4.6.4. Algoritam softvera simulacije pouzdanosti pirolitičke peći [75]

# P e t i d e o

## EMPIRIJSKA ISTRAŽIVANJA

### 5.1 Procena zamora materijala cevi peći usled puzanja

Procena interakcije između oštećenja cevi puzanjem i zamorom je izuzetno važna prilikom projektovanja i eksploatacije etilenskih peći. Visokougljenični centrifugalno liveni HK40 čelik se rasprostranjeno koristi za cevi peći koje su izložene uticaju visokih temperatura (oko 900 °C) i visokim unutrašnjim pritiscima. U etilenskim pećima, endotermna reakcija stvara veliku temperaturnu razliku između unutrašnjeg i spoljašnjeg zida cevi, tako da su cevi konsekventno izložene ciklusima termalno indukovanih izduženja koje su rezultat ciklusa pokretanja i zaustavljanja, kao i podešavanja parametara tokom rada.

Generalno se verovalo da kada se neelastične deformacije kao što je puzanje (relaksacija) dodaju ponovljenim elastičnim deformacijama, usled čega nastaju oštećenja zbog zamora materijala. Životni vek usled zamora postaje kraći, nego u slučajevima kada nema neelastičnih deformacija. Takva pojava se naziva interakcija puzanje-zamor. Neke metode su primenljive za procenu takvih oštećenja, npr. pravilo životne frakcije (LFR) koje je predložio Robinson i kao takvo je prihvaćeno u ASME section III, B. & P.V., Code Case N-47 [11] i metoda particioniranja istezanja (SRP) koju je predložio Manson [80]. Međutim, čini se da sistematska proučavanja životnog veka usled interakcije puzanje-zamor nisu tako dobra da bi se usvojila kao kriterijum za projektovanje cevi peći koje su izložene dejstvu visokih temperatura.

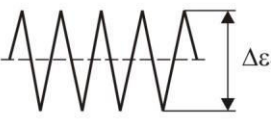
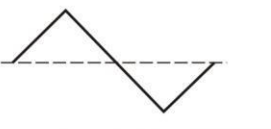
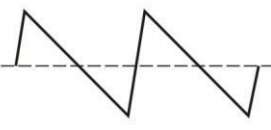
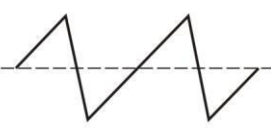
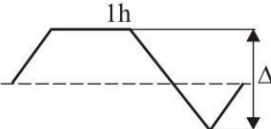
U ovom delu rada je zbog toga napravljen pokušaj da se razjasne karakteristike loma usled puzanja legure HK40 kao i njene karakteristike interakcije puzanje-zamor s aspekta raznih opterećenja talasnog oblika, čime bi se doprinelo kriterijumima za projektovanje cevi etilenskih peći koje su izložene ovakvim oblicima oštećenja.

Ispitivanja su izvedena na temperaturama od 800, 900 i 1000 °C, a temperatura je merena na sredini epruvete. Prilikom ispitivanja interakcije puzanje-zamor korišćena su dva oblika talasa opterećenja koja su prikazana u tabeli 5.1.1; trougaoni i trapezoidni oblik talasa sa vremenom trajanja od 1h.

U zavisnosti od stepena istezanja (brzo i sporo) tokom opterećenja i rasterećenja, trougaoni oblik talasa se razvrstava u četiri vrste: PP talasi (brzi – brzi), CC talasi (spori – spori), PC talasi (brzi – spori) i CP talasi (spori – brzi).

Stopa brzog izduženja je 2 %/s, što je dovoljno brzo da se zanemare deformacije od puzanja, a stopa sporog izduženja je 0.02 %/s, što je dovoljno sporo da se stvore oštećenja usled puzanja. Za trapezoidne oblike talasa, stopa sporog izduženja je 0.02 %/s i ona je usvojena za opterećenje i rasterećenje.

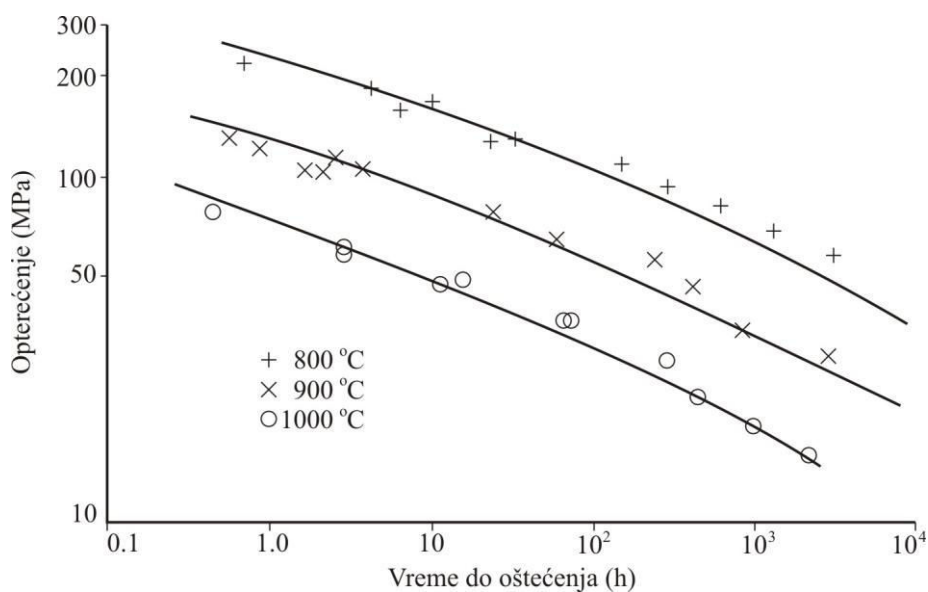
Tabela 5.1.1. Šematski prikaz oblika talasa opterećenja za ispitivanje interakcije puzanje - zamor

Forme opterećenja			Stopa izduženja (% / sec)	
			Istezanje	Sabijanje
Trougaoni talasi	pp		2	2
	cc		0.02	0.02
	pc		2	0.02
	cp		0.02	2
Trapezoidni talasi	tr		0.02	0.02

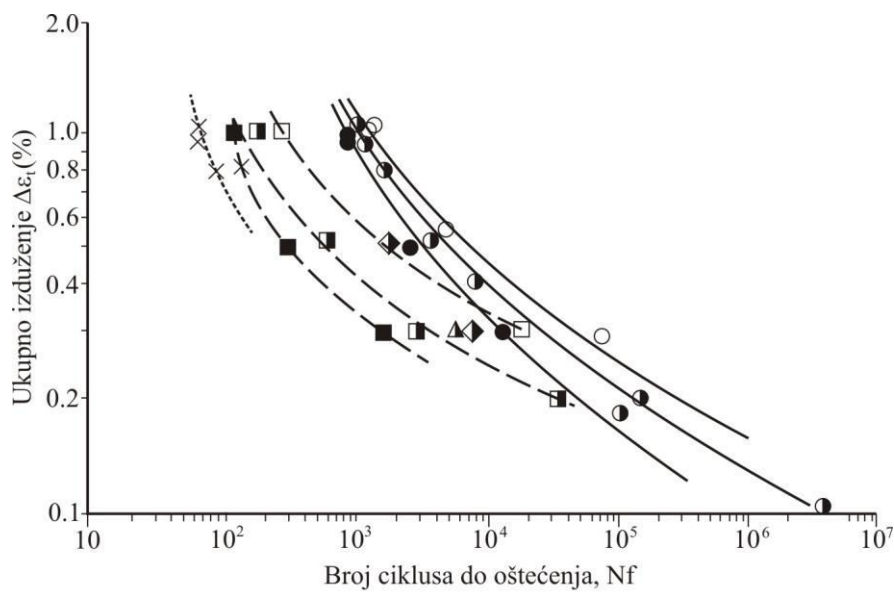
Karakteristike uzoraka na puzanje su prikazane na slici 5.1.1. Za procenu oštećenja puzanja u jednačini (5.1.1) u odnosima između opterećenja i vremena loma su od velike važnosti podaci o vrednostima opterećenja za slučaj kada oštećenje usled puzanja nastaje u veoma kratkom roku. Tako da je napravljen pokušaj da se dobije što je više moguće podataka. Sa slike 5.1.1 se vidi da, ako je veća temperatura ispitivanja onda je kraće vreme do oštećenja. Redukcija oblasti (R.A.) epruvete je 5 do 10%.

Rezultati ispitivanja interakcije puzanje-zamor su prikazani u tabelama 5.1.2, 5.1.3 i 5.1.4, kao i na slici 5.1.2. Slično rezultatima ispitivanja oštećenja usled puzanja, i rezultati ispitivanja interakcije puzanje-zamor pokazuju da je na višim temperaturama ispitivanja kraći životni vek (broj ciklusa do oštećenja). Pod takvim uslovima ispitivanja zapaženo je da se broj ciklusa do pojave oštećenja postepeno smanjuje po sledećem redosledu: pp talasi, cc talasi, pc talasi, i cp talasi, dok se u slučaju primene trapezoidnih talasa ono drastično smanjuje.

Broj ciklusa do pojave otkaza se definiše kao broj ciklusa kada maksimalno opterećenje zatezanja dostigne 25% maksimalne vrednosti dobivene pod stabilnim uslovima [24].



Slika 5.1.1. Karakteristike materijala HK40 na puzanje



Temperatura	Troughaoni talasi				Trapezoidni talasi
	pp	cp	pc	cc	
800 °C	○	□			×
900 °C	◐	◑	▲	◆	
1000 °C	●	■			

Slika 5.1.2. Rezultati ispitivanja interakcije puzanje – zamor pomoću različitih formi opterećenja na određenim temperaturama

Tabela 5.1.2. Rezultati ispitivanja uzoraka na 800 °C pomoću talasnog oblika opterećenja tipa: pp i cp

Uslovi ispitivanja			Opseg neelastičnog izduženja	SRP izduženje		SRP životni vek		Opterećenje	Maksimalno zatezno opterećenje	Broj ciklusa do oštećenja	Oštećenje usled puzanja	Oštećenje usled zamora
Temperatura (°C)	Oblik talasa	Ukupno izduženje (%)	$\Delta\varepsilon_{in}$ (%)	$\Delta\varepsilon_{pp}$ (%)	$\Delta\varepsilon_{ij}$ (%)	$N_{pp}$ (ciklusa)	$N_{ij}$ (ciklusa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\sigma_{tmax}$ (MPa)	$N_f$ (ciklusa)	$\phi_c$ $\Sigma(t/t_r)$	$\phi_f$ $n/N_f$
800	pp	0.998	0.517	0.517		1.484		463.58	226.92	1.484		
		1.006	0.545	0.545		1.310		491.51	242.32	1.310		
		0.499	0.182	0.182		6.155		370.98	184.76	6.155		
		0.300	0.046	0.046		76.460		278.20	142.52	76.460		
	cp	1.004	0.595	0.200	ij=cp 0.395	5.508	ij=cp 0.189	422.37	191.72	0.279	0.335	0.214 (1.303)
		0.503	0.236	0.145	0.091	8.766	0.838	353.72	167.59	1.885	0.335	0.247 (7.640)
		0.301	0.049	0.032	0.017	77.814	7.361	271.71	135.13	18.008	0.266	0.394 (45.737)

pp talasi - stopa izduženja pri istezanju: 2 % / s  
pp taalsi - stopa izduženja pri sabijanju: 2 % / s

cp talasi - stopa izduženja pri istezanju: 0.02 % / s  
cp talasi - stopa izduženja pri sabijanju: 2 % / s

Tabela 5.1.3. Rezultati ispitivanja uzoraka na 900 °C pomoću talasnog oblika opterećenja tipa: pp, cp, cc i pc

Uslovi ispitivanja			Opseg neelastičnog izduženja	SRP izduženje		SRP životni vek		Opterećenje	Maksimalno zatežno opterećenje	Broj ciklusa do oštećenja	Oštećenje usled puzanja	Oštećenje usled zamora
Temperatura (°C)	Oblik talasa	Ukupno izduženje (%)	$\Delta\varepsilon_{in}$ (%)	$\Delta\varepsilon_{pp}$ (%)	$\Delta\varepsilon_{ij}$ (%)	$N_{pp}$ (ciklusa)	$N_{ij}$ (ciklusa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\sigma_{tmax}$ (MPa)	$N_f$ (ciklusa)	$\phi_c$ $\Sigma(t/t_r)$	$\phi_f$ ( $n/N_f$ )
900	pp	1.014	0.643	0.643		958		357.25	175.93	958		
		1.021	0.519	0.519		884		359.12	176.62	884		
		1.013	0.655	0.655		1.480		362.26	178.68	1.480		
		0.800	0.489	0.489		1.902		352.78	173.97	1.902		
		0.522	0.211	0.211		3.840		306.85	152.69	3.840		
		0.406	0.183	0.183		8.420		299.91	148.98	8.420		
		0.301	0.068	0.068		18.497		252.08	125.31	18.497		
		0.200	0.024	0.024		144.870		212.51	106.50	144.870		
		0.180	0.021	0.021		106.390		181.13	92.970	106.390		
		0.103				$>3.86 \times 10^6$		107.34	62.160	$>3.86 \times 10^6$		
	cp	1.015	0.728	0.155	ij=cp 0.573	7.961	ij=cp 110	321.17	131.41	140	0.543	0.133 (1.052)
		0.514	0.287	0.091	0.196	17.186	432	286.84	121.31	625	0.467	0.127 (4.937)
		0.307	0.102	0.040	0.062	56.367	1.825	238.01	104.34	2.940	0.447	0.131 (22.502)
		0.202	0.038	0.014	0.023	256.948	20.654	176.85	82.110	31.708	0.889	0.284 (111.825)
	cc	0.499	0.322	0.055	ij=cp 0.268	35.578	ij=pc 580	209.26	101.96	2.090	0.845	0.392 (5.331)
		0.300	0.148	0.011	0.137	364.074	3.692	183.66	90.370	7.757	0.757	0.319 (24.617)
	pc	1.002	0.740	0.095	ij=pc 0.645	16.151	ij=pc 580	298.70	175.64	662	0.280	0.613 (0.1080)
		0.299	0.151	0.064	0.087	28.581	3.692	273.90	139.84	5.853	0.182	0.2338 (24.617)



Tabela 5.1.4. Rezultati ispitivanja uzoraka na 1000 °C pomoću talasnog oblika opterećenja tipa: pp i cp i na 900 °C pri jednočasovnom dejstvu istežućeg opterećenja uz stopu izduženja od 0.02 % / s.

Uslovi ispitivanja			Opseg neelastičnog izduženja	SRP izduženje			SRP životni vek			Opterećenje	Maksimalno zatežno opterećenje	Broj ciklusa do oštećenja	Oštećenje usled puzanja	Oštećenje usled zamora
Temperatura (°C)	Oblik talasa	Ukupno izduženje (%)	$\Delta\epsilon_{in}$ (%)	$\Delta\epsilon_{pp}$ (%)	$\Delta\epsilon_{ij}$ (%)	$N_{pp}$ (ciklusa)	$N_{ij}$ (ciklusa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\sigma_{tmax}$ (MPa)	$N_f$ (ciklusa)	$\phi_c$ $\Sigma(t/t_r)$	$\phi_f$ $n/N_f$		
1000	pp	1.002	0.647	0.647		930		241.24	118.66	930				
		0.499	0.292	0.292		2.640		219.67	107.87	2.640				
		0.301	0.096	0.096		15.210		196.81	98.160	15.210				
	cp	1.002	0.823	0.074	ij=cp 0.749	23.172	ij=cp 109	202.73	76.80	120	0.649	0.134 (894)		
		0.499	0.347	0.053	0.294	37.534	266	192.11	74.43	313	0.490	0.084 (3.709)		
		0.301	0.153	0.030	0.123	85.420	1.337	1.337	67.00	1.657	0.479	0.127 (13.097)		
900	tr	0.941	0.818	0.100	ij=cc 0.597	ij=cp 0.121	14.997	ij=cc 325	ij=cp 799	264.2	130.2	63	1.034	0.051 (1.229)
		1.042	0.863	0.109	0.712	0.043	13.241	225	2.667	264.3	131.4	56	0.862	0.056 (998)
		0.786	0.649	0.079	0.506	0.064	21.083	460	1.678	229.8	109.3	93	0.633	0.052 (1.804)
		0.815	0.672	0.075	0.531	0.066	22.727	416	2.105	232.5	108.1	133	0.530	0.080 (1.667)

pp talasi - stopa izduženja pri istezanju: 2 % / s  
pp talasi - stopa izduženja pri sabijanju: 2 % / s

cp talasi - stopa izduženja pri istezanju: 0.02 % / s  
cp talasi - stopa izduženja pri sabijanju: 2 % / s

*Slučaj opterećenja u obliku pp talasa.* Prskotine su nastale transgranularno, pravolinijski od površine epruvete. Postojanje brazda i definitivne početne tačke prskotine predstavlja karakteristiku zamora.

*Slučaj opterećenja u obliku cc talasa.* Prskotina se javlja na površini i proteže se na relativno pravolinijski način. Ipak nije očigledna na površini loma, postoje brazde. Velika količina oksidacije na površini loma se objašnjava time da prskotina potiče sa površine epruvete. Takođe, otkrivene su i dendritske granice u delu loma.

*Slučaj opterećenja u obliku pc talasa.* Kod opterećenja tipa pp talasa i cc talasa prskotine nastaju na površini epruvete, uz evidentne brazde i granice dendrita na površini loma. Takođe, površina loma je veoma oksidirana. Kao i u slučaju cc talasa, smatra se da je zbog toga što prskotina polazi sa površine epruvete. Dalje, smatra se da relaksacija opterećenja nastaje tokom rasterećenja na malom stepenu izduženja koje prati izduženje velikog stepena opterećenja. Ovo povećava prosečno opterećenje na strani zatezanja, tako da uzrokuje širenje prskotine, koje prilikom širenja doprinosi širenju oksidacije unutar prskotine.

*Slučaj opterećenja u obliku cp talasa.* Postoje širom rasprostranjene brazde koje karakterišu lom usled zamora. Duž granica dendrita stoje površine loma. Takođe, primećeno je širenje prskotina od spolja ka unutra i iznutra napolje, što predstavlja karakteristiku oštećenja usled puzanja.

*Slučaj trapezoidnog oblika opterećenja.* Sve prskotine su nastale duž granica dendrita, a brazde su tako reći nevidljive. Na površini epruvete postoje brojne prskotine koje se spajaju, i prodiru u dubinu.

Iz prethodno navedenih zapažanja, prskotine duž dendritskih granica nisu evidentne kod pp talasa, dok se mogu naći kod cc, pc, cp i trapezoidnih talasa opterećenja. Prskotine koje se javljaju iz unutrašnjosti uzoraka su nastale kod cc i trapezoidnih talasa opterećenja.

Zbog toga, razmatrajući prethodna zapažanja o konfiguraciji prskotina u konjukciji sa rezultatima van onih prikazanih na slici 5.1.2, postaje jasno da prskotine duž dendritskih granica kao i prskotine koje se javljaju unutar uzorka a koje karakterišu oštećenje usled puzanja, uzrokuju smanjenje životnog veka tokom ispitivanja interakcije puzanje-zamor.

### 5.1.1 Analiza pravila životne frakcije (LFR)

Pravilo životne frakcije polazi od pretpostavke da lom nastaje kada je suma zamora materijala ( $\phi_f$ ) i oštećenja puzanjem ( $\phi_c$ ) jednaka određenoj vrednosti ( $D$ ) kada je oštećenje podeljeno na oštećenje usled zamora i oštećenje usled puzanja. Tako da se kriterijum loma izvodi pomoću sledećeg izraza [22]:

$$\phi_f + \phi_c = D \quad (5.1.1)$$

Oštećenje usled zamora  $\phi_f$  i oštećenje usled puzanja  $\phi_c$  su dati preko sledećih izraza [25]:

$$\phi_f = n / N_f$$

$$\phi_c = \Sigma(t / t_r)$$

gde je:  $n$  – broj ciklusa u datom opsegu izduženja,

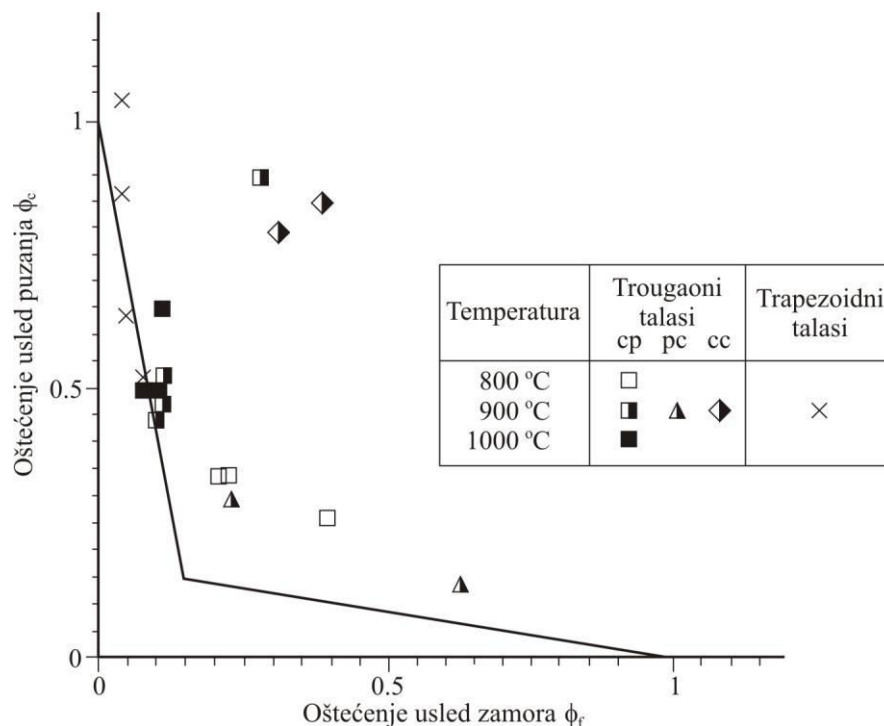
$N_f$  - je odgovarajući životni vek usled zamora u datom opsegu izduženja,  
 $t$  - je vreme rada na datom opterećenju, i  
 $t_r$  - životni vek pod datim opterećenjem.

Za vrednosti  $N_f$  korišćen je broj ciklusa do oštećenja kod pp oblika talasa zbog toga što je stopa izduženja kod pp oblika talasa isuviše brza tako da se deformacija usled puzanja može zanemariti. Vrednosti za  $t_r$  su dobivene iz ispitivanja materijala na puzanje (odnos  $\log[\text{opterećenje}] - \log[\text{vreme}]$  za svaku temperaturu ispitivanja) i prikazane su na slici 5.1.2. Vrednosti  $\phi_f$  i  $\phi_c$  su zbog toga dobivene pomoću cp, pc, cc i trapezoidnih talasa tokom ispitivanja. Ovi rezultati ispitivanja prikazani su u tabelama 5.1.2 ÷ 5.1.4.

Ako puzanje i zamor nezavisno doprinose trošenju životnog veka, lom će nastati kada bude  $D=1$ . Međutim, kada se rezultati ispitivanja za neki oblik talasa (cp, pc, i cc) nacrtaju na osnovu rezultata prikazanih u tabelama 5.1.2 ÷ 5.1.4 za oštećenje prilikom puzanja  $\phi_c$  na ordinatu a oštećenje usled zamora  $\phi_f$  na apcisu, tako da se oštećenje usled puzanja i oštećenje usled zamora pomeša jedno s drugim, a vrednost parametra  $D$  bude manja od 1 (sl.5.1.3) što je slično usvojenim vrednostima u ASME Section III, Boiler & Pressure Vessel Code Case N-47.

Razlika u temperaturama ispitivanja (800, 900 i 1000 °C) ima mali uticaj na dobivene podatke, a relacije dobivene povezivanjem donjih granica podataka (razmatran je kriterijum loma u kome egzistiraju puzanje i zamor) se mogu izraziti kao:

$$\begin{aligned} \phi_c + 5.67\phi_f &= 1: \phi_c \geq 0.15 \\ 5.67\phi_c + \phi_f &= 1: \phi_c < 0.15 \end{aligned} \quad (5.1.2)$$



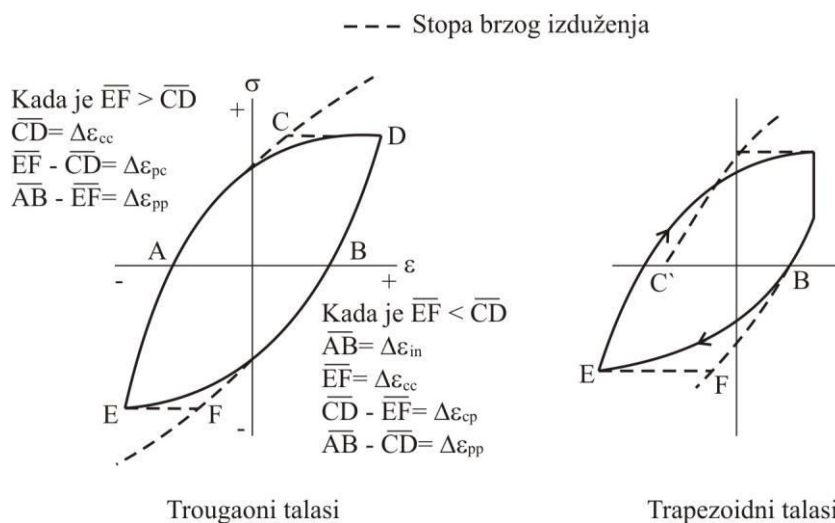
Slika 5.1.3. Kriva interakcije mehanizma oštećenja puzanje - zamor

## 5.1.2 Analiza metoda particionisanja istezanja (SRP)

Na slici 5.1.4 je prikazana šematska histerezisna kriva opterećenje-izduženje koja je dobivena prilikom izlaganja epruveta cikličnom opterećenju u datom opsegu istezanja ( $\Delta\varepsilon$ ). Na ovoj slici  $\Delta\varepsilon$  je ukupni opseg izduženja koji je dat sumom opsega elastičnog izduženja ( $\Delta\varepsilon_e$ ) i opsega neelastičnog izduženja ( $\Delta\varepsilon_{in}$ ).  $\Delta\varepsilon_{in}$  je zatim podeljeno na  $\Delta\varepsilon_{pp}$ ,  $\Delta\varepsilon_{pc}$ ,  $\Delta\varepsilon_{cp}$  i  $\Delta\varepsilon_{cc}$  u zavisnosti od toga koji se metod particionisanja istezanja primenjuje. Ako vrednosti ovih životnih vekova  $N_{pp}$ ,  $N_{pc}$ ,  $N_{cp}$  i  $N_{cc}$  odgovaraju ovim neelastičnim opsezima izduženja koji postaju poznati nakon ispitivanja, dok se životni vek  $N_f$  kada se opterećenje ponavlja u nekom neelastičnom opsegu izduženja može definisati sledećim izrazom [25]:

$$\frac{1}{N_f} = \frac{F_{pp}}{N_{pp}} + \frac{F_{pc}}{N_{pc}} + \frac{F_{cp}}{N_{cp}} + \frac{F_{cc}}{N_{cc}} \quad (5.1.3)$$

gde je:  $F_{ij} = \Delta\varepsilon_{ij} / \Delta\varepsilon_{in}$ .



Slika 5.1.4 Histerezisna kriva odnosa vrednosti neelastičnog izduženja i izduženja dobivenog metodom particionisanja istezanja

Tokom ispitivanja pp talasima, komponenta puzanja je smatrana zanemarljivom zbog velike brzine opterećenja i rasterećenja prilikom izduženja. Zbog toga je neelastičan opseg izduženja ( $\Delta\varepsilon_{in}$ ) determinisan iz histerezisne krive opterećenje-izduženje i može se u potpunosti smatrati plastičnim izduženjem ( $\Delta\varepsilon_{pp}$ ).

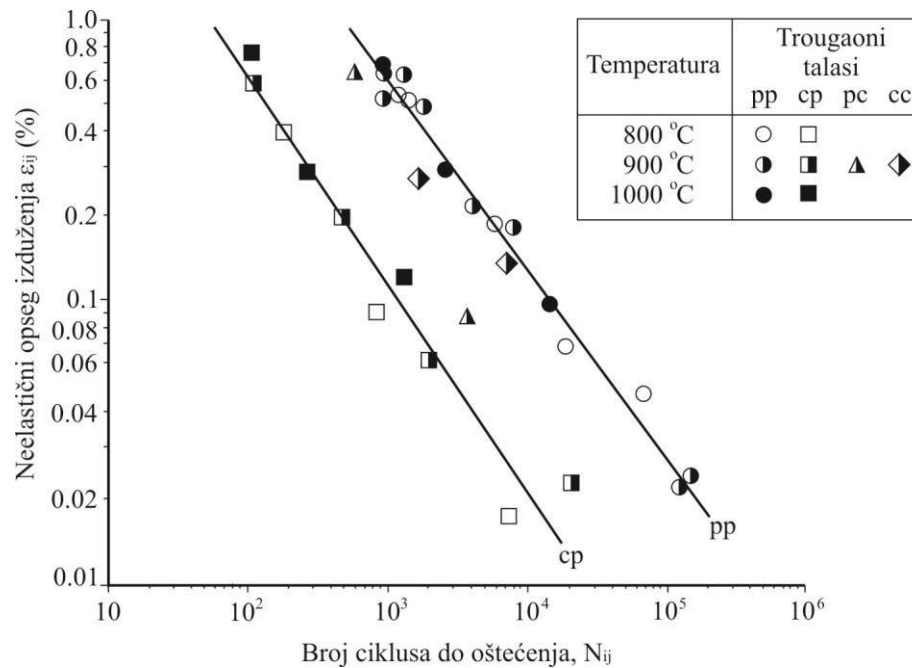
U drugim slučajevima (ne pp), neelastični opseg izduženja se može sastojati od plastične komponente i puzajuće komponente što je šematski prikazano na slici 5.1.4, takođe, ovi rezultati su prikazani u tabelama 5.1.2 ÷ 5.1.4. Slika 5.1.5 prikazuje odnose između neelastičnog opsega izduženja  $\Delta\varepsilon_{pp}$ ,  $\Delta\varepsilon_{pc}$ ,  $\Delta\varepsilon_{cp}$  i  $\Delta\varepsilon_{cc}$  određenih na ovaj način i

korespondentnog broja ciklusa  $N_{pp}$ ,  $N_{pc}$ ,  $N_{cp}$  i  $N_{cc}$ . Kada se podaci preurede na ovaj način prema neelastičnom opsegu izduženja, uticaj temperature ispitivanja je vidljiv u maloj meri, u slučaju da ima uticaj, za razliku od prethodnog, ako se urede prema ukupnom opsegu izduženja, tada podaci praktično leže unutar ograničenog polja za svaki oblik talasa.

Kada se odnosi sa dijagrama determinišu metodom najmanjeg kvadrata, dobijaju se sledeći oblici jednačina za svaki od talasa.

$$\begin{aligned}\Delta\varepsilon_{pp} &= 77.60N_{pp}^{-0.692} \\ \Delta\varepsilon_{cp} &= 21.73N_{cp}^{-0.758} \\ \Delta\varepsilon_{pc} &= 631.08N_{pc}^{-1.082} \\ \Delta\varepsilon_{cc} &= 9.31N_{cc}^{-0.475}\end{aligned}\quad (5.1.4)$$

Sa slike 5.1.5 je takođe jasno da su gornje i donje granice životnog veka date  $N_{pp}$  i  $N_{cp}$ , respektivno, pod ovim uslovima ispitivanja i  $N_{cp}$  je manje od  $N_{pp}$  aproksimativno za jedan red veličina.



Slika 5.1.5. Particionisani opseg izduženja – odnos životnog veka za HK-40

Prema SRP metodi životni vek se može determinisati iz jednačina (5.1.3 i 5.1.4) ako se neelastičan opseg izduženja u datom obliku talasa može razdeliti na  $\Delta\varepsilon_{pp}$ ,  $\Delta\varepsilon_{pc}$ ,  $\Delta\varepsilon_{cp}$  i  $\Delta\varepsilon_{cc}$ .

Odnos između ukupnog opsega izduženja ( $\Delta\varepsilon_t$ ) i broja ciklusa izduženja do pojave loma ( $N_f$ ) može se izvesti tokom ispitivanja pp talasima korišćenjem  $\Delta\varepsilon_{ij} - N_{ij}$  karakteristike u sledećoj proceduri. Ukupno izduženje ( $\Delta\varepsilon_t$ ) se dobija sumom neelastičnog izduženja ( $\Delta\varepsilon_{pp}$ ) i elastičnog izduženja ( $\Delta\varepsilon_e$ ) [22]:

$$\Delta\varepsilon_t = \Delta\varepsilon_{pp} + \Delta\varepsilon_e \quad (5.1.5)$$

Korišćenje odnosa  $\Delta\varepsilon_{pp} - N_{pp}$  datog u jednačini (5.1.4) i odnosa  $\Delta\varepsilon_t - N_f$  tokom ispitivanja pp talasima prikazano je u tabeli 5.1.5, odnos  $\Delta\varepsilon_e - N_f$  je izražen sledećom jednačinom [22]:

$$\Delta\varepsilon_e = A'(T) N_f^{\beta'} \quad (5.1.5.a)$$

$$\text{gde je: } A'(T) = \begin{cases} 1.529 : 800^\circ C \\ 1.234 : 900^\circ C \\ 0.931 : 1000^\circ C \end{cases}$$

$$\beta' = -0.167$$

tako da je onda:

$$\Delta\varepsilon_t = 77.60 N_f^{-0.692} + A'(T) N_f^{-0.167} \quad (5.1.5.b)$$

Iz ovih jednačina, je jasno da uticaj temperature ispitivanja na odnose između  $\Delta\varepsilon_t$  i  $N_f$  koji su prikazani na slici 5.1.2 su pridodani temperaturnim zavisnostima odnosa između  $\Delta\varepsilon_e$  i  $N_f$ . U tabeli 5.1.5 su predstavljeni odnosi između izduženja i broja ciklusa obuhvaćenih u ovom radu.

Tabela 5.1.5. Odnos između stope izduženja i životnog veka

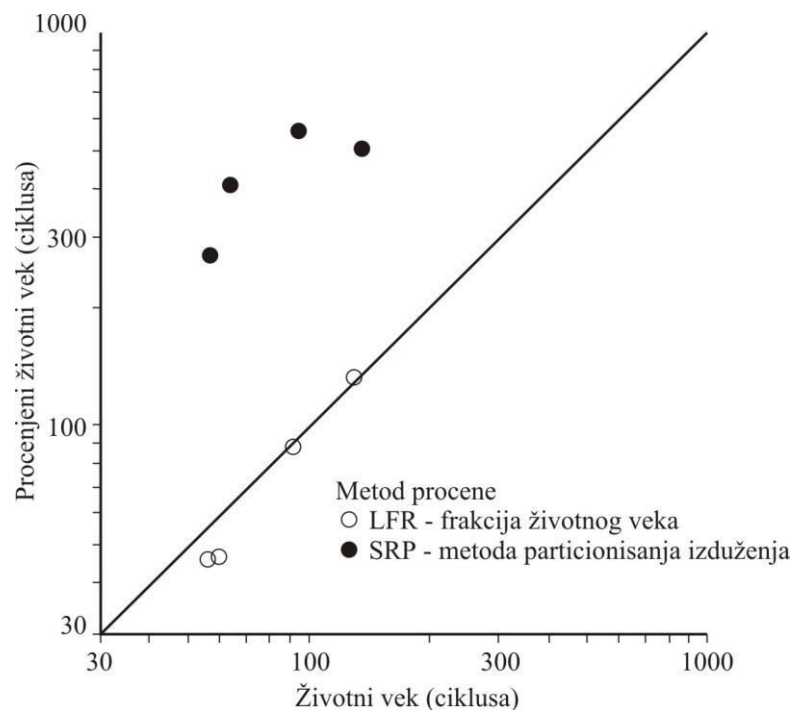
Oblik talasa	Temperatura	$\Delta\varepsilon_{ij} - N_{ij}$	$\Delta\varepsilon_t - N_f$
pp	800 °C	$\Delta\varepsilon_{pp}(\%) = 77.60 N_{pp}^{-0.692}$ ( $N_{pp} = 538.27 \Delta\varepsilon_{pp}^{-1.445}$ )	$\Delta\varepsilon_t = 77.60 N_f^{-0.692} + 1.529 N_f^{-0.167}$
	900 °C		$\Delta\varepsilon_t = 77.60 N_f^{-0.692} + 1.234 N_f^{-0.167}$
	1000 °C		$\Delta\varepsilon_t = 77.60 N_f^{-0.692} + 0.931 N_f^{-0.167}$
cp	800 °C	$\Delta\varepsilon_{cp}(\%) = 21.73 N_{cp}^{-0.758}$ ( $N_{cp} = 58.21 \Delta\varepsilon_{cp}^{-1.320}$ )	
	900 °C		
	1000 °C		
pc	900 °C	$\Delta\varepsilon_{pc}(\%) = 631.08 N_{pc}^{-1.082}$ ( $N_{pc} = 538.27 \Delta\varepsilon_{pc}^{-0.924}$ )	
cc	900 °C	$\Delta\varepsilon_{cc}(\%) = 9.31 N_{cc}^{-0.475}$ ( $N_{cc} = 109.65 \Delta\varepsilon_{cc}^{-2.105}$ )	

### 5.1.3 Komparacija LFR i SRP metoda

U tabeli 5.1.4 su takođe prikazani životni vekovi za epruvete ispitivane trapezoidnim talasima radi utvrđivanja interakcije puzanje – zamor. Na slici 5.1.6 je prikazana komparacija stvarnog životnog veka i životnog veka dobivenog iz jednačine (5.1.2) metodom LFR i jednačine (5.1.3) metodom SRP.

Kao što se može videti sa slike 5.1.6, procenjeni životni vek teži da bude duži od onog stvarno dobijenog (trend nekonzervativne predikcije) kada se procena životnog veka vrši primenom SRP metoda na cikličnom modelu, pošto trapezoidni oblici talasa imaju vremenske zadržke na strani zatezanja. Razlogom za takvu tendenciju se smatra povećanje neelastičnog izduženja tokom perioda zadržke izduženja kod trapezoidnih talasa, tako da su oni toliko mali da se uticaji puzanja tokom ovog perioda ne mogu dovoljno reflektovati SRP metodom.

Možemo zaključiti da je životni vek procenjen metodom LFR u dobrom skladu sa dobivenim životnim vekom tokom ispitivanja. Tako da se može smatrati da je LFR metoda pogodna za procenu životnog veka materijala HK40 izloženog cikličnom modelu opterećenja sa dugim periodom zadržavanja.



Slika 5.1.6. Komparacija LFR i SPR metoda za procenu životnog veka u slučaju trapezoidnih talasa

Materijal za cevi etilenskih peći HK40 - centrifugalno liveni austenitni čelik sa visokim sadržajem ugljenika izložen je ispitivanju na puzanje – zamor na temperaturama od 800, 900 i 1000 °C (trouglastim [pp, cc, pc i cp talasi] i trapezoidnim oblicima talasa). Došli smo do sledećih zaključaka:

1. Kada se rezultati ispitivanja pp talasima uporede sa rezultatima ispitivanja cc, pc i cp talasima, primećuje se da broj ciklusa do oštećenja postepeno postaje sve manji po sledećem redosledu pp, cc, pc i cp talasa. Međutim, redukcija životnog veka je najevidentnija u slučaju trapezoidnih talasa sa vremenom zadržavanja na tenzionoj strani.
2. Životni vek postaje kraći kako lom poprma sve veću karakteristiku puzanja, tj. prskotina se širi duž dendritskih granica.
3. Odnos  $\Delta\varepsilon_{ij} - N_{ij}$  je izveden i koristan je u proceni oštećenja primenom SRP metoda.
4. Kriterijum oštećenja izazvan interakcijom puzanje – zamor se zasniva na LFR metodi a koja je izvedena iz sledećih izraza:

$$\phi_c + 5.67\phi_f = 1: \phi_c \geq 0.15$$

$$5.67\phi_c + \phi_f = 1: \phi_c < 0.15$$

5. LFR je primenljiv u proceni životnog veka usled interakcije puzanje – zamor kada se materijal izlaže cikličnom modelu opterećenja sa periodima zadržske tenzije na povišenim temperaturama, zbog toga što se uticaj puzanja tokom perioda zadržske može dobro modelovati takvom procenom.



## 5.2 Analiza mikrostrukturnih promena

U otkrivanju nastalih deformacija, prskotina, lomova kao i u proceni preostalog veka trajanja delova petrohemijske opreme, osim ispitivanja bez razaranja važna su i ispitivanja s razaranjem materijala. Analize mikrostrukture cevi peći za pirolizu pokazuju da tokom rada na visokim temperaturama dolazi do bitnih promena u strukturi i osobinama materijala. Nekontrolisani procesi cementacije (naugljeničenja) materijala dovode do taloženja koksa na zidove cevi što sve prouzrokuje dodatna termička naprezanja. Zbog toga, a i zbog pojave puzanja materijala nastaju radijalne mikro prskotine i pukotine. Prskotine napreduju po granicama zrna gde se nalaze lančano povezani karbidi. Polazna austenitna struktura mestimično menja karakteristike – dolazi do pojave ferita i sigma faze, koje zajedno s karbidima unutar i po granicama zrna smanjuju duktilnost materijala. Ispitivanjem mehaničkih karakteristika cevi koje su bile u radu 5 i 8 godina utvrđen je bitan pad istegljivosti, što je posledica mikrostrukturnih promena.

Jedinjenja ugljovodonika pomešana sa parom prolaze kroz cevi koje se greju sa spoljnje strane, i pri tome se rastavljaju stvarajući oksidacionu i cementacionu sredinu. Pod ovakvim uslovima rada cevi trpe promene u sastavu pošto dolazi do reakcije sa najmanje dva elementa, ugljenik i kiseonik osiromašuju konstitutivne elemente usled oksidacije i cementacije.

Mikrostruktura ovih centrifugalno livenih cevni materijala je sastavljena od dendritskih zrna orijentisanih u smeru prečnika cevi, i obično prisutne protektivne oksidne naslage na spoljašnjosti i unutrašnjosti cevi. Nalaga hroma i silicijuma se formiraju usled hemijskog sastava cevi i na dovoljno velikom parcijalnom pritisku kiseonika pri uslovima eksploatacije, i aluminijuma koji se može formirati kod drugih visokotemperaturnih legura za iste namene, za koje se zna da sprečavaju penetraciju ugljenika u materijal [97, 98]. Međutim lokalizovana oštećenja ovih protektivnih nanosa mogu nastati usled različitih faktora (temperaturne varijacije, puzanja) tako da se onda omogućava prodor ugljenika i kiseonika u materijal.

Lokalno pregrevanje usled naslaga ugljenika može podići temperaturu iznad 1050 °C, gde istovremeno smanjenje u potencijalu kiseonika dovodi do konverzije hroma u hrom-karbid. Veoma surovi uslovi eksploatacije se opisuju kao uslovi u kojima postoji visoka aktivnost ugljenika bliska sjedinjavanju, kao i mali parcijalni pritisak kiseonika koji je još uvek dovoljan da oksidiše elemente kao što su Cr i Si [98]. Istraživanja su otkrila da segregacija silicijuma tokom ukрупnjavanja karbida prethodi (tj. nagoveštava) širenju pukotina.<sup>26</sup> Konsekventno, karbidi u livenim strukturama inicijalno su podložni morfološkim i hemijskim promenama, asimilaciji i ukрупnjavanju zrna koje je prvo praćeno transformacijom faza. Transformacija karbida u leguri HK40 tokom eksploatacije na visokim temperaturama se kreće od postojeće  $M_{23}C_6$  do  $M_7C_3$ , do ovih saznanja su došli mnogi autori [22, 83, 92, 97].

<sup>26</sup> Ramanarayanan, T.A., Petkovic, R.A., Mumford, J.D., Ozekcin A., Carburization of high chromium alloys, Materials and corrosion Vol. 49., Weinheim: Wiley-VCH Publs., pp.226–230 (No. 4/5), 1998.

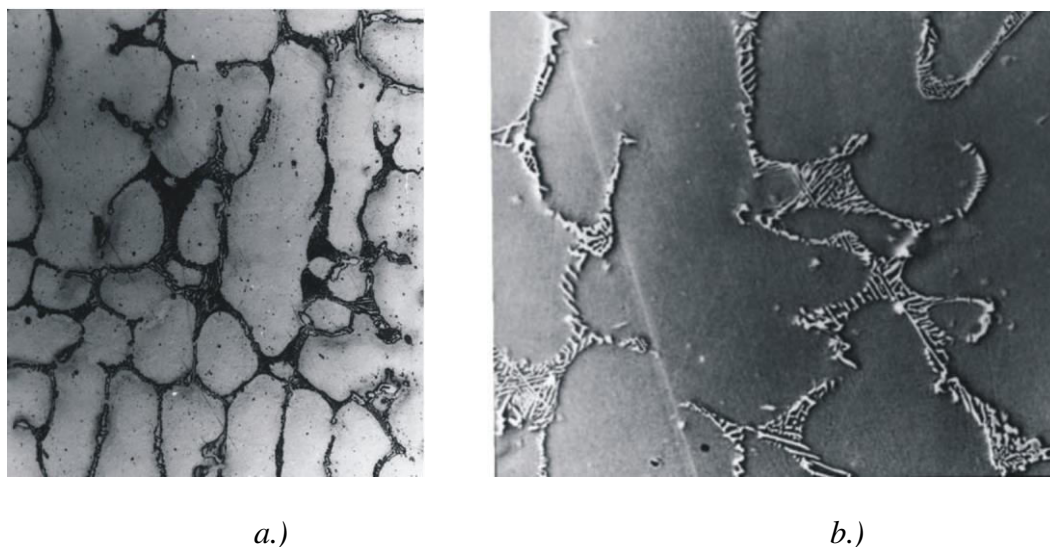
## 5.2.1 Analiza mikrostrukturnih promena kod cevi

Uzorci za metalografska ispitivanja su isečeni iz cevi uz pomoć testere velike brzine a ispitani su u primljenom stanju. Ispitivanja su vršena na elektronskom mikroskopu Hitachi S900 (SEM) opremljenim sa emisionim topom električnog polja i analizerom disperizije X – zraka (EDS). Transmisiona elektronska mikroskopija (TEM) je izvedena primenom JEOL 2000FX sa 200 kV, sa elektrolitički istanjenim tankim slojevima metala u 5 % smese perhlorične kiseline - sirčetne kiseline na 40 V dc praćene jonskim nagrivanjem nekoliko sati. Kalling-ov reagent je korišćen za svaki od uzoraka za svetlosni mikroskop. Ispitivanje X zracima je izvedeno primenom CAMECA SX50 elektronskog mikroanalizera (WDX). Podaci o difrakciji X – zraka su dobiveni primenom Cr K $\alpha$  radijacije pri naponu od 30 kV sa difraktometrom Siemens D5000.

Cevi su bile u radu oko 5 godina a nakon remonta i puštanja u rad peći došlo je do poprečnog loma cevi i to pri 350 °C (uzorak br.1). Radi poređenja analizirana je cev iz druge peći kod koje nije došlo do loma (uzorak br.2).

Ispitivani materijal je kroz zid cevi imao formirane tri izražene zone sa različitom mikrostrukturom: zona ispod unutrašnje i spoljne površine, i između njih. Usled toga što se cevi greju sa spoljne strane brenerima, spoljna površina materijala je izložena oksidišućoj sredini, dok je unutrašnja površina u kontaktu sa oksidirajućom / cementirajućom sredinom zbog smeše ugljovodonika i pare koja prolazi kroz njih na visokoj temperaturi.

Mikrostruktura livene legure HK40 sastavljena je od FCC gama matrice i čelijske strukture koja sadrži M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> karbide na granicama dendrita (sl.5.2.1).



Slika 5.2.1. Mikrostruktura nove cevi od legure HK40

a.) svetlosni mikroskop - uvećanje 150:1

b.) elektronski mikroskop - uvećanje 20.0 kV x 600:1

Po celom preseku cevi uzorka br.1 primećena su radijalna naprsnuća koja se protežu od unutrašnje površine. Mikro-izgled loma ukazuje na krhki karakter. Merenjem debljine zida cevi oko mesta loma ustanovljeno je stanjenje od 20% u odnosu na početnu deklarisanu debljinu. Na unutrašnjoj površini cevi mestimično se uočavaju naslage kokska i oksida kao i tragovi puzanja materijala. Ispod oksidnih naslaga nastalih na unutrašnjoj površini uzorka 2 zapažena je osiromašena zona karbida debljine 200  $\mu\text{m}$ . Na unutrašnjoj površini došlo je do pojave magnetičnosti što ukazuje na promene u austenitnoj strukturi.

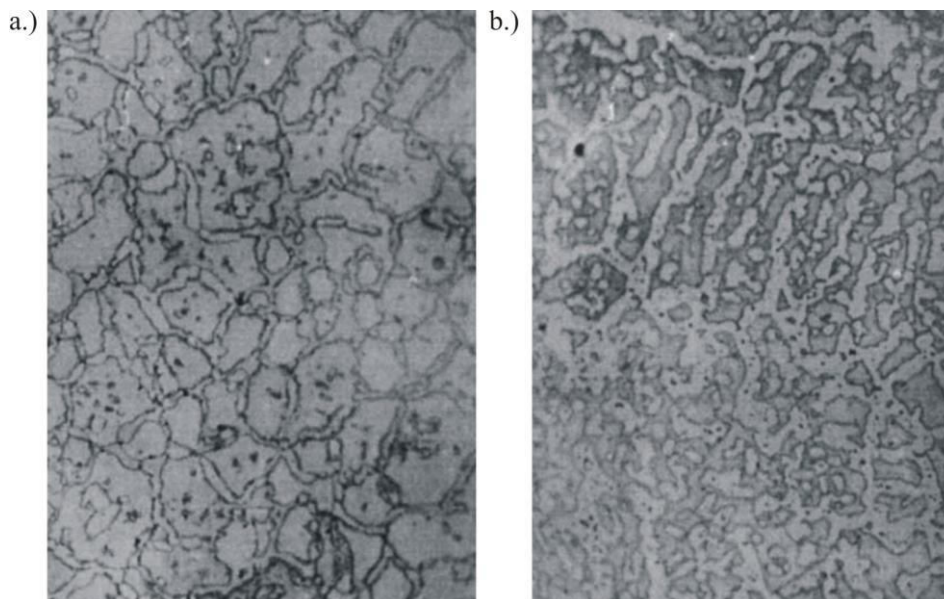
Ispitivanjem mehaničkih karakteristika materijala cevi (prema ASTM A370) došlo se do sledećih rezultata:

- uzorak br.1:  $R_m=300 \text{ N/mm}^2$ ;  $A(2'')=0.35 \%$
- uzorak br.2:  $R_m=420 \text{ N/mm}^2$ ;  $A(2'')=2.2 \%$  (pri 20 °C)
- nov materijal:  $R_m=440 \text{ N/mm}^2$ ;  $R_{p02}=240 \text{ N/mm}^2$ ,  $A_5=10 \%$  (pri 20 °C)

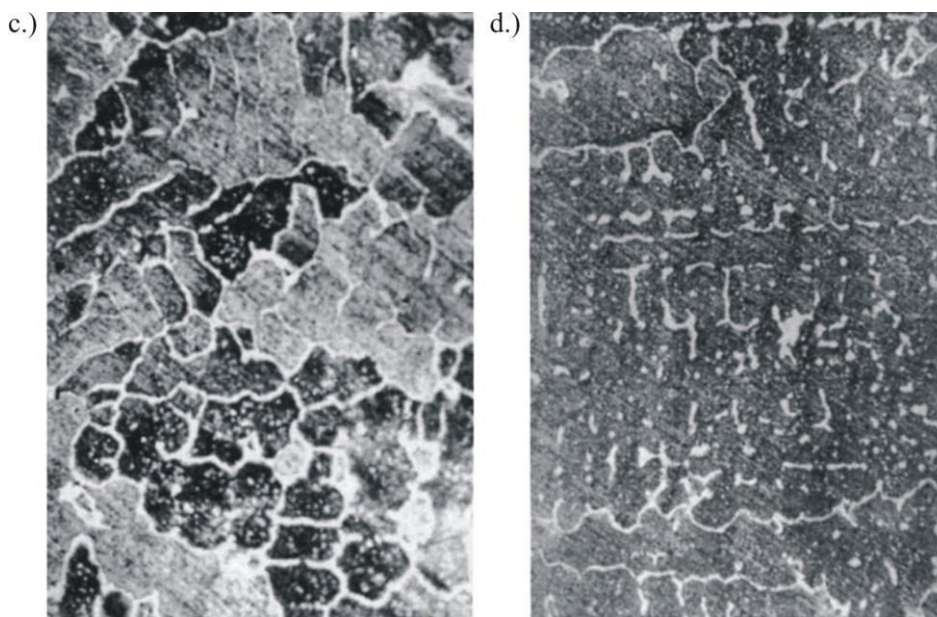
Ovi rezultati pokazuju da je kod oba uzorka došlo do bitnog sniženja istegljivosti materijala, odnosno da je povećana verovatnoća ka pojavi krtog loma. Kod uzorka br.1 je u odnosu na početno stanje značajno smanjena čvrstoća.

Kod uzorka br.1 došlo je do porasta tvrdoće na unutrašnjoj površini (264 HV10), u odnosu na tvrdoću spoljne površine (212 HV10), što nije bio slučaj kod uzorka br.2. Ovo takođe ukazuje na promene u mikrostrukturi materijala uzorka br.1 (s unutrašnje strane cevi).

Sa spoljne strane cevi uzorka br.1 struktura je nepromenjena u odnosu na onu s unutrašnje strane, tj. eutektički karbidi po granicama zrna u obliku lančastih grupacija uz neznatnu pojavu sekundarnih karbida unutar austenitnih zrna (sl.5.2.2b). Potpuno je drugačija struktura uz unutrašnju površinu cevi – jako primetni sekundarni karbidi unutar zrna (posledica cementacije), i pogrubljenje eutektičkih karbida po granicama (sl.5.2.2a, i 5.2.3). Uz unutrašnju površinu se zapaža oksidni sloj pomešan s koksom koji prodire u dubinu preseka i to po granicama zrna.

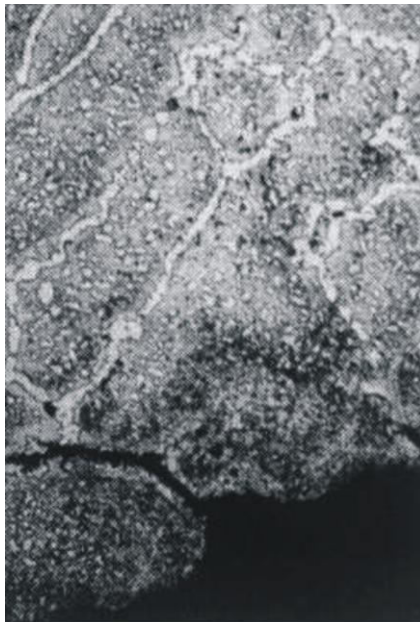


uzorak 1 - (a) unutrašnja strana (b) spoljašnja strana



*uzorak 2 - (c) unutrašnja strana, (d) spoljašnja strana*

*Slika 5.2.2. Mikrostruktura uzoraka sa unutrašnje i spoljašnje strane*

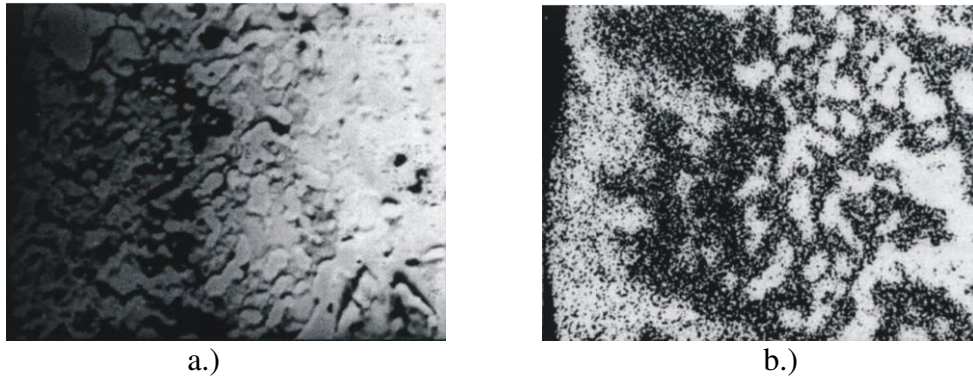


*Slika 5.2.3. Mikrostruktura uzorka br.1 uz površinu loma  
(uvećanje 250:1)*

Naprsline slede granice zrna, odnosno nagrupisane karbide. Takođe, uočava se mikroporoznost različitog oblika i veličine (tamna mesta), koja je verovatno posledica puzanja materijala.



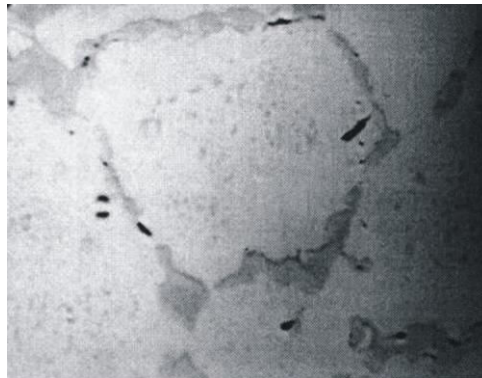
Dodatna analiza elektronskim mikroanalizatorom (EMA) potvrđuje pretpostavljene mikrostrukturalne promene u materijalu (sl.5.2.4). COMPO slika (slika 5.2.4a) pokazuje raspodelu karbida (svetliji delovi) uz unutrašnju površinu, a slika 5.2.4b (raspodela Cr) potvrđuje da su to Cr – karbidi. Znatno je udeo Cr uz samu unutrašnju površinu - pretežno u oksidu a delimično u karbidu.



*Slika 5.2.4. EMA snimci uzorka br.1 uz unutrašnju površinu  
a. COMPO snimak, i b. raspodela Cr  
(uvećanje 1000:1)*

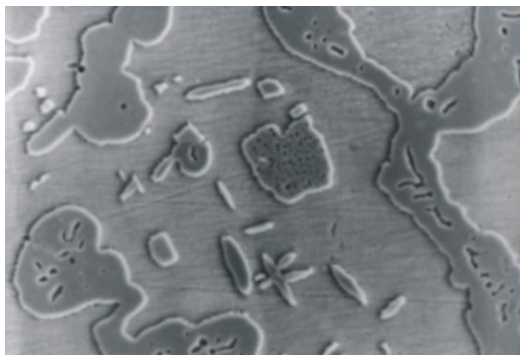
Nakon dugotrajnog izlaganja oksidacionoj / cementirajućoj sredini na temperaturi od oko 800 °C tokom pirolize, uzorak 2 je prikazao blagu mikrostrukturalnu degradaciju aproksimativno fazi III u modelu Petkovic-Luton i Ramanarayanan [92], i primećeno je da kontinualna mreža krupnozrnastih karbida prekriva granice dendrita. Procenat zapremine (19.71 %), isto ako i veličina karbida, gde su manji u uzorku 2 poređeno sa onima u uzorku 1, govori nam da je uzorak 2 izložen manjoj cementaciji (sl.5.2.2). U uzorku 1 procenat zapremine karbida varira kroz poprečni presek cevi, postepeno se povećavajući od spoljašnje ka unutrašnjoj površini, dostižući 38.4% i 47.5% respektivno. Uzorak 1 takođe sadrži isto kao i 2 igličaste intergranularne karbide pored makropukotine.

Slika 5.2.5 (COMPO snimak) pokazuje raspodelu eutektičkih Cr – karbida. U sredini preseka uzorka izdvojeni karbidi su po granicama zrna, a poroznost (tamna mesta) je posledica puzanja materijala.



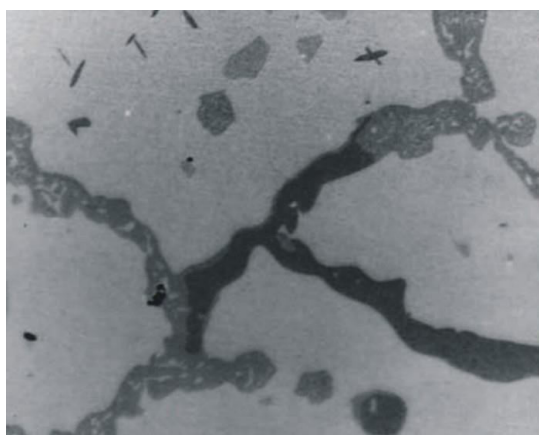
*Slika 5.2.5. COMPO EMA snimak sredine uzorka br.1  
(uvećanje 1000:1)*

Kod uzorka br.2 zapaženo je takođe razugljeničenje na spoljašnjoj površini cevi, znatno manje izdvajanje karbida unutar austenitnih zrna, a uz unutrašnju površinu zida cevi otkriven je čvrsti, kompaktni sloj oksida silicijuma i hroma koji sprečava difuziju ugljenika u čelik. U uzorku 1 u blizini prskotine učestalo se zapažaju intergranularni karbidi igličaste ili pločaste morfologije (sl.5.2.6.).



*Slika 5.2.6. Različite morfologije karbida i formiranje igličastih g taloga sa  $M_7C_3$  karbidima - SEM snimak uzorka (20kV x 1000:1)*

U uzorku 1 zapaženo je da  $M_{23}C_6$  karbidi imaju transformaciju u  $M_7C_3$  karbide preko normalnog prelaza (sl.5.2.7). Prisustvo obe vrste karbida, igličastih i pločastih  $M_{23}C_6$  karbida, u uzorku 1 može se objasniti terminima sekvenca formiranja i/ili stvaranja jezgra. Trebalo bi napomenuti da su igličasti talozi primećeni u manjoj meri, a da su pločasti talozi porasli. Stoga se može zaključiti da se igličasti talozi mogu formirati u kasnijoj fazi oštećenja kao što je dvostruko otpuštanje ili greške prilikom livenja, ili kod dislokacija nastalih prethodnim taloženjem kao što kockasti  $M_{23}C_6$  karbidi izazovu dislokacije u matrici [1]. Opadajući odnos Cr/C će učiniti potrebnim transformaciju  $M_{23}C_6$  karbida, koji imaju veće vrednosti odnosa Cr/C, u  $M_7C_3$ . U blizini prskotine pojavljuje se ubrzano povećanje zrna karbida i izvodi se transformacija u  $M_7C_3$  dovođenjem ugljenika u njegovu blizinu.



*Slika 5.2.7. Transformaciju karbida iz  $M_{23}C_6$  u  $M_7C_3$  (tamna mesta predstavljaju  $M_{23}C_6$  karbide dok delovi koji sadrže igličaste g taloge  $M_7C_3$ ) SEM (20.0 kV x 500:1)*

Osim toga primećeno je da svetli regioni karbida u uzorku 1 obuhvataju i taloge još svetlijih što se može opisati kao „crvasta” morfologija. Ovi crvasti talozi unutar  $M_7C_3$  karbida su otkriveni difrakcijom elektrona kao  $\gamma$  (austenitne) faze (sl.5.2.7). Takođe je otkriveno i prisustvo veoma finih  $M_7C_3$  karbida unutar ovih austenitnih taloga. Trebalo bi da se napomene, da su indeksirane strukture difrakcije elektrona dobijene iz krupnozrnastih i teškooštećenih  $M_7C_3$ , što se jedino može postići pretpostavkom ortorombične strukture, gde je struktura difrakcije uzeta od finih  $M_7C_3$  taloga lociranih u crvljivim  $\gamma$  delićima i da je rešena na osnovu heksagonalne strukture. Ovaj pristup indeksiranju se poklapa sa ranijim proučavanjima Morniroli i sar. [86], Dudzinski i sar. [30] kao i sa nekoliko njihovih referenci. Otkriveno je da su mikropodručja koja sadrže oštećenja kristala razne prirode veoma frekventna u individualnim  $M_7C_3$  česticama.

U poređenju sa uzorkom 2, mikrostruktura uzorka 1 sadrži krupnozrnastije intergranularne karbide što pokazuje veći stepen cementacije. Konsekventno se veruje da dekarbidizovane zone koje prethodno postoje ispod unutrašnje površine koje se zamenjuju cementiranim strukturama, dok dekarbidizovane zone još uvek postoje ispod spoljne površine. Ova zapažanja su konsistentna sa većom aktivnošću ugljenika na unutrašnjoj površini cevi. To je verovatno pošto oni takođe odražavaju daleko surovije uslove rada u slučaju uzorka 1, zbog njegove lokacije u peći, odgovara stepenu degradacije definisanog kao IV stepen (faza) u modelu Petkovic i Ramanarayanan [92].

Dokazano je da  $M_{23}C_6$  eutektički karbidi novog materijala jako ukрупnjavaju u oba uzorka usled prodora ugljenika tokom eksploatacije na visokim temperaturama, dok se hrom istiskuje kao rezultat oksidacije površine cevi, ili ekvivalentno na površini prskotine.<sup>27</sup> Logično je pretpostaviti da se oksidacija na površini materijala i asimilacija / ukрупnjavanje zrna  $M_{23}C_6$  eutektičkog karbida novog materijala dešava više ili manje istovremeno između lokalizovanih oštećenja i izlečenja ovih naslaga, mada na daleko manjim brzinama koje mogu imati ako nisu prisutne kontinualno unutrašnje Cr i Si naslage. Međutim u sledećoj fazi karbidi odmah ispod površine se rastvaraju da bi popunili prazninu nastalu odlaskom hroma iz matrice usled oksidacije na površini, tako da ovo dovodi do karbidom osiromašenih zona u podpovršinskom sloju.

## 5.2.2 Analiza mikrostrukturnih promena kod kolena cevi

Kolena su savijena pod uglom od  $180^\circ$  pa tako predstavljaju mesta nepovoljnih uslova strujanja, povećana je opasnost od taloženja koksa i otežano dekoksovanje. Analizirana su dva kolena jedno je bilo u radu 5 godina (uzorak 3), a drugo 8 godina (uzorak 4). Na oba kolena primećena je magnetičnost s unutrašnje strane, koja se postupno smanjuje prema spoljnoj površini.

Kod oba kolena su vidljive pukotine mrežastog oblika s unutrašnje strane kao i propagacija pukotina po poprečnom preseku (sl.5.2.8). Mestimično su pukotine

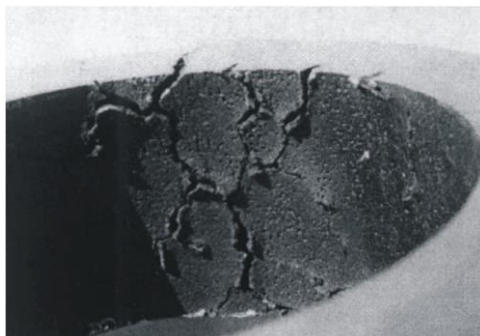
---

<sup>27</sup> Kucora, I., Adamović, Ž., Radovanović, Lj., Otkazi cevi etilenskih peći, Energetske tehnologije, 2013., Vol.10. „No 1., str. 47-53, ISSN 1451 9070

proširene po celom preseku. Na spoljnim površinama nije bilo vidljivih mehaničkih oštećenja.

Uzorci su izvađeni iz dela gde su vidljiva oštećenja strujanjem, tako da su analizirana sledeća mesta:

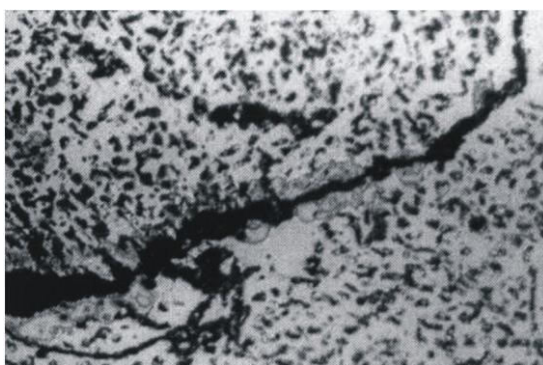
- s unutrašnje strane,
- s spoljašnje strane,
- uz površinu loma, i
- iz sredine preseka uzorka.



*Slika 5.2.8. Izgled pukotina s unutrašnje strane kolena  
(uvećanje 1:1)*

U daljem delu disertacije će se opisati samo karakteristične mikrostrukturalne pojave.

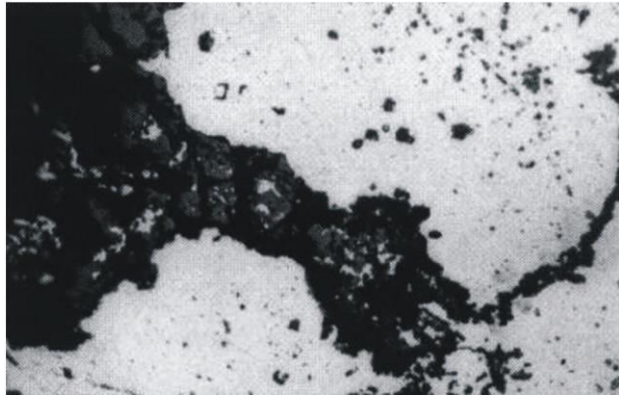
Na slici 5.2.9 zapaža se oksidni sloj koji prodire prema unutrašnjosti uz granice zrna. Takođe, zapaža se znatno izdvajanje sekundarnih karbida unutar zrna. U samom rubnom sloju došlo je do manjeg izdvajanja karbida, koje postaje snažnije kako se ide dalje od ruba.



*Slika 5.2.9. Pukotina pri unutrašnjoj površini kolena  
(uvećanje 250:1)*

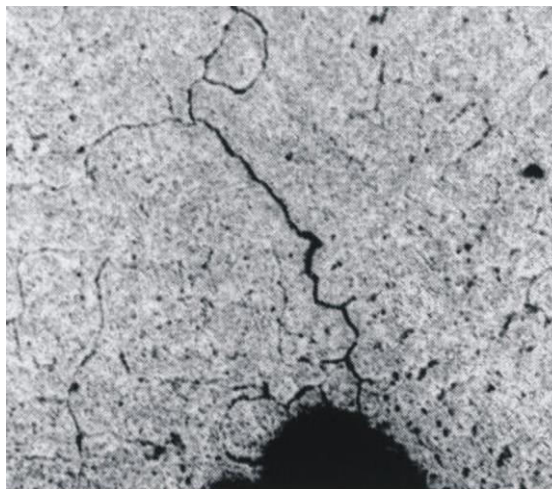
Na slici 5.2.10 vidi se razugljeničeni sloj uz sam rub uzorka. Zatim dolazi sloj pravilno raspoređenih karbida unutar austenitnih zrna, kao i izdvojenih karbida po granicama zrna. Do izražaja dolazi sloj oksida koji prodire u unutrašnjost i to po granicama zrna.





*Slika 5.2.10. Izgled mikrostrukture uz spoljašnji zid kolena  
(uvećanje 250:1)*

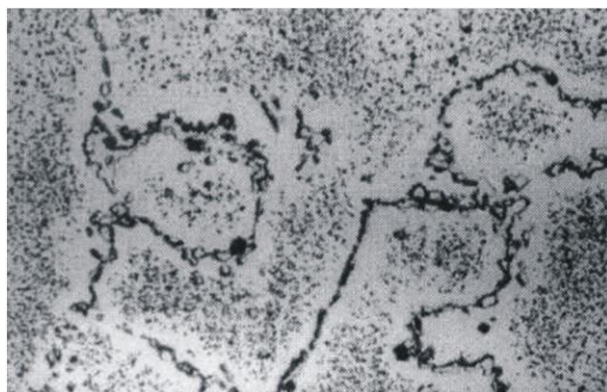
Na slici 5.2.11 vidi se širenje i propagacija prskotine po granicama zrna. Takođe se uočava sloj oksida, iza njega razugljeničena zona, i slede sitno raspršeni karbidi unutar zrna, kao i područja uz granice zrna koja su bez karbida.



*Slika 5.2.11. Mikrostruktura uz lomnu površinu  
(uvećanje 50:1)*

Na slici 5.2.12 uočavaju se karakteristične lančaste skupine karbida kao i sitno raspršeni karbidi u vrlo krupnim austenitnim zrnima, u sredini preseka kolena.

Sopstvena istraživanja mikrostrukturnih promena daju rezultate i zaključke koji se u potpunosti poklapaju s već navedenim u literaturi, a na ispitivanim delovima iz sličnih postrojenja. Pojava magnetičnosti na unutrašnjoj površini cevi je povezana s pojavom ferita i oksida. Poznato je da na promene u austenitnoj strukturi utiču legirajući elementi, najviše Cr i Si kao i odnos Cr/Ni.



*Slika 5.2.12. Mikrostruktura sredine preseka kolena  
(uvećanje 250:1)*

Pri povećanom izdvajanju karbida dolazi do stvaranja sigma faze u području temperatura oko  $650 \div 870$  °C, koja je sastavljena od oko 43%Fe, 43%Cr, i 14%Si [1]. Prisustvo ove faze drastično smanjuje otpornost na puzanje, čvrstoću i žilavost. Na degradaciju mehaničkih karakteristika najviše utiču promene u mikrostrukturi kao što su: izdvajanje karbida po granicama zrna i unutar zrna, procesi cementacije, razugljeničenja i oksidacije. Dok pojavi pukotina doprinose uslovi eksploatacije: previsoke radne temperature, nepovoljni uslovi zagrevanja i hlađenja kod prekida procesa, nepravilno vođenje procesa dekoksovanja, itd., zbog čega dolazi do puzanja materijala, termičkih napona, vibracija i sl.

### 5.3 Stohastički model određivanja oštećenja cevi peći usled puzanja

U ovom poglavlju, zasnovanom na početnim vrednostima problema puzanja cilindra tankog zida [17] i stohastičkoj teoriji [27] predložen je integralni stohastički model oštećenja. Primenom stohastičkog modela dobivena je promenljivost oštećenja cevi puzanjem koja će poslužiti kao efektivan metod za pouzdanu procenu oštećenja cevi peći.

Na osnovu analize Boyle & Spence [17], predložena je sledeća procedura za rešenje problema oštećenja usled puzanja. Matrica početnog naprezanja  $\{\sigma^0\}$  gde izložilac 0 označava početno vreme ima oblik [17]:

$$\{\sigma^0\} = \begin{Bmatrix} \sigma_r^0 \\ \sigma_\theta^0 \\ \sigma_z^0 \end{Bmatrix} \quad (5.3.1)$$

gde indeksi  $r$ ,  $\theta$  i  $z$  označavaju radijalno, longitudinalno i aksijalno naprezanje. Tako da sledi [17]:

$$\{\sigma^0\} = \{\sigma^p\} + \{\sigma^T\} \quad (5.3.2)$$

gde je [17]:

$$\{\sigma^T\} = \begin{Bmatrix} \sigma_r^T \\ \sigma_\theta^T \\ \sigma_z^T \end{Bmatrix} \quad (5.3.3)$$

U jednačini (5.3.3) termičko naprezanje indukovano temperaturnim gradijentom kroz zid je [17]:

$$\sigma_r^T = \frac{E\alpha(\Delta T)}{2(1-\mu)\ln k} \left\{ -2\ln\left(\frac{b}{r}\right) + \frac{\left(\frac{b}{r}\right)^2 - 1}{k^2 - 1} \ln k \right\} \quad (5.3.4)$$

$$\sigma_\theta^T = \frac{E\alpha(\Delta T)}{2(1-\mu)\ln k} \left\{ 1 - \ln\left(\frac{b}{r}\right) - \frac{\left(\frac{b}{r}\right)^2 + 1}{k^2 - 1} \ln k \right\} \quad (5.3.5)$$

$$\sigma_z^T = \frac{E\alpha(\Delta T)}{2(1-\mu)\ln k} \left\{ 1 - 2\ln\left(\frac{b}{r}\right) - \frac{2\ln k}{k^2 - 1} \right\} \quad (5.3.6)$$

gde je:  $\sigma_r^T$  – radijalni napon indukovani termičkim naprežanjem (MPa),  
 $\sigma_\theta^T$  – napon na zidu koji je normalan na meridijanski presek a indukovani je usled termičkog naprežanja (MPa),  
 $\sigma_z^T$  – aksijalni napon indukovani termičkim naprežanjem (MPa),  
 $E$  – modul elastičnosti materijala cevi,  
 $\alpha$  – koeficijent termičkog širenja materijala (1/°C), i  
 $\Delta T$  – temperaturni gradijent spoljašnjeg i unutrašnjeg zida  $\Delta T = T_i - T_o$ .

$$\sigma_\theta^0 = \sigma_\theta^P + \sigma_\theta^T \quad (5.3.7)$$

$$\sigma_z^0 = \sigma_z^P + \sigma_z^T \quad (5.3.8)$$

$$\sigma_r^0 = \sigma_r^P + \sigma_r^T \quad (5.3.9)$$

$$\{\sigma^P\} = \begin{Bmatrix} \sigma_r^P \\ \sigma_\theta^P \\ \sigma_z^P \end{Bmatrix} \quad (5.3.10)$$

U jednačini (5.3.10) napon indukovani unutrašnjim pritiskom se predstavlja kao [17]:

$$\sigma_r^P = \frac{P}{k^2 - 1} \left\{ 1 - \left( \frac{b}{r} \right)^2 \right\} \quad (5.3.11)$$

$$\sigma_\theta^P = \frac{P}{k^2 - 1} \left\{ 1 + \left( \frac{b}{r} \right)^2 \right\} \quad (5.3.12)$$

$$\sigma_z^P = \frac{P}{k^2 - 1} 2\mu \quad (5.3.13)$$

gde je:  $\sigma_r^P$  – radijalni napon indukovani pritiskom (MPa),  
 $\sigma_\theta^P$  – napon na zidu koji je normalan na meridijanski presek a indukovani je pritiskom (MPa),  
 $\sigma_z^P$  – aksijalni napon indukovani pritiskom (MPa),  
 $P$  – pritisak (MPa),  
 $b$  – spoljašnji radijus cevi (mm),  
 $a$  – unutrašnji radijus cevi (mm),  
 $k$  – odnos spoljašnjeg i unutrašnjeg radijusa  $k = b/a$ ,  
 $r$  – radijus proizvoljnog položaja u prečniku cevi (mm), i  
 $\mu$  – Poissonov odnos.

sa  $\{\sigma^P\}$  matrica naprežanja će biti indicirana unutrašnjim pritiskom; a  $\{\sigma^T\}$ , matrica termičkog naprežanja biće indicirana gradijentom temperature. Naprežanje u vremenu  $t$  će tada biti:

$$\{\sigma\} = \{R\} + \{\sigma^0\} \quad (5.3.14)$$

gde je:

$$\{\sigma^0\} = \begin{Bmatrix} \sigma_r \\ \sigma_\theta \\ \sigma_z \end{Bmatrix} \quad (5.3.15)$$

i

$$\{R\} = \begin{Bmatrix} R_r(\varepsilon_r^c, \varepsilon_\theta^c) \\ R_\theta(\varepsilon_r^c, \varepsilon_\theta^c) \\ R_z(\varepsilon_r^c, \varepsilon_\theta^c) \end{Bmatrix} \quad (5.3.16)$$

R je matrica zaostalog napona i ona zavisi od napona puzanja koji prati matricu napona puzanja. Gde je [17]:

$$R_r = \frac{E}{2(1-\mu^2)} \left( \int_a^r \frac{\varepsilon_r^c - \varepsilon_\theta^c}{r} dr - \frac{r^2 - a^2}{b^2 - a^2} \frac{b^2}{r^2} \int_a^b \frac{\varepsilon_r^c - \varepsilon_\theta^c}{r} dr \right) + \frac{E(1-2\mu)}{2(1-\mu^2)} \frac{1}{r^2} \left( \int_a^r r \varepsilon_z^c dr - \frac{r^2 - a^2}{b^2 - a^2} \int_a^b r \varepsilon_z^c dr \right) \quad (5.3.17)$$

$$R_\theta = \frac{E}{2(1-\mu^2)} \left( \int_a^r \frac{\varepsilon_r^c - \varepsilon_\theta^c}{r} dr - \frac{r^2 + a^2}{b^2 - a^2} \frac{b^2}{r^2} \int_a^b \frac{\varepsilon_r^c - \varepsilon_\theta^c}{r} dr \right) - \frac{E(1-2\mu)}{2(1-\mu^2)} \frac{1}{r^2} \left( \int_a^r r \varepsilon_z^c dr - \frac{r^2 + a^2}{b^2 - a^2} \int_a^b r \varepsilon_z^c dr \right) - \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_\theta^c + \mu \varepsilon_z^c) \quad (5.3.19)$$

$$R_z = \frac{E\mu}{(1-\mu^2)} \left( \int_a^r \frac{\varepsilon_r^c - \varepsilon_\theta^c}{r} dr - \frac{b^2}{b^2 - a^2} \int_a^b \frac{\varepsilon_r^c - \varepsilon_\theta^c}{r} dr \right) - \frac{E\mu(1-2\mu)}{1-\mu^2} \frac{1}{b^2 - a^2} \int_a^r r \varepsilon_z^c dr + \frac{E}{1-\mu^2} \times [\mu \varepsilon_r^c - (1-\mu) \varepsilon_z^c] \quad (5.3.20)$$

$$\varepsilon_z^c = -(\varepsilon_r^c + \varepsilon_\theta^c) \quad (5.3.21)$$

$$\left\{ \frac{d\varepsilon^c}{dt} \right\} = \begin{Bmatrix} \frac{d\varepsilon_r^c}{dt} \\ \frac{d\varepsilon_\theta^c}{dt} \\ \frac{d\varepsilon_z^c}{dt} \end{Bmatrix} \quad (5.3.22)$$

gde je [17]:

$$\frac{d\varepsilon_r^c}{dt} = A \frac{\sigma_e^{n-1}}{(1-D)^n} \left[ \sigma_r - \frac{1}{2}(\sigma_\theta + \sigma_z) \right] \quad (5.3.23)$$

$$\frac{d\varepsilon_\theta^c}{dt} = A \frac{\sigma_e^{n-1}}{(1-D)^n} \left[ \sigma_\theta - \frac{1}{2}(\sigma_r + \sigma_z) \right] \quad (5.3.24)$$

$$\frac{d\varepsilon_z^c}{dt} = A \frac{\sigma_e^{n-1}}{(1-D)^n} \left[ \sigma_z - \frac{1}{2}(\sigma_r + \sigma_\theta) \right] \quad (5.3.25)$$

Pri čemu je:  $A$  – koeficijent puzanja materijala, i  
 $n$  – eksponent puzanja materijala.

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2} \quad (5.3.26)$$

Jednačina oštećenja ima sledeći oblik [17]:

$$\frac{dD}{dt} = H \left( \frac{\Phi(\sigma)}{1-D} \right)^q \quad (5.3.27)$$

ili

$$D = 1 - \left\{ 1 - (1+q) \int_0^t H [\Phi(\sigma)]^q dt \right\}^{\frac{1}{q+1}} \quad (5.3.28)$$

gde je:  $D$  - faktor oštećenja prouzrokovan usled puzanja,  
 $H$  i  $q$  – konstante oštećenja materijala usled puzanja, i  
 $\Phi(\sigma)$  – funkcija opterećenja.

$$\Phi(\sigma) = a_1 \sigma_e + a_2 \sigma_1 + a_3 \sigma_m \quad (5.3.29)$$

gde: -  $\sigma_1$  predstavlja maksimalno opterećenje (MPa):

$$\sigma_1 = \text{Max}(\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z) \quad (5.3.30)$$

-  $\sigma_m$  predstavlja prosečno opterećenje (MPa):

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_r + \sigma_\theta + \sigma_z) \quad (5.3.31)$$

-  $\sigma_e$  predstavlja Mises-ovo ekvivalentno opterećenje (MPa)

- dok za koeficijente  $a_1$ ,  $a_2$  i  $a_3$  važi da je:

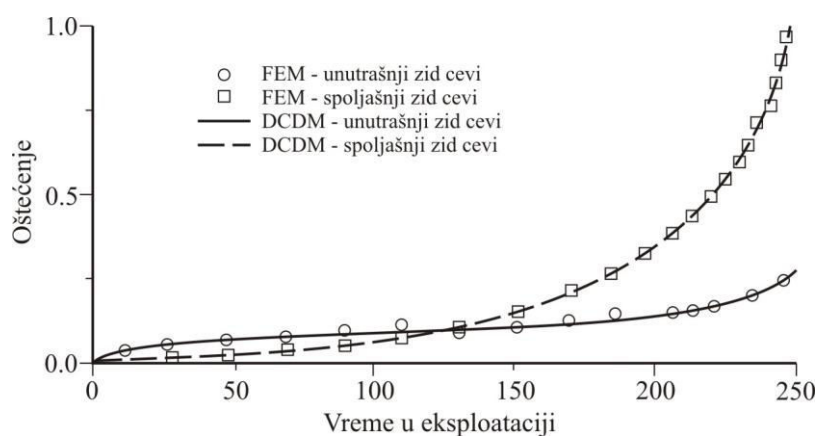
$$a_1 + a_2 + a_3 = 1$$

### 5.3.1 Verifikacija determinističkog rešenja

U cilju provere korektnosti i tačnosti determinističkog modela oštećenja puzanjem (DCDM) proučene su brojne studije [17, 27, 82, 112]. Podaci za određivanje su normalizovani. Imamo da je:

- $a=1$  – unutrašnji radijus,
- $b=2$  – spoljašnji radijus,
- $P=0.2$  – unutrašnji pritisak,
- $A=1$  – koeficijent puzanja,
- $n=5$  – eksponent puzanja,
- $H=1$  – konstanta oštećenja materijala usled puzanja,
- $q=3.5$  – konstanta oštećenja materijala usled puzanja,
- $E=1$  – modul elastičnosti materijala,
- $\mu=0.3$  – Poisson-ov odnos, i
- $D_{cr}=0.99$  – faktor oštećenja usled puzanja.

A u funkciji naprezanja  $\Phi(\sigma)$ ,  $a_1=a_3=0$ ,  $a_2=1$ . Komparacija rezultata metodom konačnih elemenata (FEM) iznosi  $t_{FEM}=248.1$ , dok je vreme otkaza određeno s prezentovanom metodom  $t_{DCDM}=247.186$ . Greška iznosi 0.4%, što se može videti sa slike 5.3.1 gde trend oštećenja prikazuje dobru saglasnost tokom porasta vremena.



Slika 5.3.1. Razvoj oštećenja usled puzanja na spoljnjem i unutrašnjem zidu cevi<sup>28</sup>

<sup>28</sup> Kucora, I., Radovanovic, Lj., Desnica, E., Pekez, J., Application of fuzzy function on pyrolysis furnace tubes remaining life assessment, ANNALS of Faculty Engineering Hunedoara – International Journal of Engineering, Romania, Tome XII [2014] – Fascicule 1 [February], ISSN 1584 – 2665

### 5.3.2 Stohastički model oštećenja usled puzanja

Uz pomoć Tejlorovog niza i ako su promenljive  $x_1, x_2, \dots, x_n$  nezavisne, stohastička funkcija ima sledeći oblik  $y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  [27] sa:

$$E[y] \approx f(x_1, x_2, \dots, x_n) \Big|_{x_i} = E(x_i) \quad (5.3.32)$$

i

$$Var[y] \approx \sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial f(x)}{\partial x_i} \Big|_{X_i = E(X_i)} \right]^2 Var(x_i) \quad (5.3.33)$$

gde je:  $E(X_i)$  - matematičko očekivanje funkcije, i  
 $Var(x_i)$  - variansa funkcije.

Za oštećenje izazvano puzanjem  $D$  [27]:

$$E[D] \approx \bar{D} \quad (5.3.34)$$

i

$$Var(D) \approx \sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial D}{\partial x_i} \Big|_{X_i = E(X_i)} \right]^2 Var(x_i) \quad (5.3.35)$$

U određivanju oštećenja figuriše mnoštvo parametara. Uključene su konstante materijala, kao što je modul elastičnosti  $E$ , Poissonov odnos  $\mu$ , koeficijent termičkog širenja  $\alpha$ , konstante puzanja i oštećenja kao što su  $A, n, H, q$  itd., i radni parametri kao što su temperatura i pritisak. Svi ovi parametri se mogu smatrati slučajnim varijablama.

Iz jednačina (5.3.1 ÷ 5.3.28) dobijamo:

$$\left\{ \frac{\partial \sigma^0}{\partial X_i} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} \frac{\partial \sigma_r^0}{\partial X_i} \\ \frac{\partial \sigma_\theta^0}{\partial X_i} \\ \frac{\partial \sigma_z^0}{\partial X_i} \end{array} \right\} \quad (5.3.36)$$

gde  $X_i$  predstavlja varijable kao što su:  $E, \mu, \alpha, A, n, H, q, P$  itd. Tako da dobijamo za:

$$\left\{ \frac{\partial \sigma^0}{\partial X_i} \right\} = \left\{ \frac{\partial \sigma^p}{\partial X_i} \right\} + \left\{ \frac{\partial \sigma^r}{\partial X_i} \right\} \quad (5.3.37)$$



gde je:

$$\left\{ \frac{\partial \sigma^T}{\partial X_i} \right\} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial \sigma_r^T}{\partial X_i} \\ \frac{\partial \sigma_\theta^T}{\partial X_i} \\ \frac{\partial \sigma_z^T}{\partial X_i} \end{Bmatrix} \quad (5.3.38)$$

i

$$\left\{ \frac{\partial \sigma^P}{\partial X_i} \right\} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial \sigma_r^P}{\partial X_i} \\ \frac{\partial \sigma_\theta^P}{\partial X_i} \\ \frac{\partial \sigma_z^P}{\partial X_i} \end{Bmatrix} \quad (5.3.39)$$

Primenom jednačine (5.3.14) dobijamo:

$$\left\{ \frac{\partial \sigma}{\partial X_i} \right\} = \left\{ \frac{\partial R}{\partial X_i} \right\} + \left\{ \frac{\partial \sigma^0}{\partial X_i} \right\} \quad (5.3.40)$$

gde je:

$$\left\{ \frac{\partial \sigma}{\partial X_i} \right\} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial \sigma_r}{\partial X_i} \\ \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial X_i} \\ \frac{\partial \sigma_z}{\partial X_i} \end{Bmatrix} \quad (5.3.41)$$

$$\left\{ \frac{\partial R}{\partial X_i} \right\} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial R_r(\varepsilon_r^c, \varepsilon_\theta^c)}{\partial X_i} \\ \frac{\partial R_\theta(\varepsilon_r^c, \varepsilon_\theta^c)}{\partial X_i} \\ \frac{\partial R_z(\varepsilon_r^c, \varepsilon_\theta^c)}{\partial X_i} \end{Bmatrix} \quad (5.3.42)$$

$$\left\{ \frac{\partial}{\partial X_i} \left( \frac{d\varepsilon^c}{dt} \right) \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial X_i} \left( \frac{d\varepsilon_r^c}{dt} \right) \\ \frac{\partial}{\partial X_i} \left( \frac{d\varepsilon_\theta^c}{dt} \right) \\ \frac{\partial}{\partial X_i} \left( \frac{d\varepsilon_z^c}{dt} \right) \end{array} \right\} \quad (5.3.43)$$

Konstitutivna jednačina oštećenja će sada biti:

$$\frac{\partial}{\partial X_i} \left( \frac{dD}{dt} \right) = \frac{\partial H}{\partial X_i} \left( \frac{\Phi(\sigma)}{1-D} \right)^q + Hq \frac{(\Phi(\sigma))^{q-1}}{(1-D)^q} \frac{\partial(\Phi(\sigma))}{\partial X_i} + Hq \frac{(\Phi(\sigma))^q}{(1-D)^{q+1}} \frac{\partial D}{\partial X_i} \quad (5.3.44)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial D}{\partial X_i} = & \left\{ 1 - (1+q) \int_0^t H[\Phi(\sigma)]^q dt \right\}^{-\frac{q}{q+1}} \times \left\{ \int_0^t H[\Phi(\sigma)]^q dt \frac{\partial q}{\partial X_i} + \right. \\ & \left. \int_0^t \left[ [\Phi(\sigma)]^q \frac{\partial H}{\partial X_i} + Hq [\Phi(\sigma)]^{q-1} \frac{\partial \Phi(\sigma)}{\partial X_i} + H[\Phi(\sigma)]^q \ln[\Phi(\sigma)] \frac{\partial q}{\partial X_i} \right] dt + \right. \\ & \left. \frac{1}{(1+q)^2} \left\{ 1 - (1+q) \int_0^t H[\Phi(\sigma)]^q dt \right\}^{\frac{1}{q+1}} \ln \left\{ 1 - (1+q) \int_0^t H[\Phi(\sigma)]^q dt \right\} \frac{\partial q}{\partial X_i} \right\} \end{aligned} \quad (5.3.45)$$

Nadalje je predstavljen detaljan tok izvođenja jednačina. Stohastičke varijable su iskazane s  $X_i$ . Na osnovu jednačina (5.3.11 ÷ 5.3.13) imamo:

$$\frac{\partial \sigma_r^p}{\partial X_i} = \frac{1}{k^2 - 1} \left\{ 1 - \left( \frac{b}{r} \right)^2 \right\} \frac{\partial P}{\partial X_i} \quad (5.3.46)$$

$$\frac{\partial \sigma_\theta^p}{\partial X_i} = \frac{1}{k^2 - 1} \left\{ 1 + \left( \frac{b}{r} \right)^2 \right\} \frac{\partial P}{\partial X_i} \quad (5.3.47)$$

$$\frac{\partial \sigma_z^p}{\partial X_i} = \frac{2P}{k^2 - 1} \frac{\partial \mu}{\partial X_i} + \frac{2\mu}{k^2 - 1} \frac{\partial P}{\partial X_i} \quad (5.3.48)$$

Na osnovu jednačina (5.3.4 ÷ 5.3.6) imamo:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_r^T}{\partial X_i} = & \frac{1}{2 \ln k} \left\{ -2 \ln \left( \frac{b}{r} \right) + \frac{\left( \frac{b}{r} \right)^2 - 1}{k^2 - 1} \ln k \right\} \times \\ & \left[ \frac{\alpha \Delta T}{1 - \mu} \frac{\partial E}{\partial X_i} + \frac{E \Delta T}{1 - \mu} \frac{\partial \alpha}{\partial X_i} + \frac{\alpha E}{1 - \mu} \frac{\partial (\Delta T)}{\partial X_i} + \frac{\alpha E \Delta T}{(1 - \mu)^2} \frac{\partial \mu}{\partial X_i} \right] \end{aligned} \quad (5.3.49)$$

$$\frac{\partial \sigma_\theta^T}{\partial X_i} = \frac{1}{2 \ln k} \left\{ 1 - \ln \left( \frac{b}{r} \right) - \frac{\left( \frac{b}{r} \right)^2 + 1}{k^2 - 1} \ln k \right\} \times$$

$$\left[ \frac{\alpha \Delta T}{1 - \mu} \frac{\partial E}{\partial X_i} + \frac{E \Delta T}{1 - \mu} \frac{\partial \alpha}{\partial X_i} + \frac{\alpha E}{1 - \mu} \frac{\partial (\Delta T)}{\partial X_i} + \frac{\alpha E \Delta T}{(1 - \mu)^2} \frac{\partial \mu}{\partial X_i} \right] \quad (5.3.50)$$

$$\frac{\partial \sigma_z^T}{\partial X_i} = \frac{1}{2 \ln k} \left\{ 1 - 2 \ln \left( \frac{b}{r} \right) - \frac{2 \ln k}{k^2 - 1} \right\} \times$$

$$\left[ \frac{\alpha \Delta T}{1 - \mu} \frac{\partial E}{\partial X_i} + \frac{E \Delta T}{1 - \mu} \frac{\partial \alpha}{\partial X_i} + \frac{\alpha E}{1 - \mu} \frac{\partial (\Delta T)}{\partial X_i} + \frac{\alpha E \Delta T}{(1 - \mu)^2} \frac{\partial \mu}{\partial X_i} \right] \quad (5.3.51)$$

$$\frac{\partial}{\partial X_i} \left( \frac{d \varepsilon_r^c}{dt} \right) = A \frac{\sigma_e^{n-1}}{(1-D)^n} \left[ \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial X_i} - \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial X_i} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial X_i} \right) \right] +$$

$$\frac{\sigma_e^{n-1}}{(1-D)^n} \left[ \sigma_r - \frac{1}{2} (\sigma_\theta + \sigma_z) \right] \frac{\partial A}{\partial X_i} + A \frac{\sigma_e^{n-1}}{(1-D)^n} \left[ \sigma_r - \frac{1}{2} (\sigma_\theta + \sigma_z) \right] \times$$

$$\left( \frac{n-1}{\sigma_e} \frac{\partial \sigma_e}{\partial X_i} + \ln \sigma_e \frac{\partial n}{\partial X_i} \right) + A \frac{\sigma_e^{n-1}}{(1-D)^n} \left[ \sigma_r - \frac{1}{2} (\sigma_\theta + \sigma_z) \right] \times$$

$$\left( \frac{n}{1-D} \frac{\partial D}{\partial X_i} - \ln(1-D) \frac{\partial n}{\partial X_i} \right) \quad (5.3.52)$$

$$\frac{\partial}{\partial X_i} \left( \frac{d \varepsilon_\theta^c}{dt} \right) = A \frac{\sigma_e^{n-1}}{(1-D)^n} \left[ \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial X_i} - \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \sigma_r}{\partial X_i} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial X_i} \right) \right] +$$

$$\frac{\sigma_e^{n-1}}{(1-D)^n} \left[ \sigma_\theta - \frac{1}{2} (\sigma_\theta + \sigma_z) \right] \frac{\partial A}{\partial X_i} + A \frac{\sigma_e^{n-1}}{(1-D)^n} \left[ \sigma_\theta - \frac{1}{2} (\sigma_r + \sigma_z) \right] \times$$

$$\left( \frac{n-1}{\sigma_e} \frac{\partial \sigma_e}{\partial X_i} + \ln \sigma_e \frac{\partial n}{\partial X_i} \right) + A \frac{\sigma_e^{n-1}}{(1-D)^n} \left[ \sigma_\theta - \frac{1}{2} (\sigma_r + \sigma_z) \right] \times$$

$$\left( \frac{n}{1-D} \frac{\partial D}{\partial X_i} - \ln(1-D) \frac{\partial n}{\partial X_i} \right) \quad (5.3.53)$$

Na osnovu jednačine (5.3.26) imamo:

$$\frac{\partial \sigma_e}{\partial X_i} = \frac{1}{2\sigma_e} \left[ (\sigma_\theta - \sigma_r) \left( \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial X_i} - \frac{\partial \sigma_r}{\partial X_i} \right) + (\sigma_r - \sigma_z) \left( \frac{\partial \sigma_r}{\partial X_i} - \frac{\partial \sigma_z}{\partial X_i} \right) + (\sigma_z - \sigma_\theta) \left( \frac{\partial \sigma_z}{\partial X_i} - \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial X_i} \right) \right] \quad (5.3.54)$$

Na osnovu jednačina (5.3.17 ÷ 5.3.21) imamo:

$$\begin{aligned} \frac{\partial R_r}{\partial X_i} = & \frac{E}{2(1-\mu^2)} \left( \int_a^r \frac{\frac{\partial \varepsilon_r^c}{\partial X_i} - \frac{\partial \varepsilon_\theta^c}{\partial X_i}}{r} dr - \frac{r^2 - a^2}{b^2 - a^2} \frac{b^2}{r^2} \int_a^b \frac{\frac{\partial \varepsilon_r^c}{\partial X_i} - \frac{\partial \varepsilon_\theta^c}{\partial X_i}}{r} dr \right) + \\ & \frac{E}{2(1-\mu^2)} \left( \int_a^r \frac{\varepsilon_r^c - \varepsilon_\theta^c}{r} dr - \frac{r^2 - a^2}{b^2 - a^2} \frac{b^2}{r^2} \int_a^b \frac{\varepsilon_r^c - \varepsilon_\theta^c}{r} dr \right) \frac{\partial E}{\partial X_i} + \\ & \frac{E\mu}{(1-\mu^2)^2} \left( \int_a^r \frac{\varepsilon_r^c - \varepsilon_\theta^c}{r} dr - \frac{r^2 - a^2}{b^2 - a^2} \frac{b^2}{r^2} \int_a^b \frac{\varepsilon_r^c - \varepsilon_\theta^c}{r} dr \right) \frac{\partial \mu}{\partial X_i} + \\ & \frac{E(1-2\mu)}{2(1-\mu^2)} \frac{1}{r^2} \left( \int_a^r r \frac{\partial \varepsilon_z^c}{\partial X_i} dr - \frac{r^2 - a^2}{b^2 - a^2} \int_a^b r \frac{\partial \varepsilon_z^c}{\partial X_i} dr \right) + \\ & \frac{1-2\mu}{2(1-\mu^2)} \frac{1}{r^2} \left( \int_a^r r \varepsilon_z^c dr - \frac{r^2 - a^2}{b^2 - a^2} \int_a^b r \varepsilon_z^c dr \right) \frac{\partial E}{\partial X_i} + \\ & \frac{E(\mu - \mu^2 - 1)}{(1-\mu^2)^2} \frac{1}{r^2} \left( \int_a^r r \varepsilon_z^c dr - \frac{r^2 - a^2}{b^2 - a^2} \int_a^b r \varepsilon_z^c dr \right) \frac{\partial \mu}{\partial X_i} \end{aligned}$$

(5.3.55)

$$\begin{aligned}
\frac{\partial R_\theta}{\partial X_i} = & \frac{E}{2(1-\mu^2)} \left( \int_a^r \frac{\frac{\partial \varepsilon_r^c}{\partial X_i} - \frac{\partial \varepsilon_\theta^c}{\partial X_i}}{r} dr - \frac{r^2+a^2}{b^2-a^2} \frac{b^2}{r^2} \int_a^b \frac{\frac{\partial \varepsilon_r^c}{\partial X_i} - \frac{\partial \varepsilon_\theta^c}{\partial X_i}}{r} dr \right) + \\
& \frac{1}{2(1-\mu^2)} \left( \int_a^r \frac{\varepsilon_r^c - \varepsilon_\theta^c}{r} dr - \frac{r^2+a^2}{b^2-a^2} \frac{b^2}{r^2} \int_a^b \frac{\varepsilon_r^c - \varepsilon_\theta^c}{r} dr \right) \frac{\partial E}{\partial X_i} + \\
& \frac{E\mu}{(1-\mu^2)^2} \left( \int_a^r \frac{\varepsilon_r^c - \varepsilon_\theta^c}{r} dr - \frac{r^2+a^2}{b^2-a^2} \frac{b^2}{r^2} \int_a^b \frac{\varepsilon_r^c - \varepsilon_\theta^c}{r} dr \right) \frac{\partial \mu}{\partial X_i} - \\
& \frac{E(1-2\mu)}{2(1-\mu^2)} \frac{1}{r^2} \left( \int_a^r r \frac{\partial \varepsilon_z^c}{\partial X_i} dr + \frac{r^2+a^2}{b^2-a^2} \int_a^b r \frac{\partial \varepsilon_z^c}{\partial X_i} dr \right) - \\
& \frac{1-2\mu}{2(1-\mu^2)} \frac{1}{r^2} \left( \int_a^r r \varepsilon_z^c dr + \frac{r^2+a^2}{b^2-a^2} \int_a^b r \varepsilon_z^c dr \right) \frac{\partial E}{\partial X_i} - \\
& \frac{E(\mu-\mu^2-1)}{(1-\mu^2)^2} \frac{1}{r^2} \left( \int_a^r r \varepsilon_z^c dr + \frac{r^2+a^2}{b^2-a^2} \int_a^b r \varepsilon_z^c dr \right) \frac{\partial \mu}{\partial X_i} - \\
& \frac{E}{1-\mu^2} \left( \frac{\partial \varepsilon_\theta^c}{\partial X_i} + \mu \frac{\partial \varepsilon_z^c}{\partial X_i} + \varepsilon_\theta^c \frac{\partial \mu}{\partial X_i} \right) - \frac{1}{1-\mu^2} (\varepsilon_\theta^c + \mu \varepsilon_z^c) \frac{\partial E}{\partial X_i} - \\
& \frac{2E\mu}{(1-\mu^2)^2} (\varepsilon_\theta^c + \mu \varepsilon_z^c) \frac{\partial \mu}{\partial X_i}
\end{aligned}$$

(5.3.56)

$$\begin{aligned}
\frac{\partial R_\theta}{\partial X_i} = & \frac{E\mu}{(1-\mu^2)} \left( \int_a^r \frac{\frac{\partial \varepsilon_r^c}{\partial X_i} - \frac{\partial \varepsilon_\theta^c}{\partial X_i}}{r} dr - \frac{b^2}{b^2-a^2} \int_a^b \frac{\frac{\partial \varepsilon_r^c}{\partial X_i} - \frac{\partial \varepsilon_\theta^c}{\partial X_i}}{r} dr \right) + \\
& \frac{\mu}{(1-\mu^2)} \left( \int_a^r \frac{\varepsilon_r^c - \varepsilon_\theta^c}{r} dr - \frac{b^2}{b^2-a^2} \int_a^b \frac{\varepsilon_r^c - \varepsilon_\theta^c}{r} dr \right) \frac{\partial E}{\partial X_i} + \\
& \frac{E(1+\mu^2)}{(1-\mu^2)^2} \left( \int_a^r \frac{\varepsilon_r^c - \varepsilon_\theta^c}{r} dr - \frac{b^2}{b^2-a^2} \int_a^b \frac{\varepsilon_r^c - \varepsilon_\theta^c}{r} dr \right) \frac{\partial \mu}{\partial X_i} - \\
& \frac{E(1+\mu^2)}{(1-\mu^2)^2} \left( \int_a^r \frac{\varepsilon_r^c - \varepsilon_\theta^c}{r} dr - \frac{b^2}{b^2-a^2} \int_a^b \frac{\varepsilon_r^c - \varepsilon_\theta^c}{r} dr \right) \frac{\partial \mu}{\partial X_i} - \\
& \frac{E\mu(1-2\mu)}{1-\mu^2} \frac{1}{b^2-a^2} \int_a^r r \frac{\partial \varepsilon_z^c}{\partial X_i} dr - \\
& \frac{\mu(1-2\mu)}{1-\mu^2} \frac{1}{b^2-a^2} \left( \int_a^r r \varepsilon_z^c dr \right) \frac{\partial E}{\partial X_i} - \frac{E(\mu^2-4\mu+1)}{(1-\mu^2)^2} \frac{1}{b^2-a^2} \left( \int_a^r r \varepsilon_z^c dr \right) \frac{\partial \mu}{\partial X_i} + \\
& \frac{E}{1-\mu^2} \left( \mu \frac{\partial \varepsilon_r^c}{\partial X_i} + \frac{\partial \mu}{\partial X_i} \varepsilon_r^c - (1-\mu) \frac{\partial \varepsilon_z^c}{\partial X_i} + \varepsilon_z^c \frac{\partial \mu}{\partial X_i} \right) + \frac{1}{1-\mu^2} [\mu \varepsilon_r^c - (1-\mu) \varepsilon_z^c] \frac{\partial E}{\partial X_i} + \\
& \frac{2\mu E}{(1-\mu^2)^2} [\mu \varepsilon_r^c - (1-\mu) \varepsilon_z^c] \frac{\partial \mu}{\partial X_i}
\end{aligned} \tag{5.3.57}$$

$$\frac{\partial \varepsilon_z^c}{\partial X_i} = - \left( \frac{\partial \varepsilon_r^c}{\partial X_i} + \frac{\partial \varepsilon_\theta^c}{\partial X_i} \right) \tag{5.3.58}$$

Na osnovu jednačina (5.3.27 i 5.3.28) imamo

$$\frac{\partial}{\partial X_i} \left( \frac{dD}{dt} \right) = \frac{\partial H}{\partial X_i} \left( \frac{\Phi(\sigma)}{1-D} \right)^q + Hq \frac{(\Phi(\sigma))^{q-1}}{(1-D)^q} \frac{\partial(\Phi(\sigma))}{\partial X_i} + Hq \frac{(\Phi(\sigma))^q}{(1-D)^{q+1}} \frac{\partial D}{\partial X_i} \tag{5.3.59}$$

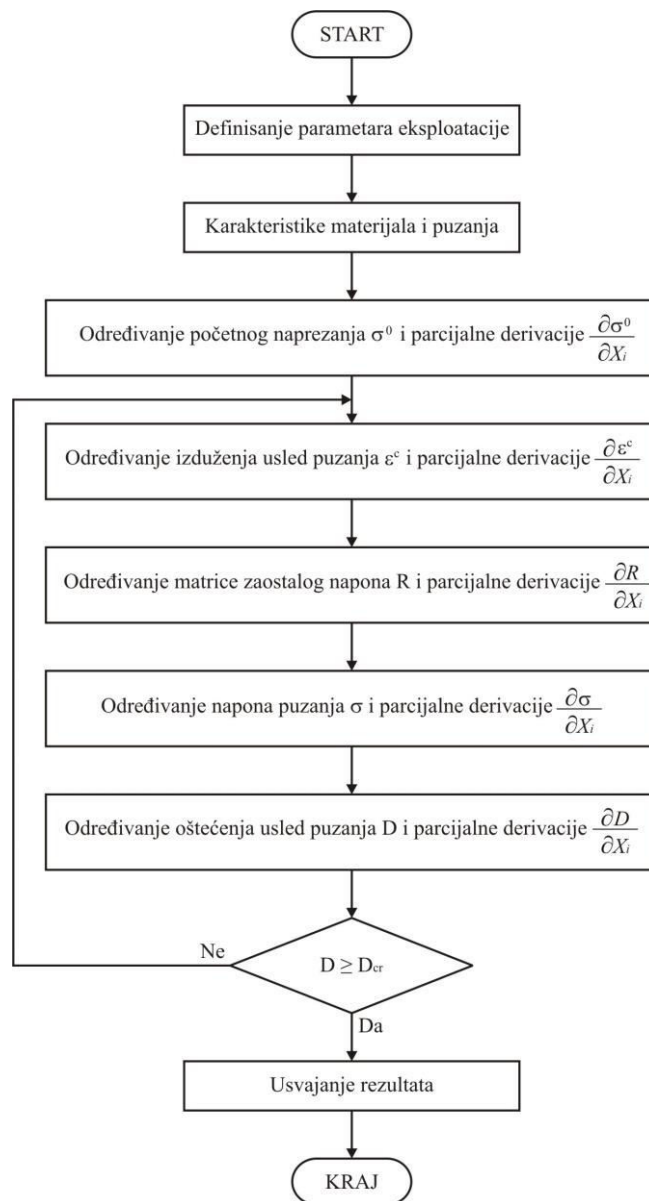
Odnos  $\frac{\partial \sigma_c}{\partial X_i}$  koji je predstavljen u jednačini (5.3.54) se sada može izraziti kao:

$$\frac{\partial \sigma_1}{\partial X_i} = \frac{\partial}{\partial X_i} \text{Max}(\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z) \tag{5.3.60}$$

$$\frac{\partial \sigma_m}{\partial X_i} = \frac{\partial}{\partial X_i} \left[ \frac{1}{3} (\sigma_r + \sigma_\theta + \sigma_z) \right] = \frac{1}{3} \left( \frac{\partial \sigma_r}{\partial X_i} + \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial X_i} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial X_i} \right) \tag{5.3.61}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial D}{\partial X_i} = & \left\{ 1 - (1+q) \int_0^t H[\Phi(\sigma)]^q dt \right\}^{-\frac{q}{q+1}} \times \left\{ \int_0^t H[\Phi(\sigma)]^q dt \frac{\partial q}{\partial X_i} + \right. \\ & \left. \int_0^t \left[ [\Phi(\sigma)]^q \frac{\partial H}{\partial X_i} + Hq[\Phi(\sigma)]^{q-1} \frac{\partial \Phi(\sigma)}{\partial X_i} + H[\Phi(\sigma)]^q \ln[\Phi(\sigma)] \frac{\partial q}{\partial X_i} \right] dt + \right. \\ & \left. \frac{1}{(1+q)^2} \left\{ 1 - (1+q) \int_0^t H[\Phi(\sigma)]^q dt \right\}^{\frac{1}{q+1}} \ln \left\{ 1 - (1+q) \int_0^t H[\Phi(\sigma)]^q dt \right\} \frac{\partial q}{\partial X_i} \right\} \end{aligned} \quad (5.3.62)$$

Na osnovu jednačina (5.3.32 ÷ 5.3.43) razvijen je program za analizu oštećenja usled puzanja. Dijagram toka je prikazan na slici 5.3.2.



Slika 5.3.2. Dijagram toka programa analize za slučaj oštećenja materijala cevi peći usled puzanja

### 5.3.3 Verifikacija predloženog stohastičkog rešenja za određivanje oštećenja usled puzanja

Parametri cevi peći za ovaj primer su:

Materijal: HK 40

Radni pritisak:  $P=3.43 \text{ MPa}$

Unutrašnji radijus cevi:  $a=37.2 \text{ mm}$

Spoljašnji radijus cevi:  $b=52.1 \text{ mm}$

Temperatura unutrašnjeg zida cevi:  $T_i=822 \text{ }^\circ\text{C}$

Temperatura spoljašnjeg zida cevi:  $T_o=902 \text{ }^\circ\text{C}$

Modul elastičnosti:  $E=138215 - 59.7767T \text{ MPa}$

Poissonov odnos:  $\mu=0.3137+4.952 \times 10^{-5}T$

Koeficijent termičkog širenja:  $\alpha=1.5 \times 10^{-5}+3.0 \times 10^{-9}T(1/^\circ\text{C})$

Konstante puzanja i oštećenja:  $A=10^{-38.713+0.02784T}$

$$n=13.91-0.00966T$$

$$H=10^{-25.387+0.01644T}$$

$$q=6.6473-0.0029T$$

U ovom primeru varijable kao što su  $E$ ,  $\mu$ ,  $\alpha$ ,  $P$ ,  $A$ ,  $n$ ,  $H$ ,  $q$ ,  $T_o$  su odabrane kao slučajne varijable za proveru programa. Koeficijenti varijacije ovih varijabli su od  $0.05 \div 0.1$ .

Rezultati pristupa preko Monte Carlo simulacije u kojem broj pokušaja iznosi 1000, kao i rezultati predloženog stohastičkog rešenja određivanja oštećenja usled puzanja predstavljeni su u tabeli 5.3.1.

Tabela 5.3.1. Komparacija dobivenih rezultata metodom Monte Carlo i predloženim stohastičkim modelom oštećenja ( $t=44.100 \text{ h}$ ,  $D=7.234 \times 10^{-2}$ )

STOHASTIČKA VARIJABLA	STOHASTIČKI MODEL		METODA MONTE CARLO		GREŠKA	
	$D$	$\frac{\partial D}{\partial X_i}$	$D'$	$\frac{\partial D'}{\partial X_i}$	$\frac{\partial D'}{\partial X_i}$	$\left( \frac{\partial D'}{\partial X_i} - \frac{\partial D}{\partial X_i} \right) \frac{\partial D}{\partial X_i}$ [%]
E	$7.234 \times 10^{-2}$	$-4.568 \times 10^{-2}$	$7.218 \times 10^{-2}$	$-4.377 \times 10^{-2}$	-0.22	-4.18
$\mu$	$7.234 \times 10^{-2}$	$-8.819 \times 10^{-2}$	$7.218 \times 10^{-2}$	$-8.767 \times 10^{-2}$	-0.22	-0.59
$\alpha$	$7.234 \times 10^{-2}$	$9.046 \times 10^{-2}$	$7.235 \times 10^{-2}$	$8.713 \times 10^{-2}$	0.01	-3.68
P	$7.234 \times 10^{-2}$	$1.216 \times 10^{-2}$	$7.235 \times 10^{-2}$	$1.195 \times 10^{-2}$	0.01	-1.73
A	$7.234 \times 10^{-2}$	$-1.687 \times 10^{14}$	$7.595 \times 10^{-2}$	$-1.570 \times 10^{14}$	4.49	-6.94
N	$7.234 \times 10^{-2}$	$-1.913 \times 10^{-1}$	$7.410 \times 10^{-2}$	$-1.888 \times 10^{-1}$	2.43	-1.31
H	$7.234 \times 10^{-2}$	$2.264 \times 10^{10}$	$7.485 \times 10^{-2}$	$2.254 \times 10^{10}$	3.47	-0.44
Q	$7.234 \times 10^{-2}$	$2.507 \times 10$	$7.279 \times 10^{-2}$	$2.463 \times 10$	0.62	-1.76
$T_o$	$7.234 \times 10^{-2}$	$4.372 \times 10^{-4}$	$7.305 \times 10^{-2}$	$4.466 \times 10^{-4}$	0.98	2.15



Iz tabele 5.3.1 se može zaključiti da su rezultati dva metoda približni. Greška u vrednosti oštećenja  $D$  između dva rezultata je u opsegu od  $-0.22$  do  $4.49$  %, dok je greška parcijalne derivacije  $\partial D/\partial X_i$  u granicama između  $-6.94$  i  $2.15$  %. Ove greške su veoma male. Komparacija dobivenih rezultata metodom Monte Carlo i stohastičkog modela za određivanje oštećenja usled puzanja demonstrirala je visoku tačnost stohastičkog modela za određivanje oštećenja usled puzanja.

## 5.4 Procena zakona raspodele verovatnoće životnog veka cevi usled oštećenja izazvanih puzanjem

Ovo poglavlje ispituje primenljivost Larson - Miller-ovog parametra na procenu zakona raspodele životnog veka u funkciji od temperature i opterećenja. Najčešće korišćena metoda linearne regresije najmanjeg kvadrata polazi od pretpostavke da raspodela životnog veka cevi oštećene puzanjem odgovara lognormalnoj raspodeli. U većini literature se ne razmatra validnost ove pretpostavke. U ovom delu smo predstavili procedure za validaciju dve kritične pretpostavke za slučajeve u kojima se primenjuje metoda najmanjeg kvadrata. Metoda maksimalne verovatnoće je predložena kao alternativa i kao daleko jača metoda za predstavljanje raspodele životnog veka cevi etilenskih peći oštećenih puzanjem.

Proizvođači obično primenjuju ubrzana ispitivanja životnog veka materijala cevi izloženih oštećenjima usled puzanja. Podaci dobiveni iz ovih ispitivanja uključuju temperaturu, opterećenje i vreme do loma. Podaci iz ovih ispitivanja se koriste za procenu raspodele životnog veka materijala. Stručnjaci su tokom godina dolazili do raznih izraza koje su predlagali za predstavljanje odnosa između ovih promenljivih [16]. Korišćenje temperaturno-vremenskog parametra (TVP) za predstavljanje i ekstrapolaciju podataka o puzanju na visokim temperaturama se koristilo tokom dugog niza godina. TVP je u osnovi funkcija korelacije varijabli prilikom ispitivanja oštećenja izazvanih puzanjem, tj. opterećenja, temperature i vremena.

Jedna od najčešće korišćenih temperaturno-vremenskih parametara je Larson-Miller-ov (L-M) parametar:<sup>29</sup>

$$LMP = f(S) = (T_c + 273.2)(\log t_r + C) \quad (5.4.1)$$

gde je: LMP – Larson-Miller - ov parametar,

S – opterećenje [N/m<sup>2</sup>], psi, ksi – kilo pounds per square inch],

T<sub>c</sub> – temperatura [C°],

t<sub>r</sub> – vreme do loma [h],

C – konstanta materijala.

Za  $f(S)$  u jednačini (5.4.1) Jaske i Simonen su koristili sledeći izraz za HP-50 i Nb modifikovane HP legure:

$$LMP = f(S) = C_1 + C_2 \log S + C_3 (\log S)^2 \quad (5.4.2)$$

gde su: C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> i C<sub>3</sub> konstante materijala koje se dobijaju iz analize ubrzanih ispitivanja životnog veka na puzanje.<sup>30</sup> Kombinujući jednačine (5.4.1 i 5.4.2) dobijamo sledeći izraz [107]:

$$\log t_r = -C + \frac{C_1}{T_c + 273.2} + C_2 \frac{\log S}{T_c + 273.2} + C_3 \frac{(\log S)^2}{T_c + 273.2} \quad (5.4.3)$$

<sup>29</sup> Larson, F.R., Miller J., A time-temperature relationship for rupture and creep stresses, Transactions of the ASME, 74:765-771, 1952.

<sup>30</sup> Jaske, C.E., Simonen, F.A., A computational model for predicting the life of tubes used in petrochemical heater service, Journal Pressure Vessel Technology 107, pp.239-246, 1985.

Jaske i Simonen [107] su koristili jednačinu (5.4.3) i tehnike regresije najmanjeg kvadrata za određivanje ovih konstanti materijala. Jednačine (5.4.1) i (5.4.2) su koristili za izračunavanje prosečnog životnog veka za datu temperaturu i opterećenje. Za procenu vremena do pojave prvog otkaza cevi u pećima, oni su primenili faktor redukcije reda veličina 5 na prosečni životni vek radi određivanja minimalnog životnog veka. Jaske i Simonen [107] su njihov rad takođe uporedili sa API RP-530 [8] i otkrili značajne razlike između minimalno procenjenog životnog veka kod oba pristupa. Jaske i Simonen-ov pristup je bio daleko tačniji zbog toga što API 530 koristi jednostavne formule za srednji prečnik radi određivanja pojedinačnih vrednosti opterećenja, dok Jaske i Simonen koriste za određivanje opterećenja analizu konačnih elemenata da bi dobili raspodelu opterećenja kroz zid cevi u funkciji od istorijata rada, uzimajući u obzir puzanje i relaksaciju i preraspodelu termičkog opterećenja.

Neki od proizvođača koriste različite izraze za predstavljanje odnosa između LMP i logS, što se i nadalje prezentuje [4]:

$$\log S = A_1 + A_2 \times LMP + A_3 \times (LMP)^2 \quad (5.4.4)$$

gde su  $A_1$ ,  $A_2$  i  $A_3$  konstante materijala koje se dobijaju iz ubrzanih ispitivanja određivanja životnog veka. Ovi proizvođači takođe koriste metode najmanjeg kvadrata za određivanje konstanti materijala. Oni dobijaju nižu 95% granicu poverenja za logS u cilju određivanja minimalnog životnog veka usled puzanja legure.

Nelson [88] navodi da se tehnike za ubrzana ispitivanja životnog veka mogu koristiti za procenu različitih procenata životnog veka komponenata primenom Larson – Miller-ovog parametra. On takođe tvrdi da se disperzija životnog veka često zapostavlja u metalurškim studijama. Statističku raspodelu životnog veka usled puzanja ne navode proizvođači, a nisu je dali ni Jaske i Simonen [107] u svom radu.

Metod regresije najmanjeg kvadrata je korišten od Jaske i Simonen-a [107] radi pronalazenja konstanti u jednačini (5.4.3), i dali su pretpostavku za  $\log t_r$  koja je promenljiva i sledi normalnu raspodelu. Međutim, autori nisu prodiskutovali validnost ove pretpostavke. Izraz  $\log t_r$  može veoma dobro slediti i neke druge raspodele, kao npr. Weibull-ovu.

U matematičkom modelu predstavljenom jednačinom (5.4.4) logS se tretira kao zavisna promenljiva, dok se LMP tretira kao nezavisna promenljiva. Ona pretpostavlja da se većina varijacija logS može predstaviti polinomima drugog reda u funkciji od LMP a preostale varijacije u logS pomoću standardne normalne raspodele. Ove pretpostavke su kontradiktorne od onih od kojih su pošli Jaske i Simonen [96]. Temperatura i opterećenje se može regulisati preko izvora toplote i pritiska respektivno, dok se životni vek usled puzanja treba tretirati kao zavisna varijabla koja sledi odgovarajuću raspodelu. Tako da primena jednačine (5.4.4) za procenu preostalog životnog veka neće dati korektne rezultate.

U cilju pronalazenja matematičke povezanosti između LMP i opterećenja S, većina istraživača se koristi tehnikama regresije najmanjeg kvadrata. Conway [25] dao je detaljna objašnjenja o primeni metoda regresije najmanjeg kvadrata. Međutim, metoda najmanjeg kvadrata ima ograničenje koje se odnosi na validnost samo u slučaju normalne raspodele zavisne promenljive (u našem slučaju LMP). U ovom delu rada ćemo predstaviti način na koji treba da se koristi metoda najmanjeg kvadrata i maksimalne verovatnoće tako da odgovara svim statističkim raspodelama koje mogu slediti životni vek usled puzanja.[69]

## 5.4.1 Opis modela

U ovom odeljku ćemo formalizovati model koji će odgovarati raspodeli životnog veka usled puzanja. Metoda najmanjeg kvadrata nije neophodna za dobijanje konstanti materijala koje figurišu u izrazu. Aproksimacije od kojih se pošlo u ovom radu su:<sup>31</sup>

1. Koristiće se osnovna Larson – Miller-ova jednačina (5.4.1).
2. Životni vek usled puzanja je slučajna promenljiva čija je medijana ili drugi parametar lokacije u funkciji od temperature i opterećenja. Temperatura i opterećenje se tretiraju kao kontrolisane promenljive.
3. Prosečni LMP se može predstaviti polinomnom funkcijom  $\log(S)$  kao što je predložio Conway (jed. 2÷34) [25].

Parametar  $t_r$  je statistički, a  $T_c$  deterministički, dok za LMP iz (5.4.1) znamo da je takođe statistički. Kao rezultat, jednačina (5.4.2) treba da se interpretira kao prosek LMP-a i može se predstaviti polinomnom funkcijom drugog reda od  $\log(S)$ . Nadalje ćemo se koristiti polinomnom funkcijom drugog reda prikazanom u jednačini (5.4.2) za ilustraciju korektnog pristupa koji odgovara statističkoj raspodeli životnog veka usled oštećenja puzanjem. Pristup koji se ovde razmatra takođe je validan i za opštu polinomnu funkciju. Da bi smo omogućili da odgovara različitim statističkim raspodelama životnog veka, mi smo koristili prirodni umesto običnog logaritma u modelima. Jednačine (5.4.1) i (5.4.2) se mogu zapisati u sledećem obliku kada se primeni logaritmovanje [25]:

$$LMP' = (T_c + 273.2)(\ln t_r + C') \quad (5.4.5)$$

$$LMP' = C'_1 + C'_2 \times \ln S + C'_3 \times (\ln S)^2 \quad (5.4.6)$$

gde su  $LMP'$ ,  $C'$ , i  $C'_i$  za  $i=1, 2, 3$  su odgovarajući parametri gde je u jednačini korišten prirodni logaritam.

Jednačine (5.4.5) i (5.4.6) se mogu kombinovati, tako da onda dobijamo [25]:

$$\ln t_r = -C' + C'_1 \frac{1}{T_c + 273.2} + C'_2 \frac{\ln S}{T_c + 273.2} + C'_3 \frac{(\ln S)^2}{T_c + 273.2} \quad (5.4.7)$$

$$\ln t_r = -C' + C'_1 X_1 + C'_2 X_2 + C'_3 X_3 \quad (5.4.8)$$

gde je:  $X_i = (\ln S)^{i-1} / T_c + 273.2$  za  $i=1, 2$  i  $3$

<sup>31</sup> Kucora, I., Radovanovic, Lj., Zakin, M., Otić, G., *Stohastički model određivanja oštećenja cevi pirolitičkih peći*, XXXVII Konferencija Majski skup održavalaca Srbije „Nova koncepcija održavanja: vibrodijagnostičko održavanje tehničkih sistema u kompanijama” Vrnjačka Banja, 30.05.2014. Srpski akademski centar, Novi Sad, elektronski zbornik, ISBN 978-86-89087-12-3, p.125,

$C', C'_1, C'_2, C'_3$  su konstante dobivene iz analiza podataka (kasnije će se razmotriti).

Opšta forma jednačine (5.4.8) kada je  $f(S)$  polinomna funkcija  $n$ -tog reda od  $\log(S)$  je predstavljena od strane Conway-a [25]. Leva strana jednačine (5.4.8) treba da se predstavi kao prirodni logaritam parametra lokacije odgovarajuće raspodele. Dalja objašnjenja će se dati u sledećem odeljku pomoću primera. Jednačina (5.4.2) koristi obični logaritam dok jednačina (5.4.6) koristi prirodni logaritam. Odnosi između parametara u ovim jednačinama se mogu lako proveriti pomoću sledećih izraza [25]:

$$LMP = LMP' \times \log e \quad (5.4.9)$$

$$C = C' \times \log e \quad (5.4.10)$$

$$C_1 = C'_1 \times \log e \quad (5.4.11)$$

$$C_2 = C'_2 \quad (5.4.12)$$

$$C_3 = C'_3 / \log e \quad (5.4.13)$$

## 5.4.2 Metoda najmanjeg kvadrata

Metoda najmanjeg kvadrata polazi od pretpostavke da LMP sledi normalnu raspodelu, ili ekvivalentno  $t_r$  sledi lognormalnu raspodelu. Može se upotrebiti za pronalaženje parametara u (5.4.8) iz podataka o životnom veku, dobivenih ubrzanim ispitivanjem. Analiza linearne regresije je na raspolaganju u računarskim programima koji se bave tabelarnim proračunima, npr. Microsoft Excel. Ako podržavaju upotrebu metoda linearne regresije, tada se mora uraditi sledeće da bi se izvršila verifikacija modela:

1. Da li se odgovarajući model prikazan u jednačini (5.4.8) može primeniti za većinu varijacija u posmatranim podacima o životnom veku cevi usled oštećenja puzanjem; ako je odgovor ne, onda oni odgovaraju nekoj drugoj jednačini, a ne jednačini (5.4.8). Npr., može se proširiti jednačina (5.4.8) da obuhvati  $n$  kopromenljivih  $X_1, X_2, \dots, X_n$ ;

$$\ln t_r = -C' + C'_1 X_1 + C'_2 X_2 + \dots + C'_n X_n \quad (5.4.14)$$

gde je  $n \geq 3$ .

2. Da li pretpostavka da prirodni logaritam životnog veka usled oštećenja puzanjem sledi normalnu raspodelu, ili ekvivalentno, da li životni vek usled oštećenja puzanjem sledi lognormalnu raspodelu; ako je odgovor ne, onda se metoda najmanjeg kvadrata ne može koristiti za modelovanje matematičkih veza između LMP' i  $\ln S$ . Tada je potrebno primeniti druge metode kojima se može postići modelovanje i podudarnost dobivenih parametara životnog veka sa nekim drugim raspodelama.
3. Mogu se izvršiti i druge provere za dokazivanje podudarnosti dobivenog modela sa podacima. Npr., da li neki od odgovarajućih parametara  $C'_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) u značajnijoj meri odstupa od 0. Nadalje mi ćemo koristiti dobivene rezultate iz Microsoft Excel-a za izvođenje provera.

Koristili smo Microsoft Excel za analizu 109 tačaka u kojima smo ispitivali ubrzanim ispitivanjima životni vek kod puzanja HP legure sa malim sadržajem Si. Linearna regresija je primenjena u jednačini (5.4.7). Rezultati iz programa su prikazani na slici 5.4.1, program obuhvata i sledeću jednačinu:

$$\ln t_{50} = -40.7534 + \frac{67844.79}{T_c + 273.2} - \frac{3376.28 \times \ln S}{T_c + 273.2} - \frac{1441.72 \times (\ln S)^2}{T_c + 273.2} \quad (5.4.15)$$

Pošto je za prirodni logaritam životnog veka usled oštećenja puzanjem pretpostavljena normalna raspodela, dobivena jednačina (5.4.15) odnosi se na prirodni logaritam sa 50% životnog veka usled puzanja za odgovarajuću temperaturu i opterećenje. Sa slike 5.4.1. možemo videti da je R – kvadrat modela jednak 0.9255, veoma blizu 1. To znači da se 92.55% varijacija kod podataka o životnom veku cevi usled puzanja može objasniti pridruženim modelom u jednačini (5.4.15). Ovo potvrđuje podudarnost prve navedene pretpostavke.

Regression Statistics	
Multiple R	0.9620
R Square	0.9255
Adjusted R Square	0.9233
Standard Error	0.3833
Observations	109

## ANOVA

	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	3	191.5314	63.8438	434.5051	5.0301E-59
Rezidual	105	15.4281	0.1469		
Total	108	206.9595			

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%
Intercept	-40.7534	1.3973	-29.1648	3.66E-52	-43.5240	-37.9827
X1`	67845.49	1928.401	35.1819	6.31E-60	64021.12	71668.45
X2`	-3376.28	624.2582	-5.4085	4.02E-07	-4614.07	-2138.49
X3`	-1441.72	217.5114	-6.6283	1.5E-09	-1873.01	-1010.44

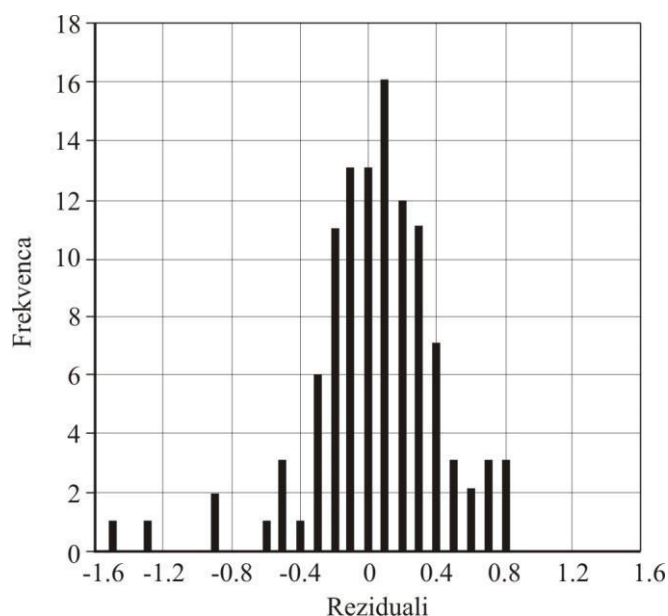
Slika 5.4.1. Rezultati analize problema pomoću linearne regresije u MS Excel-u

Značenja oznaka za interpretaciju linearne regresije u MS Excel-u:

- *Multiple R* – koeficijent višestruke korelacije, R,
- *R Square* – koeficijent determinacije,  $R^2$ ,
- *Adjusted R Square* – podešeni koeficijent determinacije,  $R^2_{adj}$ ,
- *Standard Error* – greška (devijacija) varianse,  $S_y$ ,

- *Observations* – broj tačaka posmatranja,  $n$ ,
- *Anova (ANalysis Of VAriance)* – analiza varijansi,
- *Regression* – regresija,
- *Residual* – reziduali,
- *df* – stepen slobode,
- *SS (Sum of squares)* – suma kvadrata (ukupna varijacija),  $SS_q$ ,
- *MS (Mean of squares)* – varijansa,  $MS_q$ ,
- *F* – vrednost F statistike,
- *Significance F* – stepen značajnosti (uticaja) F statistike,
- *t Stat* – vrednost t statistike,
- *P-value* – verovatnoća,
- *Lower 95%* – stepen poverljivosti niži od 95%,
- *Upper 95%* – stepen poverljivosti viši od 95%,
- *X1, X2, X3* – varijable,  $i$
- *Intercept* – konstanta (tačka preseka).

U nastojanjima da se proveri pretpostavka o valjanosti lognormalne raspodele za modelovanje životnog veka usled oštećenja puzanjem nacrtan je histogram ostataka između logaritma predviđenog životnog veka primenom jednačine (5.4.15) i logaritma podataka o životnom veku koji smo imali (sl.5.4.2). Ako je pretpostavka dobra, histogram treba da bude simetričan, da ima oblik zvona. Međutim, sa slike 5.4.2 se vidi da histogram nije simetričan, nego je više asimetričan na levo. Ovime se druga pretpostavka opovrgava, tako da je pridruženi model u jednačini (5.4.15) nezadovoljavajući.



Slika 5.4.2. Histogram reziduala predloženog modela

Mora se naglasiti da je prava statistička raspodela podjednako značajna kao i jednačina koja prezentuje vezu između proseka logaritma životnog veka i kontrolabilnih varijabli, tj. opterećenja i temperature. U analizi pouzdanosti ili proceni životnog veka tehničkih sistema, mi smo zainteresovaniji za preostali period u kome će tehnički sistem

raditi sa određenom pouzdanošću, tj. bez otkaza sa 95% verovatnoćom ili većom. To znači da smo mi zainteresovani za 5% ili manje oštećenje usled puzanja, pre nego za 50% koje je prikazano kroz jednačine metoda najmanjeg kvadrata. Ako se primeni pogrešna statistička raspodela mogu se pojaviti velike greške prilikom određivanja manjih procentualnih vrednosti. Iz tog razloga se lognormalna raspodela mora dokazati da je odgovarajuća, pre nego što se razvijeni model može koristiti za procenu preostalog životnog veka usled puzanja.

### 5.4.3 Metoda maksimalne verovatnoće

Metoda maksimalne verovatnoće se može koristiti za proveru pogodnosti parametara bilo kojoj statističkoj raspodeli. Freund i Walpole su razjasnili ovaj metod u svojim radovima. Pretpostavimo da oštećenje puzanjem odgovara Weibull-ovoj raspodeli, sa sledećom funkcijom raspodele [27]:

$$F(t) = 1 - e^{-(t/\alpha)^\beta}, t > 0 \quad (5.4.16)$$

verovatnoća gustine raspodele [27]:

$$f(t) = \frac{\beta t^{\beta-1}}{\alpha^\beta} e^{-(t/\alpha)^\beta}, t > 0 \quad (5.4.17)$$

p-tim procentom [27]:

$$t_p = \alpha \left[ -\ln(1-p) \right]^{1/\beta} \quad (5.4.18)$$

gde su  $\alpha$  i  $\beta$  parametri položaja i oblika Weibull-ove raspodele, respektivno.  $\alpha$  se još naziva i karakterističnim vekom  $t_r$ , i ono je jednako 63.2% slučajne promenljive  $t_r$ . Matematička sredina i varijanca  $t_r$  je [27]:

$$E(t_r) = \alpha \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (5.4.19)$$

$$\text{Var}(t_r) = \alpha^2 \left( \Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \left[ \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \right]^2 \right) \quad (5.4.20)$$

gde je Gama funkcija definisana kao [27]:

$$\Gamma(z) = \int_0^\infty u^{z-1} e^{-u} du, z > 0 \quad (5.4.21)$$

Logaritam karakterističnog veka  $\alpha$  može se smatrati funkcijom temperature i opterećenja u formi prikazanoj u jednačini (5.4.7). Parametar oblika je usvojen za konstantu. Sa  $n$  tačnih podataka o puzanju, možemo konstruisati sledeću funkciju verovatnoće ako osetimo da životni vek oštećenja može slediti Weibull-ovu raspodelu:



$$L(C', C'_1, C'_2, C'_3, \beta) = \prod_{i=1}^n \left\{ \frac{\beta t_{ri}^{\beta-1}}{(\alpha_i(C', C'_1, C'_2, C'_3))^\beta} \times \exp \left( - \left( \frac{t_{ri}}{\alpha_i(C', C'_1, C'_2, C'_3)} \right)^\beta \right) \right\} \quad (5.4.22)$$

gde je:

$$\alpha_i(C', C'_1, C'_2, C'_3) = -C' + \left( \frac{C'}{T_{ci}} + 273.2 \right) + C'_2 \frac{\ln S_i}{(T_{ci} + 273.2)} + C'_3 \frac{(\ln S_i)^2}{(T_{ci} + 273.2)}$$

$T_{ci}$  - temperatura, a  $S_i$  - opterećenje koje odgovara posmatranom životnom veku loma  $t_{ri}$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ). Funkcija verovatnoće u jednačini (5.4.22) je maksimizirana za pronalaženje parametara  $C', C'_1, C'_2, C'_3$  i  $\beta$ . Različite funkcije verovatnoće se mogu konstruisati ako se očekuje da životni vek prati različite raspodele. Onda se ta nova funkcija verovatnoće može maksimizirati za pronalaženje drugog seta procenjenih parametara. Tada raspodela životnog veka daje maksimalnu vrednost funkcije verovatnoće, obezbeđujući najbolje predstavljanje posmatranih podataka o oštećenju usled puzanja. Ova raspodela zajedno sa procenom parametara treba da se koristi za dalju procenu preostalog životnog veka materijala u upotrebi.

Ako se pretpostavi lognormalna raspodela, tada se trebaju koristiti sledeći izrazi:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma t \sqrt{2\pi}} e^{-1/2(\ln t - \mu/\sigma)^2}, \quad t > 0 \quad (5.4.23)$$

$$F(t) = \Phi \left( \frac{\ln t - \mu}{\sigma} \right), \quad t > 0 \quad (5.4.24)$$

gde je:  $\Phi$  - kumulativna raspodela funkcije standardne normalne promenljive,

$\sigma$  - je konstanta, i

$\mu$  - zavisi od temperature i opterećenja.

Aritmetička sredina i varianca veka loma  $t_r$  je:

$$E(t_r) = MTTF = e^{\mu + \sigma^2/2} \quad (5.4.25)$$

$$Var(t_r) = (e^{\sigma^2} - 1) e^{\mu + \sigma^2} \quad (5.4.26)$$

gde MTTF – predstavlja srednje vreme do otkaza. 100% lognormalne raspodele je:

$$t_p = e^{\mu + z_p \sigma} \quad (5.4.27)$$

gde je:  $z_p$  100% standardne normalne promenljive. 50% je  $t_{50} = e^\mu$ .

„Lifereg" procedura u SAS-u [109] se može koristiti za procenu raspodele životnog veka puzanja. Procedura koristi metodu maksimuma verovatnoće da odredi parametre razmatrane statističke raspodele za životni vek oštećenja. Ono može priključiti podacima o otkazima odgovarajuće parametarske modele koji mogu biti levo, desno ili intervalno ograničeni. Modeli koji odgovaraju promenljivoj npr. životni vek puzanja u našem radu, sastoji se od linearnih uticaja nekoliko parametara sa nekoliko kopromenljivih, tj. temperature i opterećenja sa slučajnim perturbacijama parametara.

Raspodela slučajnih perturbacija se može uzeti iz klasifikacije raspodele koja obuhvata ekstremne vrednosti, normalnu i logističku raspodelu, kao i korišćenjem logaritamske, eksponencijalne, Weibull-ove, lognormalne, loglogističke i gama transformacije. Prednost ovog paketa je ta, da se uniformne strukture za procenu ovih različitih mogućih raspodela mogu izvesti u jednom prolazu. Tada se može odabrati raspodela sa najvećom maksimalnom vrednošću funkcije verovatnoće da bude izabrana za model.

Dobivene podatke o ubrzanim ispitivanjima na puzanje od strane proizvođača cevi smo provukli kroz predloženi model. Weibull-ova i lognormalna raspodela su odgovarale za dobivene podatke. Za HP40+Nb legure smo otkrili da lognormalna raspodela bolje odgovara. Izraz ima sledeći oblik:

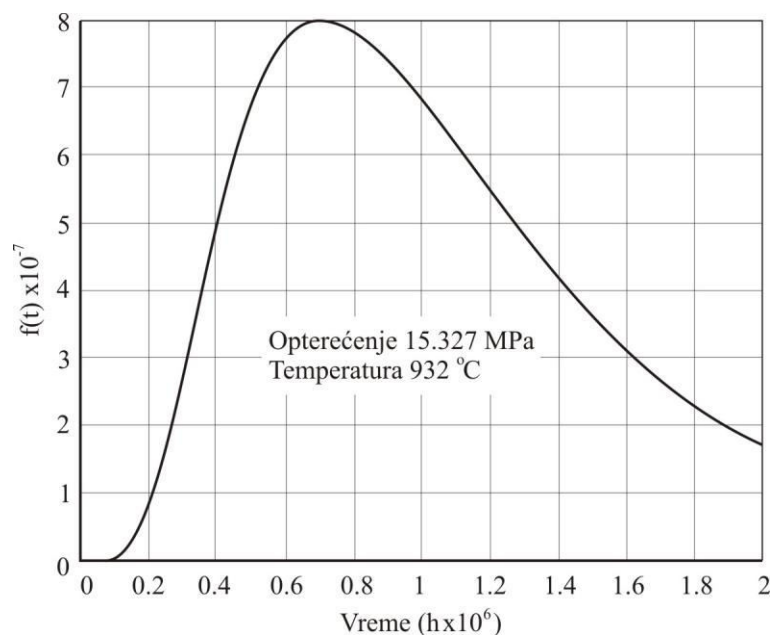
$$\ln t_{50} = -47.5747 + \frac{78979.29}{T_c + 273.2} - \frac{5089.16 \times \ln S}{T_c + 273.2} - \frac{1434.56 \times (\ln S)^2}{T_c + 273.2} \quad (5.4.28)$$

$$LMP' = (T_c + 273.2)(\ln t_{50} + 47.5747) / 1000 = 78.9793 - 5.0892 \times \ln S - 1.4346 \times (\ln S)^2 \quad (5.4.29)$$

Ekvivalentno, kada se koristi obični logaritam, dobijamo:

$$\log t_{50} = -20.6614 + \frac{34300.27}{T_c + 273.2} - \frac{5089.16 \times \log S}{T_c + 273.2} - \frac{3303.21 \times (\log S)^2}{T_c + 273.2} \quad (5.4.31)$$

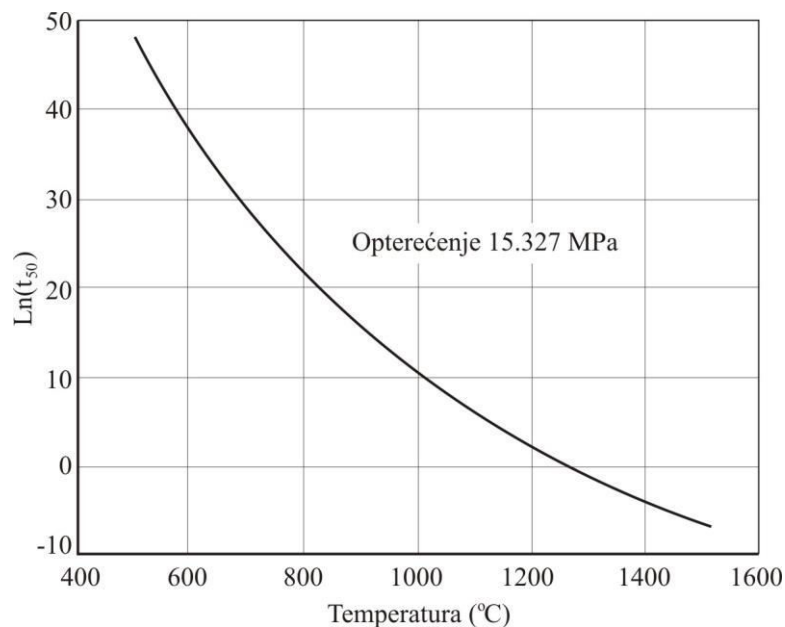
$$LMP = (T_c + 273.2)(\log t_{50} + 20.6614) / 1000 = 34.3003 - 5.0892 \times \log S - 3.3032 \times (\log S)^2 \quad (5.4.32)$$



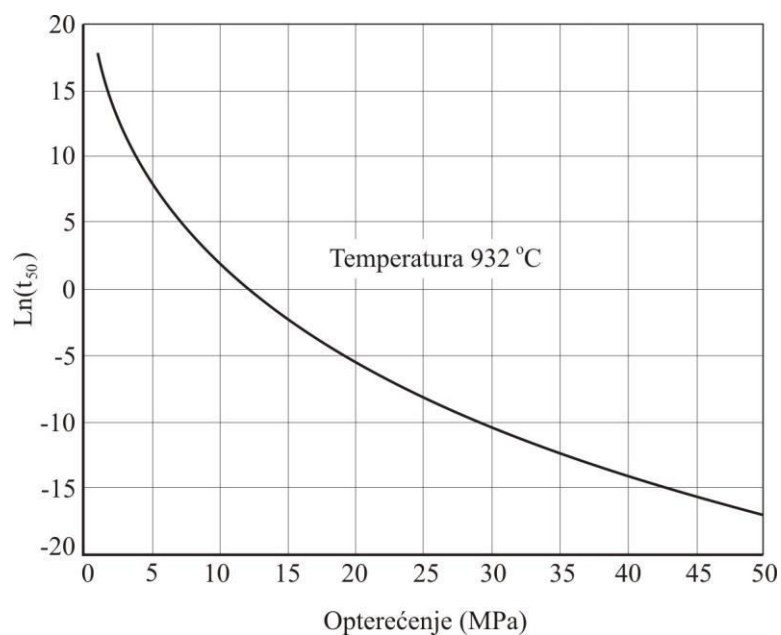
Slika 5.4.3. Funkcija gustine verovatnoće životnog veka

Funkcija gustine verovatnoće životnog veka loma  $t_r$  na temperaturi 932 °C i opterećenju od 15.237 MPa je prikazana na slici 5.4.3. Medijana životnog veka,  $t_{50}$ , u funkciji temperature  $T_c$  za dato opterećenje  $S=15.327$  MPa je prikazana na slici 5.4.4. Medijana životnog veka  $t_{50}$  u funkciji od opterećenja  $S$  za datu  $T_c=932$  °C je predstavljena na slici 5.4.5. Procenti životnog veka loma dobiveni iz predloženog modela u ovom radu pod minimalnim opterećenjem loma za datu temperaturu su

poređeni sa životnim vekom loma nakon 100.000h datih od strane proizvođača (tabela 5.4.1). Izračunati 2.5% životni vek do pojave loma je oko 62.000h, oko 62% životnog veka do pojave loma je specificirano od proizvođača za temperaturu 930 °C i opterećenje od 20.056 MPa.



Slika 5.4.4. Odnos između medijane životnog veka i temperature



Slika 5.4.5. Odnos između medijane životnog veka i opterećenja

Tabela 5.4.1. Komparacija procenjenog životnog veka od strane proizvođača i predloženog modela

Temperatura °C	Opterećenje MPa	Životni vek dat od strane proizvođača	Predloženi model		
			2.5 %	5 %	10 %
900	24.531	100.000	67.337	81.033	100.306
910	23.015	100.000	65.412	77.875	96.397
920	21.519	100.000	63.107	75.943	94.005
930	20.057	100.000	62.212	75.466	92.672
940	18.636	100.000	61.875	74.460	92.170
950	17.258	100.000	62.100	75.432	92.506
960	15.934	100.000	62.580	75.309	93.220
970	14.665	100.000	63.292	76.165	94.280
980	13.458	100.000	64.026	77.049	95.375
990	12.307	100.000	65.413	78.116	96.695
1000	11.225	100.000	65.494	78.816	97.562
1010	10.197	100.000	66.075	79.515	98.426
1020	9.239	100.000	66.120	79.569	98.493
1030	8.343	100.000	65.707	79.072	97.878
1040	7.515	100.000	64.458	77.569	96.018
1050	6.743	100.000	62.715	75.471	93.421
1060	6.033	100.000	60.124	72.353	89.562
1070	5.378	100.000	56.842	68.404	84.673
1080	5.485	100.000	52.595	63.293	78.347
1090	4.240	100.000	47.862	57.597	71.296
1100	3.744	100.000	42.683	51.364	63.581
1110	3.296	100.000	37.158	45.416	55.352
1120	2.896	100.000	31.455	37.853	46.856
1130	2.530	100.000	26.020	31.312	38.760

Za set podataka o ispitivanju životnog veka za 35 % C niskolegiranu Si leguru otkrili smo da životni vek sledi Weibull-ovu raspodelu. Dobiveni model sumarizovan je u sledećim izrazima:

$$\beta = 8.1057$$

$$\ln t_{63.2} = -44.9136 + \frac{7320.99}{T_c + 273.2} - \frac{830.81 \times \ln S}{T_c + 273.2} - \frac{2395.7 \times (\ln S)^2}{T_c + 273.2} \quad (5.4.33)$$

$$LMP' = (T_c + 273.2)(\ln t_{63.2} + 44.9136) / 1000 = 73.2310 - 0.8308 \ln S - 2.3957 \times (\ln S)^2 \quad (5.4.34)$$

Ekvivalentno, kada se koristi obični logaritam, model izgleda:

$$\ln T_{63.2} = -19.5057 + \frac{31803.81}{T_c + 273.2} - \frac{830.81 \times \log S}{T_c + 273.2} - \frac{5516.30 \times (\log S)^2}{T_c + 273.2} \quad (5.4.35)$$

$$LMP' = (T_c + 273.2)(\log t_{63.2} + 19.5057) / 1000 = 31.8083 - 0.8308 \log S - 5.5163 \times (\log S)^2 \quad (5.4.36)$$

U ovom poglavlju je opisan način za procenu zakona verovatnoće životnog veka cevi. U većini literature iz ove predmetne oblasti ne diskutuje se mnogo o pretpostavkama od kojih se pošlo. Međutim, to je potrebno uraditi jel se dešava da se polazi od pogrešnih pretpostavki po pitanju raspodela verovatnoće. Sa elementima obrađenim u ovom radu može se biti u mogućnosti da se iznađe odgovarajuća statistička raspodela za životni vek sa položajem parametara životnog veka predstavljenih u funkciji od opterećenja i temperature.

# Š e s t i d e o

## REZULTATI ISTRAŽIVANJA

### 6.1 Sopstveni rezultati istraživanja

Radijacione cevne zmijske imaju ograničen životni vek a otkazi su prouzrokovani mnoštvom faktora, od kojih su mnogi povezani sa radom peći. Međutim svaka fabrika ima specifične uslove rada i svojstvenu filozofiju rukovanja. Zbog toga svaka fabrika ima i tipične uzroke za otkaze radjacionih zmijske što je od značaja za operatere u cilju analize i razumevanja tipičnog mehanizma otkazivanja. Do oštećenja cevi najčešće dolazi usled:

- formiranja koksa,
- gubitka elastičnosti,
- termičkog zamora,
- krtog loma,
- erozije,
- pregrevanja,
- ljudskog faktora
- puzanja,
- cementacije,
- oksidacije,
- nitracije, i
- dehromizacije.

**Razvoj standarda** u različitim državama se kretao u sličnim smerovima i u mnogim slučajevima metodologija je pozajmljena iz prethodno raspoloživih standarda drugih zemalja. Rani pokušaji procene preostalog životnog veka delova izloženih uticaju visoke temperature poseduju metodologiju koja se zasniva na pravilniku bez otkaza. Na primer, ASME N-47 [11] i Francuski RCC-MR [99], koje imaju mnogo sličnosti, zasnovane su na proceni životnog veka neoštećenih struktura. Daleko savremenije metode izvode procenu preostalog životnog veka uz prisustvo oštećenja. Na primer, Nemački pristup na osnovu osnovnih prosečnih šupljina (FBH) razmatra otkrivanje prskotina i karakterisanje, a Nemački dvokriterijumski metod [33, 34] odnosi se na stvaranje prskotina kao značajan faktor za procenu životnog veka i ne odnosi se na režime širenja prskotina. Naprednije tehnike odnose se na oštećenja izazvana interakcijom puzanja i puzanje/zamor u smislu inicijalizacije i rasta oštećenja, a to su: Britanski R5 [4], BS-7910 [18] i Francuski A16 [29, 43] koji imaju jasne sličnosti u pogledu metodologije.

**Tokom istraživanja** izvršili smo poređenje rezultata procene preostalog životnog veka dobivene različitim metodama. Za iste polazne parametre dobili smo različite rezultate. Preostali životni vek i rezultati oštećenja dobiveni različitim metodama su sumarizovani u tabeli 4.4.8.

Tabela 4.4.8. Preostali životni vek i rezultati kumulativnog oštećenja dobiveni različitim metodama

Radni ciklus		Rad u prošlosti		Rad u preopterećenju		Plan za dalji rad	
		(m=1)		(m=2)		(m=3)	
Podciklus		n=1	n=2	n=1	n=2	n=1	n=2
Vreme u radu - $L_{\text{hour}}$	h	65.700	65.700	168	168	21.900	21.900
Projektovani pritisak - $P_{\text{avg}}$	bar	14	14	14	14	14	14
Projektovana temperatura - $T_{\text{avg}}$	°C	601.7	601.7	660	660	601.7	601.7
Faktor korozije un.prečnika - $Cr_{\text{id}}$ 0.0254 mm/god.		5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
Spoljni prečnik - početni - $Do_b$	mm	219.07	219.07	219.07	219.07	219.07	219.07
Spoljni prečnik - krajnji - $Do_e$	mm	219.07	219.07	219.07	219.07	219.07	219.07
Unutrašnji prečnik - poč.- $Di_b$	mm	202.72	204.62	206.53	206.53	206.53	207.16
Unutrašnji prečnik - kraj.- $Di_e$	mm	204.62	206.53	206.53	206.53	207.16	207.80
Debljina zida cevi - poč.- $t_b$	mm	8.178	7.239	6.274	6.274	6.274	5.943
Debljina zida cevi - kraj.- $t_e$	mm	7.239	6.274	6.274	6.274	5.943	5.639
Spoljni prečnik - pros.- $Do_{\text{avg}}$	mm	219.07	219.07	219.07	219.07	219.07	219.07
Unutrašnji prečnik - pros.- $Di_{\text{avg}}$	mm	203.68	205.59	206.53	206.53	206.86	207.49
Debljina zida cevi - pros.- $t_{\text{avg}}$	mm	7.696	6.756	6.274	6.274	6.121	5.791
<b>Omega metod</b>							
Glavno opterećenje 1 - $\sigma_1$	bar	198.64	227.73	245.59	245.73	252.35	266.55
Glavno opterećenje 2 - $\sigma_2$	bar	99.35	113.83	122.79	122.86	126.17	133.27
Glavno opterećenje 3 - $\sigma_3$	bar	0	0	0	0	0	0
Efektivno opterećenje - $\sigma_e$	bar	172.02	197.19	212.70	212.77	218.49	230.84
$\Omega$ Vreme do pojave oštećenja - $L\Omega$	h	879.235	633.665	13.839	13.825	482.208	412.347
$\Omega$ Iskorišćeni životni vek - $L/L\Omega$		0.075	0.104	0.012	0.012	0.045	0.053
Kumulativno oštećenje - $\Sigma(L/L\Omega)$		0.075	0.178	0.191	0.203	0.248	0.301
<b>LMP uz primenu Huddelston-ovog uniaksijalnog opterećenja</b>							
$J_1=(\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3)$	bar	297.99	341.56	368.38	368.52	378.52	399.82
$S_s=(\sigma_1^2+\sigma_2^2+\sigma_3^2)^{0.5}$	bar	222.14	254.62	274.61	274.68	282.13	297.99
Huddelston-ovo uniaks. opt.- $S_{\text{EFF}}$	bar	186.77	214.08	230.90	230.97	237.17	250.55
Minimalni LMP za $S_{\text{EFF}}$		40.721	40.350	40.122	40.120	40.036	39.858
Vreme do pojave oštećenja - $L_{\text{EFF}}$	h	715.601	416.094	7.620	7.607	263.013	202.581
Iskorišćeni životni vek - $L/L_{\text{EFF}}$		0.092	0.158	0.022	0.022	0.083	0.108
Kumulativno oštećenje - $\Sigma(L/L_{\text{EFF}})$		0.092	0.250	0.272	0.294	0.377	0.485
Prosečni LMP za $S_{\text{EFF}}$		41.263	40.965	40.780	40.779	40.710	40.562
Vreme do pojave oštećenja - $L_{\text{EFF}}$	h	1.579.314	1.022.363	18.775	18.748	703.860	567.314
Iskorišćeni životni vek - $L/L_{\text{EFF}}$		0.042	0.064	0.009	0.009	0.031	0.039
Kumulativno oštećenje - $\Sigma(L/L_{\text{EFF}})$		0.042	0.106	0.115	0.124	0.155	0.193
<b>API RP 530</b>							
Opt. na srednjem prečniku - $\sigma_{\text{mean}}$	psi	198.63	227.73	245.59	245.72	252.34	266.55
Minimalni LMP za $\sigma_{\text{mean}}$		40.560	40.164	39.924	39.923	39.835	39.649
Vreme do pojave oštećenja - $L_{530}$	h	565.463	317.115	5.810	5.800	195.805	149.182
Iskorišćeni životni vek - $L/L_{530}$		0.116	0.207	0.029	0.029	0.112	0.147
Kumulativno oštećenje - $\Sigma(L/L_{530})$		0.116	0.323	0.352	0.381	0.493	0.640
Prosečni LMP za $\sigma_{\text{mean}}$		41.134	40.814	40.617	40.616	40.534	40.387
Vreme do pojave oštećenja - $L_{530}$	h	1.308.211	820.247	15.023	15.000	551.484	439.088
Iskorišćeni životni vek - $L/L_{530}$		0.050	0.080	0.011	0.011	0.040	0.050
Kumulativno oštećenje - $\Sigma(L/L_{530})$		0.050	0.130	0.142	0.153	0.192	0.242

U **petom poglavlju** četvrtog dela smo pokazali primenu postupka na materijale koji nisu obuhvaćeni standardom API 581. Cevi peći koje se razmatraju u ovom radu su projektovane prema API 530 standardu ali su cevi od materijala (HK40 i HP) koji se ne razmatraju u standardu API 581, tako da odatle i polazi poteškoća primene na naše cevi.

API 581 je uprošćeni metod za RBI analizu peći. Dokument je veoma koristan ali ipak ima neke nedostatke. Dobre strane su:

- set predefinisanih dimenzija otvora koji se koristi za analizu verovatnoće,
- model konsekvenci za zapaljive, toksične, ekološke i poslovno loše događaje, koji obuhvata:
  - o jednostavni metod za modelovanje emisije,
  - o pristup za modelovanje smeša koje ističu,
  - o jednostavne procedure za određivanje količine fluida koja je isticala u okolinu tokom neželjenog događaja,
  - o metod za određivanje pogođene oblasti prilikom isticanja,
  - o standardizovano stablo događaja,
  - o stvaranje uprošćene metodologije za procenu efektivnosti različitih tipova sistema sanacije,
  - o obezbeđenje jednostavnih uputstava za određivanje zaliha,
- primena matrice rizika koja obuhvata konsekvence i verovatnoću radi procene rizika.

Takođe postoje poteškoće oko saznanja koje implikacije RBI su za preglede. U našem primeru, glavni rezultat je da rizik oštećenja važi (određen TMSF – podfaktor tehničkog modula treba da bude manji od 10) za veoma dug period, tako da se inspekcije zahtevaju svakih 20 godina. Pošto projektovani životni vek važi 20 godina, ispada da po ovom standardu cevi nikad ne bi trebalo pregledati. Ovako dobijen rezultat izgleda veoma optimistično, ali se ipak ne može primeniti za cevi peći koje rade u režimu puzanja.

Rizik u API 581 se koristi za preporuku frekvenci pregleda na osnovu konsekvenci i verovatnoće. API RBI uvodi intervale pregleda na osnovu TMSF ili analize verovatnoće. Glavni faktor za određivanje TMSF-a je sredina Larson-Millerovog parametra, koji se ne može tačno odrediti na osnovu podataka od proizvođača.

U izrazima za određivanje TMSF-a za dugoročno puzanje jedini faktor koji se menja tokom vremena jeste vreme u radu koje se koristi za utvrđivanje vremena do naredne inspekcije. Za slučaj u našem radu za 100 godina TMSF je aproksimativno konstantno i manje je od 1. Kao rezultat za cevi peći sa srednjim rizikom krajnje efektivan period pregleda je na svakih 20 godina. Ovo je veoma dug period i veoma je atraktivan za rukovaoce. Međutim, nameće se pitanje: šta se u stvari predlaže ?

Krajnje efektivan predloženi pregled u API 581 se definiše kao UZ merenje debljine svih cevi i povezivanje mernih mesta UZ i FMR na različitim mestima. Možemo sumirati da:

- FMR nije definisana u API 581. FMR se koristi u radu Valbuena i dr. [11] za prosečno polje metalografskih ponavljanja. Ovo je metod za otkrivanje oštećenja puzanjem, ali je takođe po nekim autorima i krajnje nepouzdan osim ako se ne koristi često (najmanje jednom godišnje, i ako postoji originalni uzorak bez oštećenja puzanjem.



- UZ merenjem se obično ne meri oštećenje puzanjem, nego se nameće pitanje šta se tu stvarno ispituje ?
- Povezivanje nije obuhvaćeno ovim standardom, ali ako to znači primenu mehaničkog povezivanja; svrha i dugoročni opstanak takvih veza nije jasan,
- Predloženi pregledi ne obuhvataju merenje prečnika, merenje oksidnih naslaga ili merenje prskotina koje su inače značajne za otkrivanje problema povezanih sa puzanjem.

Po razmatranju ovih detalja nije nam jasno na koji način režimi pregleda daju efektivan odgovor na različite kategorije rizika, pogotovo na one u H oblasti. Jasno je da postoji potreba za nekim promenama da li u radu operatera, ili u procesu, ako se utvrdi da postoji određeni rizik.

**Prvo poglavlje empirijskih istraživanja** obrađuje interakcije između oštećenja cevi puzanjem i zamorom koje je izuzetno važno prilikom projektovanja i eksploatacije etilenskih peći.

U etilenskim pećima, endotermna reakcija stvara veliku temperaturnu razliku između unutrašnjeg i spoljašnjeg zida cevi, tako da su cevi konsekvntno izložene ciklusima termalno indukovanih izduženja koje su rezultat ciklusa pokretanja i zaustavljanja, kao i podešavanja parametara tokom rada.

Generalno se verovalo da kada se neelastične deformacije kao što je puzanje (relaksacija) dodaju ponovljenim elastičnim deformacijama, usled čega nastaju oštećenja zbog zamora materijala. Životni vek usled zamora postaje kraći, nego u slučajevima kada nema neelastičnih deformacija.

U ovom delu rada je zbog toga napravljen pokušaj da se razjasne karakteristike loma usled puzanja legure HK40 kao i njene karakteristike interakcije puzanje-zamor s aspekta raznih opterećenja talasnog oblika, čime bi se doprinelo kriterijumima za projektovanje cevi etilenskih peći koje su izložene ovakvim oblicima oštećenja.

Slično rezultatima ispitivanja oštećenja usled puzanja, i rezultati ispitivanja interakcije puzanje-zamor pokazuju da je na višim temperaturama ispitivanja kraći životni vek (broj ciklusa do oštećenja). Pod takvim uslovima ispitivanja zapaženo je da se broj ciklusa do pojave oštećenja postepeno smanjuje po sledećem redosledu: pp talasi, cc talasi, pc talasi, i cp talasi, dok se u slučaju primene trapezoidnih talasa ono drastično smanjuje.

Broj ciklusa do pojave otkaza se definiše kao broj ciklusa kada maksimalno opterećenje zatezanja dostigne 25% maksimalne vrednosti dobivene pod stabilnim uslovima [24].

*Slučaj opterećenja u obliku pp talasa.* Prskotine su nastale transgranularno, pravolinijski od površine epruvete. Postojanje brazda i definitivne početne tačke prskotine predstavlja karakteristiku zamora.

*Slučaj opterećenja u obliku cc talasa.* Prskotina se javlja na površini i proteže se na relativno pravolinijski način. Ipak nije očigledna na površini loma, postoje brazde. Velika količina oksidacije na površini loma se objašnjava time da prskotina potiče sa površine epruvete. Takođe, otkrivene su i dendritske granice u delu loma.

*Slučaj opterećenja u obliku pc talasa.* Kod opterećenja tipa pp talasa i cc talasa prskotine nastaju na površini epruvete, uz evidentne brazde i granice dendrita na površini loma. Takođe, površina loma je veoma oksidovana. Kao i u slučaju cc talasa, smatra se da je zbog toga što prskotina polazi sa površine epruvete. Dalje, smatra se da relaksacija opterećenja nastaje tokom rasterećenja na malom stepenu izduženja koje

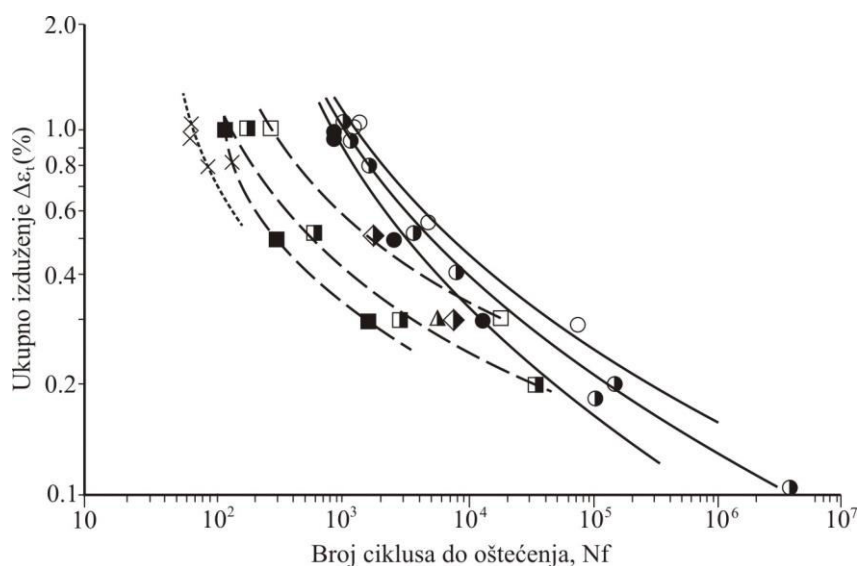
prati izduženje velikog stepena opterećenja. Ovo povećava prosečno opterećenje na strani zatezanja, tako da uzrokuje širenje prskotine, koje prilikom širenja doprinosi širenju oksidacije unutar prskotine.

*Slučaj opterećenja u obliku cp talasa.* Postoje širom rasprostranjene brazde koje karakterišu lom usled zamora. Duž granica dendrita stoje površine loma. Takođe, primećeno je širenje prskotina od spolja ka unutra i iznutra napolje, što predstavlja karakteristiku oštećenja usled puzanja.

*Slučaj trapezoidnog oblika opterećenja.* Sve prskotine su nastale duž granica dendrita, a brazde su takoreći nevidljive. Na površini epruvete postoje brojne prskotine koje se spajaju, i prodiru u dubinu.

Iz prethodno navedenih zapažanja, prskotine duž dendritskih granica nisu evidentne kod pp talasa, dok se mogu naći kod cc, pc, cp i trapezoidnih talasa opterećenja. Prskotine koje se javljaju iz unutrašnjosti uzorka su nastale kod cc i trapezoidnih talasa opterećenja.

Zbog toga, razmatrajući prethodna zapažanja o konfiguraciji prskotina u konjukciji sa rezultatima van onih prikazanih na slici 5.1.2, postaje jasno da prskotine duž dendritskih granica kao i prskotine koje se javljaju unutar uzorka a koje karakterišu oštećenje usled puzanja, uzrokuju smanjenje životnog veka tokom ispitivanja interakcije puzanje-zamor.



Temperatura	Troughaoni talasi				Trapezoidni talasi
	pp	cp	pc	cc	
800 °C	○	□			
900 °C	◐	◑	▲	◆	×
1000 °C	●	■			

Slika 5.1.2. Rezultati ispitivanja interakcije puzanje – zamor pomoću različitih formi opterećenja na određenim temperaturama

Došli smo do sledećih zaključaka:

1. Kada se rezultati ispitivanja pp talasima uporede sa rezultatima ispitivanja cc, pc i cp talasima, primećuje se da broj ciklusa do oštećenja postepeno postaje sve manji po sledećem redosledu pp, cc, pc i cp talasa. Međutim, redukcija životnog veka je najevidentnija u slučaju trapezoidnih talasa sa vremenom zadržavanja na tenzionoj strani.
2. Životni vek postaje kraći kako lom poprima sve veću karakteristiku puzanja, tj. prskotina se širi duž dendritskih granica.
3. Odnos  $\Delta \varepsilon_{ij} - N_{ij}$  je izveden i koristan je u proceni oštećenja primenom SRP metoda.
4. Kriterijum oštećenja izazvan interakcijom puzanje – zamor se zasniva na LFR metodi a koja je izvedena iz sledećih izraza:

$$\phi_c + 5.67\phi_f = 1: \phi_c \geq 0.15$$

$$5.67\phi_c + \phi_f = 1: \phi_c < 0.15$$

5. LFR je primenljiv u proceni životnog veka usled interakcije puzanje – zamor kada se materijal izlaže cikličnom modelu opterećenja sa periodima zadržske tenzije na povišenim temperaturama, zbog toga što se uticaj puzanja tokom perioda zadržske može dobro modelovati takvom procenom.

**U drugom poglavlju empirijskih** istraživanja ispitivane su cevi koje su bile u radu oko 5 godina a nakon remonta i puštanja u rad peći došlo je do poprečnog loma cevi i to pri 350 °C (uzorak br.1). Radi poređenja analizirana je cev iz druge peći kod koje nije došlo do loma (uzorak br.2). Uzorci su izvađeni iz dela gde su vidljiva oštećenja strujanjem, tako da su analizirana sledeća mesta:

- s unutrašnje strane,
- s spoljašnje strane,
- uz površinu loma, i
- iz sredine preseka uzorka.

Ispitivani materijal je kroz zid cevi imao formirane tri izražene zone sa različitom mikrostrukturom: zona ispod unutrašnje i spoljne površine, i između njih. Usled toga što se cevi greju sa spoljne strane brenerima, spoljna površina materijala je izložena oksidišućoj sredini, dok je unutrašnja površina u kontaktu sa oksidirajućom / cementirajućom sredinom zbog smeše ugljovodonika i pare koja prolazi kroz njih na visokoj temperaturi.

Po celom preseku cevi uzorka br.1 primećena su radijalna naprsnuća koja se protežu od unutrašnje površine. Mikro-izgled loma ukazuje na krhki karakter. Merenjima debljine zida cevi oko mesta loma ustanovljeno je stanjenje od 20% u odnosu na početnu deklarisanu debljinu. Na unutrašnjoj površini cevi mestimično se uočavaju naslage kokska i oksida kao i tragovi puzanja materijala. Ispod oksidnih naslaga nastalih na unutrašnjoj površini uzorka 2 zapažena je osiromašena zona karbida debljine 200 μm. Na unutrašnjoj površini došlo je do pojave magnetičnosti što ukazuje na promene u austenitnoj strukturi.

Ispitivanjem mehaničkih karakteristika materijala cevi (prema ASTM A370) došlo se do sledećih rezultata:

- uzorak br.1:  $R_m = 300 \text{ N/mm}^2$ ;  $A(2'') = 0.35 \%$
- uzorak br.2:  $R_m = 420 \text{ N/mm}^2$ ;  $A(2'') = 2.2 \%$  (pri 20 °C)
- nov materijal:  $R_m = 440 \text{ N/mm}^2$ ;  $R_{p0.2} = 240 \text{ N/mm}^2$ ,  $A_5 = 10 \%$  (pri 20 °C)

Ovi rezultati pokazuju da je kod oba uzorka došlo do bitnog sniženja istegljivosti materijala, odnosno da je povećana verovatnoća ka pojavi krtog loma. Kod uzorka br.1 je u odnosu na početno stanje značajno smanjena čvrstoća.

Kod uzorka br.1 došlo je do porasta tvrdoće na unutrašnjoj površini (264 HV10), u odnosu na tvrdoću spoljne površine (212 HV10), što nije bio slučaj kod uzorka br.2. Ovo takođe ukazuje na promene u mikrostrukturi materijala uzorka br.1 (s unutrašnje strane cevi).

Zapaženo je da  $M_{23}C_6$  eutektički karbidi novog materijala jako ukрупnjavaju u oba uzorka usled prodora ugljenika tokom eksploatacije na visokim temperaturama, dok se hrom istiskuje kao rezultat oksidacije površine cevi, ili ekvivalentno na površinu prskotine. Logično je pretpostaviti da se oksidacija na površini materijala i asimilacija / ukрупnjavanje zrna  $M_{23}C_6$  eutektičkog karbida novog materijala dešava više ili manje istovremeno između lokalizovanih oštećenja i izlečenja ovih naslaga, mada na daleko manjim brzinama koje mogu imati ako nisu prisutne kontinualno unutrašnje Cr i Si naslage. Međutim u sledećoj fazi karbidi odmah ispod površine se rastvaraju da bi popunili prazninu nastalu odlaskom hroma iz matrice usled oksidacije na površini, tako da ovo dovodi do karbidom osiromašenih zona u podpovršinskom sloju.

Kolena su savijena pod uglom od 180° pa tako predstavljaju mesta nepovoljnih uslova strujanja, povećana je opasnost od taloženja koksa i otežano dekoksovanje. Analizirana su dva kolena jedno je bilo u radu 5 godina (uzorak 3), a drugo 8 godina (uzorak 4). Na oba kolena primećena je magnetičnost s unutrašnje strane, koja se postupno smanjuje prema spoljnoj površini. Pojava magnetičnosti na unutrašnjoj površini cevi je povezana s pojavom ferita i oksida. Poznato je da na promene u austenitnoj strukturi utiču legirajući elementi, najviše Cr i Si kao i odnos Cr/Ni.

Kod oba kolena su vidljive pukotine mrežastog oblika s unutrašnje strane kao i propagacija pukotina po poprečnom preseku (sl.5.2.8). Mestimično su pukotine proširene po celom preseku. Na spoljnim površinama nije bilo vidljivih mehaničkih oštećenja.

Na slici 5.2.9 zapaža se oksidni sloj koji prodire prema unutrašnjosti uz granice zrna. Takođe, zapaža se znatno izdvajanje sekundarnih karbida unutar zrna. U samom rubnom sloju došlo je do manjeg izdvajanja karbida, koje postaje snažnije kako se ide dalje od ruba.

Na slici 5.2.10 vidi se razugljeničeni sloj uz sam rub uzorka. Zatim dolazi sloj pravilno raspoređenih karbida unutar austenitnih zrna, kao i izdvojenih karbida po granicama zrna. Do izražaja dolazi sloj oksida koji prodire u unutrašnjost i to po granicama zrna.

Inače sopstvena istraživanja mikrostrukturnih promena su dala rezultate i zaključke koji se u potpunosti poklapaju s već navedenim u literaturi, a na ispitivanim delovima iz sličnih postrojenja.

**U trećem poglavlju empirijskih istraživanja**, zasnovanom na početnim vrednostima problema puzanja cilindra tankog zida [17] i stohastičkoj teoriji [27] predložen je integralni stohastički model oštećenja. Primenom stohastičkog modela

dobivena je promenljivost oštećenja cevi puzanjem koja će poslužiti kao efektivan metod za pouzdanu procenu oštećenja cevi peći.

U određivanju oštećenja figuriše mnoštvo parametara. Uključene su konstante materijala, kao što je modul elastičnosti  $E$ , Poissonov odnos  $\mu$ , koeficijent termičkog širenja  $\alpha$ , konstante puzanja i oštećenja kao što su  $A$ ,  $n$ ,  $H$ ,  $q$  itd., i radni parametri kao što su temperatura i pritisak. Svi ovi parametri se mogu smatrati slučajnim varijablama. Koeficijenti varijacije ovih varijabli su od 0.05÷0.1.

Rezultati pristupa preko Monte Carlo simulacije u kojem broj pokušaja iznosi 1000, kao i rezultati predloženog stohastičkog rešenja određivanja oštećenja usled puzanja predstavljeni su u tabeli 5.3.1.

Tabela 5.3.1. Komparacija dobivenih rezultata metodom Monte Carlo i predloženim stohastičkim modelom oštećenja ( $t = 44.100$  h,  $D = 7.234 \times 10^{-2}$ )

STOHAŠTIČKA VARIJABLA	STOHAŠTIČKI MODEL		METODA MONTE CARLO		GREŠKA	
	$D$	$\frac{\partial D}{\partial X_i}$	$D'$	$\frac{\partial D'}{\partial X_i}$	$\frac{\partial D'}{\partial X_i}$	$\left( \frac{\frac{\partial D'}{\partial X_i} - \frac{\partial D}{\partial X_i}}{\frac{\partial D}{\partial X_i}} \right) [\%]$
E	$7.234 \times 10^{-2}$	$-4.568 \times 10^{-2}$	$7.218 \times 10^{-2}$	$-4.377 \times 10^{-2}$	-0.22	-4.18
$\mu$	$7.234 \times 10^{-2}$	$-8.819 \times 10^{-2}$	$7.218 \times 10^{-2}$	$-8.767 \times 10^{-2}$	-0.22	-0.59
$\alpha$	$7.234 \times 10^{-2}$	$9.046 \times 10^2$	$7.235 \times 10^{-2}$	$8.713 \times 10^2$	0.01	-3.68
P	$7.234 \times 10^{-2}$	$1.216 \times 10^{-2}$	$7.235 \times 10^{-2}$	$1.195 \times 10^{-2}$	0.01	-1.73
A	$7.234 \times 10^{-2}$	$-1.687 \times 10^{14}$	$7.595 \times 10^{-2}$	$-1.570 \times 10^{14}$	4.49	-6.94
N	$7.234 \times 10^{-2}$	$-1.913 \times 10^{-1}$	$7.410 \times 10^{-2}$	$-1.888 \times 10^{-1}$	2.43	-1.31
H	$7.234 \times 10^{-2}$	$2.264 \times 10^{10}$	$7.485 \times 10^{-2}$	$2.254 \times 10^{10}$	3.47	-0.44
Q	$7.234 \times 10^{-2}$	$2.507 \times 10$	$7.279 \times 10^{-2}$	$2.463 \times 10$	0.62	-1.76
$T_0$	$7.234 \times 10^{-2}$	$4.372 \times 10^{-4}$	$7.305 \times 10^{-2}$	$4.466 \times 10^{-4}$	0.98	2.15

Iz table 5.3.1 se može zaključiti da su rezultati dva metoda približni. Greška u vrednosti oštećenja  $D$  između dva rezultata je u opsegu od  $-0.22$  do  $4.49$  %, dok je greška parcijalne derivacije  $\partial D / \partial X_i$  u granicama između  $-6.94$  i  $2.15$  %. Ove greške su veoma male. Komparacija rezultata dobivenih Monte Carlo metodom i stohastičkog modela za određivanje oštećenja usled puzanja demonstrirala je visoku tačnost stohastičkog modela za određivanje oštećenja usled puzanja.

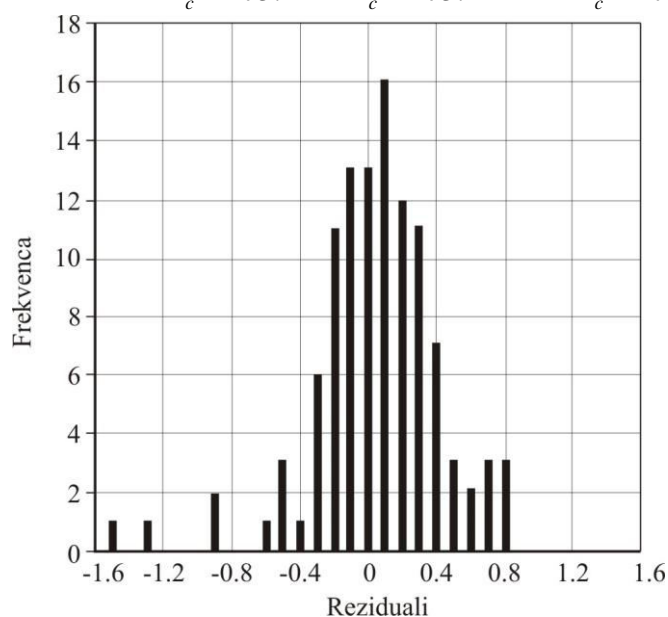
**Četvrto poglavlje empirijskih istraživanja** ispituje primenljivost Larson - Miller-ovog parametra na procenu zakona raspodele životnog veka u funkciji od temperature i opterećenja. Najčešće korišćena metoda linearne regresije najmanjeg kvadrata polazi od pretpostavke da raspodela životnog veka cevi oštećene puzanjem odgovara lognormalnoj raspodeli. U većini literature se ne razmatra validnost ove pretpostavke. U ovom delu smo predstavili procedure za validaciju dve kritične pretpostavke za slučajeve u kojima se primenjuje metoda najmanjeg kvadrata. Metoda maksimalne verovatnoće je predložena kao alternativa i kao daleko jača metoda za predstavljanje raspodele životnog veka cevi etilenskih peći oštećenih puzanjem.

Dobivene podatke o ubrzanim ispitivanjima na puzanje od strane proizvođača cevi smo provukli kroz predloženi model.

Za set podataka o ispitivanju životnog veka za 35% C niskolegiranu Si leguru otkrili smo da životni vek sledi Weibull-ovu raspodelu.

U nastojanjima da se proveri pretpostavka o valjanosti lognormalne raspodele za modelovanje životnog veka usled oštećenja puzanjem nacrtan je histogram ostataka između logaritma predviđenog životnog veka primenom jednačine (5.4.15) i logaritma podataka o životnom veku koji smo imali (sl.5.4.2). Ako je pretpostavka dobra, histogram treba da bude simetričan, da ima oblik zvona. Međutim, sa slike 5.4.2 se vidi da histogram nije simetričan, nego je više asimetričan na levo. Ovime se druga pretpostavka opovrgava, tako da je pridruženi model u jednačini (5.4.15) nezadovoljavajući.

$$\ln t_{50} = -40.7534 + \frac{67844.79}{T_c + 273.2} - \frac{3376.28 \times \ln S}{T_c + 273.2} - \frac{1441.72 \times (\ln S)^2}{T_c + 273.2} \quad (5.4.15)$$



Slika 5.4.2. Histogram reziduala predloženog modela

## 6.2 Vrednovanje rezultata istraživanja za nauku i praktičnu primenu

Doktorska disertacija predstavlja značajan doprinos, može se slobodno reći i veliki poduhvat kod nas, jedne nedovoljno istražene oblasti. Istraživanja sprovedena u okviru bivših granica SFRJ a koja delom dotiču i temu doktorata u smislu mehanizma oštećenja i mikrostrukturnih promena nastalih kod cevi pirolitičkih peći bila su izvedena u SR Hrvatskoj 1989, 1994 i 1997. godine od strane Dr Filetin Tomislava (redovni profesor na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu) i saradnika Kovačićek F. i Lisjak D., dok je istraživanje novijeg datuma sprovedeno 2010. godine u federaciji BIH od strane Mr Milana Plavšića. Doktorska disertacija sa temom

Dijagnostika oštećenja i procena životnog veka cevi etilenskih peći predstavlja doprinos za aktivno uključnje i održavanje koraka sa svetom u preventivnom, redovnom i havarijskom održavanju kompleksnih, industrijskih sistema, prevenciji neželjenih havarija, svakodnevnom održavanju i planiranju radova u remontu, kreiranju i razvoju održavanja i smanjenja ukupnih troškova održavanja velikih sistema koji mogu da budu znatni, pa samim tim zahtevaju značajno angažovanje stručnjaka i materijalnih sredstava. Istraživanja rađena u okviru ove doktorske disertacije pokazala su da li je naša zemlja sa svojim kapacitetima (kadrovskim i materijalnim), sposobna da se uključi u svetske projekte, koji se bave eksperimentalnim istraživanjima određivanja mehanizama oštećenja i procene životnog veka.

Istraživanja, u okviru disertacije značajno, doprinose naučnom sagledavanju problematike održavanja tehničkih sistema i upoznavanju sa problemima koji nastaju pri eksploataciji pirolitičkih peći, čime se omogućava rano predviđanje mogućih problema i njihovo otklanjanje.

Metodologija istraživanja, pregled opreme i detaljan opis postrojenja i uređaja, korišćenih u eksperimentalnom radu u laboratoriji i u realnim eksploatacionim uslovima, koji su prezentovani u ovoj doktorskoj disertaciji, korisna su literatura za buduća istraživanja u ovoj oblasti, pogotovo za mlađe istraživače i stručnjake. Primenom tehničke dijagnostike, data je mogućnost optimalnog korišćenja opreme, čime se eksploatacioni vek opreme povećava, a daje se mogućnost uticaja na sistem održavanja u povratnoj sprezi.

Posebno su aktuelna i naučno opravdana ovakva istraživanja čiji rezultati mogu doprineti optimalnom korišćenju resursa preduzeća i racionalizaciji održavanja tehničkih sistema u celini. Primenom novog modela održavanja bi se postiglo smanjenje troškova i na taj način ostvarila veća produktivnost preduzeća.

Naučna opravdanost istraživanja procene preostalog životnog veka predstavlja izbor parametara dijagnostike koji se javljaju pri izboru najbolje metode iz niza mogućih varijanti u smislu usvajanja novog modela. Optimalno rešenje predstavlja kompromis između želja i mogućnosti pa se model obično izražava kriterijumskom funkcijom stanja rada komponenata koja za najbolje rešenje treba da dostigne odgovarajući cilj optimalne procene.

Društvena opravdanost ovog istraživanja jeste udovoljavanje praktičnim potrebama – rešavanju konkretnih problema održavanja u preduzeću. Posebno su aktuelna i naučno opravdana ovakva istraživanja čiji rezultati mogu doprineti optimalnom korišćenju resursa preduzeća i racionalizaciji održavanja tehničkih sistema u celini. Sve ovo, svakako, ima i svoju širu društvenu aktuelnost i značaj, jer napredak nauke i tehnologije predstavlja presudan faktor ekonomskog i ukupnog društvenog razvoja i progresa. Primenom novog modela dijagnostike oštećenja i procene životnog veka bi se postiglo smanjenje troškova i na taj način ostvarila veća produktivnost preduzeća.

Kako je istaknuto u uvodu, problematika koja je tema disertacije je veoma aktuelna i multidisciplinarna, i u direktnoj sprezi sa kompleksnošću mehanizama oštećenja i energetske efikasnošću, povećanjem proizvodnosti, podizanjem nivoa efektivnosti i pouzdanosti, produženjem veka eksploatacije, smanjenjem ukupnih troškova, podizanjem nivoa sigurnosti na radu i zaštite životne sredine.

# S e d m i d e o

## ZAKLJUČCI

Moderne peći za pirolizu su prešle veliki put u razvoju u odnosu na dizajn prvobitnih peći. Većina industrijskih peći koje su izgrađene u poslednjoj dekadi može postići termičku efikasnost od 98%. Visoka dobit olefina se postigla primenom novog dizajna cevnih snopova koji omogućuju veoma kratko vreme zadržavanja. Takođe i breneri su doživeli svoj razvoj tako da danas rade sa malom količinom viška vazduha što ima za posledicu uštedu u potrošnji goriva i smanjenju emisije NO<sub>x</sub>. Proteklih godina nastao je interesantan razvoj na polju dizajna novih cevi.

Danas, najveći izazov za inženjere predstavlja povišenje faktora vremena „u radu” smanjenjem nastajanja koksa i produženjem životnog veka cevi.

Istraživanja koja su sprovedena u okviru disertacije, su veoma kompleksna jer obuhvataju niz tehničkih opservacija i eksperimenata sa jedne strane, i razvoj novih pristupa u menadžmentu stanja sa druge strane. Iako je ova doktorska disertacija rezultat višegodišnjih istraživanja koja se odnose na razvoj, ispitivanje, modernizaciju i optimizaciju sistema za dijagnostiku i monitoring cevi peći, u njoj nisu mogli biti obuhvaćeni svi problemi i svi aspekti procene.

Svrha ovog rada je bila da obezbedi seriju alata za donošenje odluka koji će omogućiti inženjerima da optimizuju preporuke za zamenu cevi prema njihovim planovima proizvodnje i održavanja, tj. da mogu doneti i najkritičnije odluke:

- Kada se peć treba pregledati ?
- Kada se trebaju zameniti cevi ?
- Da li je produženje životnog veka date peći moguće ?
- Kakav uticaj imaju naslage u cevima na životni vek ?

Može se zaključiti da se moraju paralelno koristiti različite komplementarne tehnike, jer su i mehanizmi oštećenja sve složeniji i zahtevniji. Zbog toga su se, u eksperimentalnom delu istraživanja, uporedo koristile metode ispitivanja sa i bez razaranja. Nije jednostavno definisati metodologiju i opremu za ispitivanja bez razaranja u ovoj oblasti. Jedan od faktora ograničenja su raspoloživa materijalna sredstva za naučno istraživanje.

Veoma je značajno da se nove procedure prihvataju s razumevanjem a pristupi prošire s usvajanjem raznih metodologija za predikciju početka stvaranja oštećenja. Takođe je važno da se nove procedure u većoj meri zasnivaju na bazi znanja i iskustvu korisnika. U takvim slučajevima informacije i relevantni saveti mogu se nadograditi tokom vremena iz iskustva stečenog u prethodnim analizama ili iz novih ispitivanja i baza podataka ili direktno iz iskustva iz fabrika.

Metodologija istraživanja, pregled opreme i detaljan opis postrojenja i uređaja, korišćenih u eksperimentalnom radu u laboratoriji i u realnim eksploatacionim uslovima, koji su prezentovani u ovoj doktorskoj disertaciji, korisna su literatura za buduća istraživanja u ovoj oblasti, pogotovo za mlađe istraživače i stručnjake. Definisana metodologija istraživanja se pokazala veoma uspešna.



## 7.1 Dokazivanje glavne hipoteze

Iskustva u eksploataciji su pokazala da najveći deo radnih sredstava ne gubi svoje funkcionalne karakteristike odjednom, već je to kontinuiran proces. Nagoveštaji oštećenja, otkaza i havarije se pojavljuju ranije. Da bi se smanjili otkazi procesne opreme i izbegle havarije, potrebno je pravovremeno i prepoznati takve promene.

Istraživanja sprovedena tokom izrade disertacije su dala jedan skroman doprinos metodama tehničke dijagnostike za blagovremeno otkrivanje ranih upozoravajućih promena kod cevi u pirolitičkim pećima.

Potrebno je napomenuti da cevi peći imaju ograničeni životni vek koji zavisi od materijala cevi, radne sredine i režima eksploatacije. Rizik otkaza prilikom eksploatacije se srazmerno povećava s vremenom provedenim u radu. Vremenski interval zamene cevi je od izuzetne važnosti u smanjenju troškova i održavanju produktivnosti. Istraživanjem dijagnostike oštećenja i procene preostalog životnog veka se postiglo:

- redukcija rizika otkaza cevi i konsekventnog gubitka u proizvodnji,
- definisanje optimalnog vremena zamene cevi,
- kvantifikacija rizika rada cevi i anticipacija režima eksploatacije u narednom periodu,
- kvantifikacija oštećenja cevi u pogledu ukupnog vremena u radu, pregrevanja, malog protoka, ili prekomernog porasta pritiska,
- procena životnog veka na osnovu anticipiranih parametara rada u narednom periodu uzimajući u obzir naslage na zidovima cevi,
- prioritizacija peći u pogledu stepena iskorištenosti životnog veka cevi tako da se resursi onda mogu fokusirati na te peći radi tačne predikcije preostalog vremena,
- identifikacija primarnog modela oštećenja i razvijanje optimalnog metoda pregleda na osnovu modela oštećenja,
- određivanje onih peći u kojima se temperatura cevi može pouzdano podići sa trenutne vrednosti u cilju povećanja produktivnosti bez većeg smanjenja preostalog životnog veka,
- definisanje dozvoljenog stepena temperature zidova cevi koji će omogućiti određenoj peći da s pouzdanošću dočeka sledeći planski zastoje (planirano izvođenje peći iz rada), i
- omogućiti inženjerima održavanja i tehnologima da smanje rizik i poboljšaju profitabilnost.

Time je i dokazana glavna hipoteza disertacije, koja glasi: ***Primenom dijagnostike oštećenja i metoda procene životnog veka cevi etilenskih peći utiče se na prevazilaženje neplaniranih zastoja, produžetak veka eksploatacije cevi i samim tim na smanjenje ukupnih troškova.***

## 7.2 Naučni doprinos disertacije

Doktorska disertacija sa temom *Dijagnostika oštećenja i procena životnog veka cevi etilenskih peći* predstavlja doprinos za aktivno uključenje i održavanje koraka sa svetom u preventivnom, redovnom i havarijskom održavanju kompleksnih, industrijskih sistema, prevenciji neželjenih havarija, svakodnevnom održavanju i planiranju radova u remontu, kreiranju i razvoju održavanja i smanjenja ukupnih troškova održavanja velikih sistema koji mogu da budu znatni, pa samim tim zahtevaju značajno angažovanje stručnjaka i materijalnih sredstava. Istraživanja rađena u okviru ove doktorske disertacije pokazala su da li je naša zemlja sa svojim kapacitetima (kadrovskim i materijalnim), sposobna da se uključi u svetske projekte, koji se bave eksperimentalnim istraživanjima određivanja mehanizama oštećenja i procene životnog veka.

Industrijski standardi za predviđanje preostalog životnog veka cevi su opisani u preporukama American Petroleum Institute 530 (API, 1988), a usvojeni su u ISO13704:2001 standardu. Razvoj standarda u drugim državama se kretao u sličnim smerovima i u mnogim slučajevima metodologija je pozajmljena iz prethodno raspoloživih pravilnika drugih zemalja.

Tokom istraživanja izvršili smo poređenje rezultata procene preostalog životnog veka dobivene različitim metodama. Za iste polazne parametre dobili smo različite rezultate, što nam govori o različitosti standarda i metoda od države do države.

Kriterijum zamene cevi u našim istraživanjima se uopšte kreće od fiksne vrednosti nekoliko puta manje nego prema preporukama iz API 530 standarda, sa jedne strane, i minimalne debljine zida preporučene od strane proizvođača, s druge strane, a sve u cilju dokazivanja nepotrebne konzervativnosti API 530 standarda.

Pokazana je primena postupka procene rizika i definisanje intervala pregleda prema API 581 standardu na materijale koji nisu obuhvaćeni standardom. Cevi peći koje se razmatraju u ovom radu su projektovane prema API 530 standardu ali su cevi od materijala (HK40 i HP) koji se ne razmatraju u standardu API 581.

Ispitana je primenljivost Larson - Miller-ovog parametra na procenu zakona raspodele životnog veka u funkciji od temperature i opterećenja. Najčešće korišćena metoda linearne regresije najmanjeg kvadrata polazi od pretpostavke da raspodela životnog veka cevi oštećene puzanjem odgovara lognormalnoj raspodeli. U većini literature se ne razmatra validnost ove pretpostavke. U disertaciji smo predstavili procedure za validaciju dve kritične pretpostavke za slučajeve u kojima se primenjuje metoda najmanjeg kvadrata. Metoda maksimalne verovatnoće je predložena kao alternativa i kao daleko jača metoda za predstavljanje raspodele životnog veka cevi etilenskih peći oštećenih puzanjem.

Takođe napravljen je pokušaj da se razjasne karakteristike loma usled puzanja legure HK40 kao i njene karakteristike interakcije puzanje-zamor s aspekta raznih opterećenja talasnog oblika, čime bi se definisali kriterijumi za projektovanje cevi etilenskih peći koje su izložene ovakvim oblicima oštećenja.

## 7.3 Pitanja koja disertacija otvara

Istraživanja, u okviru disertacije značajno, doprinose naučnom sagledavanju problematike održavanja tehničkih sistema i upoznavanju sa problemima koji nastaju pri eksploataciji pirolitičkih peći, čime se omogućava rano predviđanje mogućih problema i njihovo otklanjanje. Moraju se paralelno koristiti različite komplementarne tehnike, jer su i mehanizmi oštećenja sve složeniji i zahtevniji, a samim tim se otvaraju i nova pitanja na polju optimizacije dijagnostičkih tehnika i njihov uticaj na pouzdanost. Pitanja koja disertacija otvara odnose se na:

- Podaci o karakteristikama materijala koji nam stoje na raspolaganju su obično nedovoljni ili razbacani, i obično se uzimaju iz istorijata rada, rezultati su iz različitih šarži materijala ili ispitivanja iz različitih laboratorija sa nedovoljnim brojem uzoraka, često sadrže veliku disperziju.
- Upotreba kratkotrajnih laboratorijskih ispitivanja za procenu životnog veka komponenata izloženih dugotrajnom temperaturnom opterećenju nadalje povećava mogućnosti za pogrešnu procenu.
- Nepoznate u modelovanju istorijata opterećenja, opterećenja komponenti sistema i dodatnih nepoznatih kao što su malo poznata ili nepoznata istorija režima eksploatacije, zaostali naponi, itd., javljaju se kao izvori grešaka u procesu procene.
- Studije koje odražavaju neslaganja sa stanjem u realnom svetu su sada u porastu. A to je takođe zbog toga što oprema u realnim uslovima eksploatacije dosta često odstupa od nominalnih uslova na različite načine uključujući njihovu promenljivost ili nejasnost. Tako da su prisutna pitanja koja se odnose na neodređenosti u proceni pouzdanosti i životnog veka.
- Predikcija životnog veka cevi peći uz upotrebu simulacije je veoma složena zbog kontinualne promene stanja procesa usled formiranja koksa u cevima: temperatura metala cevi, raspodele pritiska, i promena karakteristika protoka sa vremenom.
- Intenzivno i kontinuirano praćenje razvoja novih tehnologija i novih softverskih paketa koji se direktno primenjuju u dijagnostici oštećenja cevi peći.

Gore navedena pitanja koja disertacija otvara korisna su polazna tačka za buduća istraživanja u ovoj oblasti, pogotovo za mlađe istraživače i stručnjake. Veoma je značajno da se nove procedure prihvataju s razumevanjem a pristupi prošire s usvajanjem raznih metodologija na osnovu determinističkih i probabilističkih tehnika. Takođe je važno da se nove procedure u većoj meri zasnivaju na bazi znanja i iskustvu korisnika. U takvim slučajevima informacije i relevantni saveti mogu se nadograditi tokom vremena iz iskustva stečenog u prethodnim analizama ili iz novih ispitivanja i baza podataka ili direktno iz iskustva iz fabrika.

# O s m i d e o

## PREDLOZI DALJIH ISTRAŽIVANJA

Analiza pirolitičke peći zahteva multidisciplinarni pristup. Može se posmatrati sa sistemskog, tehnološkog, tehničkog, ekonomskog, energetskog i ekološkog aspekta. U okviru disertacije posmatrali smo peć sa tehničkog aspekta tj. bavili smo se dijagnostikom oštećenja i procenom životnog veka cevi pirolitičkih peći.

Tokom izrade doktorske disertacije pokazalo se da postoji još mogućnosti i potreba za nastavkom istraživanja kroz nadogradnju i detaljniju analizu pojedinih parametara. Pitanja koja disertacija otvara a koja su navedena u poglavlju 7.3 mogu se usvojiti i za polazne tačke daljnjih istraživanja.

Generalno posmatrano rezultati ovih istraživanja stvorili su dobru osnovu za dalja istraživanja, predlozi za nastavak istraživanja se mogu formulisati na sledeće načine:

- *Istraživanje mehanizama oštećenja.*

Sam mehanizam oštećenja cevi u pirolitičkim pećima u fabrikama etilena širom sveta predstavlja jedan od najnepredvidljivijih mehanizama oštećenja koji se ne može modelovati u laboratorijskim uslovima zbog svoje promenljivosti i neujednačenosti. U osnovi oštećenja leži naugljeničenje koje se nadalje manifestuje kroz puzanje. Dalja istraživanja po pitanju mehanizama oštećenja u direktnoj su zavisnosti od razvoja sofisticirane opreme za metalografska ispitivanja.

- *Modelovanje mehanizama oštećenja.*

Mehanizam oštećenja cevi kao što je već i gore pomenuto je veoma nepredvidljiv i neujednačen, tako da ostavlja dosta prostora za istraživanje i nadogradnju. Istraživanja mogu ići u pravcu razvoja novih metoda na osnovu teorije verovatnoće i metoda ekstrema fuzzy funkcije što će rezultovati definisanjem optimalnih metoda pregleda na osnovu modela oštećenja.

- *Dokazivanje konzervativnosti API 530 standarda.*

Kriterijum zamene cevi u našim istraživanjima se uopšte kretao od fiksne vrednosti nekoliko puta manje nego prema preporukama iz API 530 standarda, sa jedne strane, i minimalne debljine zida preporučene od strane proizvođača, s druge strane, a sve u cilju dokazivanja nepotrebne konzervativnosti API 530 standarda. Stoga dalja istraživanja mogu ići u pravcu dokazivanja nepotrebne konzervativnosti pomenutog standarda i razvoju ne konzervativnih tehnika.

- *Razvoj novih postupaka tehničke dijagnostike.*

U okviru razvoja postupaka tehničke dijagnostike dalja istraživanja bi trebala da se kreću u pravcu razvoja laserske profilometrije i praćenja električne otpornosti. Putem laserske profilometrije mogu se pratiti promene na cevima tokom celog životnog veka, dok se praćenje električne otpornosti izvodi u cilju procene degradacije materijala, pošto se električna otpornost kontinualno smanjuje uporedo s povećanjem vremena u radu.

- *Ubrzavanje ispitivanja.*

Razvoj procedura izbora optimalnih planova skraćenih ispitivanja cevi pirolitičkih peći za procenu preostalog životnog veka. Procedure trebaju da obuhvate tačnost ocene, trajanje i troškove ispitivanja, kao i zahtevani parametar pouzdanosti.

# L I T E R A T U R A

1. A.A., Kaya, P., Krauklis, D.J., Young, Microstructure of HK40 alloy after high-temperature service in oxidizing/carburizing environment, *Materials Characterization* 49, pp.23–34, 2002.
2. Adamović, Ž., Tehnička dijagnostika, V izdanje, Beograd, OMO, 2001.
3. Adamović, Ž., Milošević, G., Ristić, S., Osnove metodologije naučno-istraživačkog rada, TEHDIS, Beograd, 2005.
4. Ainsworth, R.A., Chell, G.G., Coleman, M.C., Goodall, I.W., Gooch, D.J., Haigh, J.R., Kimmins, S.T., Neate, G.J., CEGB assessment procedure for defect in plant operating in creep range, *Fatigue Fracture Engineering Material Structure*, vol.10, pp.115-127, 1987.
5. Ainsworth, R.A., Budden, P.J., Design and assessment of components subjected to creep, *Journal Strain Anal*, Vol.29, pp.201-208, 1994.
6. Alargić, P., Spasić, D., Kucora, I., Kaurin, T., *Održavanje prema pouzdanosti, na bazi rizika i totalno održavanje*, XXXIX MAJSKI SKUP ODRŽAVALACA SRBIJE - KONFERENCIJA » TEHNIČKA DIJAGNOSTIKA MAŠINA I POSTROJENJA « Vrnjačka Banja, 20. i 21. 05. 2016
7. A.K., Ray, Y.N., Tiwari, R.K., Sinha, P.K., Roy, S.K., Sinha, R., Singh, and S., Chaudhuri, Remnant life assessment of service-exposed pendent superheater tubes *Eng. Fail. Anal.* 9, p.83, 2002.
8. American Petroleum Institute, Calculation of Heater-Tube Thickness in Petroleum Refineries, API Recommended Practice 530, 3rd Edition, Washington D.C., 1996.
9. American Petroleum Institute, *Risk-Based Inspection, Base Resource Document*, API 581, Washington, 2000.
10. Andjelic, S., Adamovic, Z., Kucora, I., *Radiographic testing of circular welded joints and structures*, V International Conference Industrial Engineering And Environmental Protection 2015 (IIZS 2015) October 15-16, Zrenjanin, Serbia, 2015.
11. ASME, Boiler and Pressure Vessel Code, Case N-47 (29), Class 1 components in elevated temperature service, Section III, Division I, ASME, New York, 1991.
12. ASME, Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Rules for Construction of Pressure Vessels, Division 2, Alternative Rules, American Society of Mechanical Engineers, New York, 2000.
13. ASTM, Standard test method for measurement of creep crack growth rates in metals, ASTM E1457:1998, 03.01, pp.1031-1043, 1998.
14. Atkinson, R.F., The Development of Heat Resistant Alloys for Reformer and Ethylene Furnaces, (in) *Materials Issues in Heat Exchangers and Boilers Conference Proceedings*, 17-18 Oct. 1995., Institute of Metals, p.203, 1997.
15. Bahaa, Zaghoul, Predication Of Residual Life Time Of Steam Reformer Tubes, Central Metallurgical Research and Development Institute, Cairo 2007. (prezentacija)
16. Boyer, H.E., Atlas of Creep and Stress-Rupture Curves, ASM International, Metal Park, OH 44073, 1988.
17. Boyle, J.T., Spence J., Stress analysis for creep, Butterworths and The Camelot Press Ltd., Southampton, 1983.
18. British Standards BS 7910:1999, Guide to methods of assessing the acceptability of flaws in fusion welded structures, London: BSI, 1999.
19. Buchheim, G.M., Osage, D.A., Brown, R.G., and Dobis, J.D., Failure Investigation of a Low-Chrome Long-Seam Weld in a High-Temperature Refinery Piping System, *Service Experience and Reliability*

Improvement: Nuclear, Fossil and Petrochemical Plants, ASME Pressure Vessel and Piping Conference, vol. 288, 1994.

20. Cane, B.J., Browne, R.J., Risk-based inspection the needs, benefits and approach for power process plants, In: Edwards J.H., Flewitt P.E., Gasper B.C., Stanley P., Tomkins B., editors, Life management and evaluation of plant, structures and composites, EMAS Publishers, pp.461-476, 1988.
21. Cepic, Z., Kucora, I., Radovanovic, Lj., Desnica, E., Pekez, J., *Analysis of EU states code for life cycle assessment of components exposed to high temperatures*, The 15<sup>th</sup> International Symposium "Young People and Multidisciplinary Research, Timisoara, 14 - 15 November 2013, Editura Politehnica Temisvar, pp. 9-14 (ISSN 1843-6609)
22. Christ, H.J., Experimental characterization and computer based description of the carburization behavior of the austenitic stainless steel AISI 304L, *Materials and corrosion*, vol. 49., pp.258-265 (No. 4/5), Weinheim: Wiley-VCH Pubs., 1998.
23. C.J., Moss, P., Barrien, A., Walczynski, Life management of refinery furnace tubing, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 77, pp.105-112, 2000.
24. Committee on High Temperature Strength, Zairyo, Soc. Mater. Sci., Japan, 254, p.24, 1975.
25. Conway, J.B., *Stress-Rupture Parameters: Origin, Calculation and Use*, Gordon and Breach, New York, 1969.
26. Dai, Shu-Ho, Methodology for predicting damage to structural materials and remaining life of process equipment, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 78 pp.515-520, 2001.
27. Dai, SH, Wang, MO, *Reliability analysis in engineering applications*, Von Norstrand Reinhold Press, New York, 1992.
28. Delle Site Corrado., De Petris Carlo, Mennuti Canio, NDT tools for life assessment of high temperature pressure components, *Lifetime Management (Tu.2.7.4)*, ECNDT 2006.
29. Drubay B., Moulin D., Faigy C., Poette C., Bhandari S., Defect assessment procedure: a French approach, *ASME PVP 266*, pp.113-118, 1993.
30. Dudzinski, W., Morniroli, J.P., Gantois, M., Stacking faults in chromium, iron and vanadium mixed carbides of the type  $M_7C_3$ , *J. Mater. Sci.*, vol.15, pp.1387-1401, 1980.
31. El-Batahgy, A., Zaghoul, B., Creep failure of cracking heater at a petrochemical plant, *Materials Characterization* 54, pp.239-245, 2005.
32. Elliot, P., *Practical Guide to High-Temperature Alloys*, Nickel Development Institute, Technical Series No. 10056, Toronto, 1990.
33. Ewalds, H.L., Wanhill, R.J.H., *Fracture mechanics*, London: Edward Arnold, 1985.
34. Ewald, J., Keinburg, K.H., A two criteria diagram for creep crack initiation. *International Conference of Creep*, pp.173-176, Tokyo 1986.
35. *Failure Analysis and Prevention*, in *Metals Handbook*, Volume 11, Metals Park, OH: American Society for Metals, p.290, 1986.
36. Farmer, F.R., *Reactor Safety and Siting: A Proposed Risk Criterion*, *Nuclear Safety*, 8(6), pp. 539-548, 1967.
37. Filetin, T., Kovačićek, F., Izvještaj o ispitivanju uzroka loma zavojnice radijacione zone peći, FSB, Zagreb, 1989.
38. Filetin, T., Izvještaj o uzroku pojave pukotina koljena cijevi radijacione zone peći za pirolizu, FSB, Zagreb, 1994.
39. Filetin, T., Kovačićek, F., Lisjak, D., Analiza mikrostrukturnih promjena u materijalu cijevi peći za pirolizu, *Tehnički vijesnik* 4(1, 2) 13-17 (1997), Slavonski Brod, 1997.

40. Finnie, I., Design of Furnace Tubes for the Creep Rupture Range (Paper 62-WA-272), American Society of Mechanical Engineers, New York, November, 2000.
41. Goodall, I.W., Assessment procedure for the high temperature response of structures, Nuclear Electric Procedure R5, Issue 1, 1990.
42. Grant, N.J., Bucklin A.G., Deformation and Fracture at Elevated Temperature, MIT Press, Boston, MA, 1965.
43. Green, D., Moulin, D., Hooton, D., Development of fracture assessment procedures at elevated temperature in Europe, In SISSI 94, (Saclay International Seminar on Structural Integrity: Principles Of Fracture Mechanics Application in Nuclear Power Plants), pp.59-71, Centre d'Etudes de Saclay, 1995.
44. Hall, D.J., Hossian, M., Kamal, Atkinson, R.F, Carburization Behaviour of HK-40 Steel in Furnaces Used for Ethylene Production, High Temperatures – High Pressures, Vol.14, pp.527-539, 1982.
45. Hosoya, K., et. al., Application of New Ethylene Furnace Tube—Oxide Dispersion Strengthened (ODS) Alloy, 13th Ethylene Forum, Baton Rouge, LA, February 20-23, 2001.
46. Iain, Le May, Tito, Luiz da Silveira, Effects of Metallographic Preparation Procedures on Creep Damage Assessment, Materials Characterization, 28 pp.75–85, 1992.
47. Iain, Le May, Tito, Luiz da Silveira, and C.H., Vianna, Criteria for the Evaluation of Damage and Remaining Life in Reformer Furnace Tubes, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol.66, pp.233–241, 1996.
48. Iain, Le May, Tito, Luiz da Silveira, Reformer furnaces: materials, damage mechanisms, and assessment, The Arabian Journal for Science and Engineering, Volume 31, Number 2C, Dhahran, Saudi Arabia, 2006.
49. Ibarra, S., and Konet, R.R., Life Assessment of  $\frac{1}{4}$ Cr-  $\frac{1}{2}$ Mo Steel Catalytic Reformer Furnace Tubes using the MPC Omega Method, Service Experience and Reliability Improvement: Nuclear, Fossil and Petrochemical Plants, ASME Pressure Vessel and Piping Conference, Vol.288, 1994.
50. Ilić, B., Kucora, I., Adamovic, Ž., Savić, B., *Korozija gasovoda uzrokovana lutajućim strujama jednosmerne električne vuče*, XXXIX MAJSKI SKUP ODRŽAVALACA SRBIJE - KONFERENCIJA » TEHNIČKA DIJAGNOSTIKA MAŠINA I POSTROJENJA « Vrnjačka Banja, 20. i 21. 05. 2016.
51. Jakobi, D., Gommans, R., Typical failures in pyrolysis coils for ethylene cracking, Materials and Corrosion, 54, No.11, 2003.
52. Jevtić, N., Spasić, D., Kucora, I., Dijagnostika poremećaja u radu ili otkazu sistema, 1<sup>th</sup> Naučno – stručni skup, Energetska efikasnost, Visoka tehnička škola strukovnih studija, Beograd, 25. Oktobar 2013, E – zbornik radova ISSN 2334-914X
53. J.M.Gong, S.T.Tu, and K.B., Yoon, Damage assessment and maintenance strategy of hydrogen reformer furnace tubes *Eng. Fail. Anal.* 6, p.143, 1999.
54. Josimović, Lj., Kucora, I., Tolmač, J., Spasić, D., Josimović, M., *Merenje protoka*, XXXIX MAJSKI SKUP ODRŽAVALACA SRBIJE - KONFERENCIJA » TEHNIČKA DIJAGNOSTIKA MAŠINA I POSTROJENJA « Vrnjačka Banja, 20. i 21. 05. 2016.
55. Jovanovic, A.S., Wagemann, G., Knowledge-based system (KBS) for creep crack growth of high temperature components in HIDA project, Journal of Material High Temperature, Vol.15 (3/4), pp.347-355, 1998.
56. J., Zhao, S.Q., Han, S.M., Xie, H.B., Gao, and L., Wang, Remaining life assessment of a 1Cr5Mo steel by using z-parameter method, Acta Metall. Sin.17, p.601, 2004.
57. Kachanov, L.M., On the creep fracture time. *Izv. Akad. Nauk USSR Otd. Tekh.* 8, 26–31, 1958.



58. Kaguchi, H., Djavanroodi, F., Nikbin, K.M., Webster, G.A., Prediction of transient effect during the early stages of creep crack growth. In: Rie K.T., editor, Proceeding of the DVM Conference, Berlin, September, 1994.
59. Kaishu, Guan, Hong, Xu, Zhiwen, Wang, Analysis of failed ethylene cracking tubes, Engineering Failure Analysis 12, pp.420–431, 2005.
60. Kovacevic, M., Lambic, M., Radovanovic, Lj., Kucora, I., i Ristic, M., 2016, Measures for Increasing Consumption of Natural Gas, Energy Sources Part B: Economics, Planning, and Policy, (UESB-2016-0085; DOI: 10.1080/15567249.2016.117 9359)
61. Kovacevic, M., Lambic, M., Radovanovic, Lj., Pekez, J., Ilic, D., Nikolic, N., and Kucora, I., Increasing the efficiency by retrofitting gas boilers into condensing heat exchanger, Energy Sources Part B: Economics, Planning, and Policy, (UESB-2016-0089; DOI number: 10.1080/15567249.2016.1188182)
62. Kucora, I., Radovanović, Lj., Kriterijumi izbora materijala cevnih snopova pirolitičkih peći za proizvodnju lakih olefina, Zbornik radova XXXVI Konferencije Majski skup održavalaca Srbije “Merenje indikatora performansi održavanja tehničkih sistema u kompanijama, Društvo za tehničku dijagnostiku Srbije, TEHDIS, Vrnjačka Banja, 31.05.2013, ISBN 978-86-83701-30-8
63. Kucora, I., Radovanovic, Lj., Otic, G., Adamovic, Z., *Ključni elementi programa upravljanja životnim vekom cevi pirolitičkih peći*, Energetske tehnologije, 2013., Vol. 10, No 2, ISSN 1451- 9070
64. Kucora, I., Radovanovic, Lj., *Pyrolysis furnace tube damaging and inspection*, III International Conference Industrial Engineering and Environmental Protection, 30. Oktober, 2013, Zrenjanin, ISBN 978-86-7672-208-2, p.162-169
65. Kucora, I., Adamović, Ž., Radovanović, Lj., *Otkazi cevi etilenskih peći*, Energetske tehnologije, 2013., Vol. 10, No 1, strp. 47-53, ISSN 1451- 9070
66. Kucora, I., Radovanovic, Lj., Desnica, E., Pekez, J., Application of fuzzy function on pyrolysis furnace tubes remaining life assessment, ANNALS of Faculty Engineering Hunedoara – International Journal of Engineering, Romania, Tome XII [2014] – Fascicule 1 [February], pp. 233-236, ISSN 1584-2673, ISSN 1584-2665 (print)
67. Kucora, I., Radovanovic, Lj.,Pekez, J., *Tehnička dijagnostika cijevnih snopova peći za pirolizu benzina-destruktivne metode*, 23 Scientific meeting, Organisation and technology of maintenance, Proceeding, Požega, 24-25 travnja, 2014, Društvo održavatelja Osijek, Elektrotehnički fakultet Osijek, HGK Županijska komora Požega, str.95-103 ISBN 978-953-6032-84-6
68. Kucora, I., Radovanovic, Lj.,Desnica, E., *Tehnička dijagnostika cijevnih snopova peći za pirolizu benzina-nedestruktivne metode*, 23 Scientific meeting, Organisation and technology of maintenance, Proceeding, Požega, 24-25 travnja, 2014, Društvo održavatelja Osijek, Elektrotehnički fakultet Osijek, HGK Županijska komora Požega, ISBN 978-953-6032-84-6 str.87-94
69. Kucora, I., Radovanovic, Lj., Zakin, M., Otić, G., *Stohastički model određivanja oštećenja cevi pirolitičkih peći*, XXXVII Konferencija Majski skup održavalaca Srbije „Nova koncepcija održavanja: vibrodijagnostičko održavanje tehničkih sistema u kompanijama” Vrnjačka Banja, 30.05.2014. Srpski akademski centar, Novi Sad, elektronski zbornik, ISBN 978-86-89087-12-3, p.125
70. Kucora, I., Radovanović, Lj., Adamović, Ž., Otić, G.,*Development of materials of pipe shock pyrolysis furnace for production of light olefins*, Zbornik radova 12<sup>th</sup> International Conference: MAINTENANCE AND PRODUCTION ENGINEERING - KODIP 2014, Savez inženjera Crne Gore, Društvo održavalaca sredstava za rad Crne Gore, Mašinski fakultet u Podgorici, 18-21. June 2014., Budva, Montenegro, ISBN 978-9940-527-33-4 p. 313-321
71. Kucora, I., Radovanovic, Lj., Pyrolysis furnace tube damaging and inspection, Acta Tehnica Corviniensis – Bulletin of Engineering, Faculty of Engineering Hunedoara, Romania, Tome VII [2014] – Fascicule 3 [July - September ], ISSN 2067 – 3809
72. Kucora, I., Radovanovic, Lj., Adamovic, Z., *Methodology for applying the differential Quadrature (dq) method to the free vibration Analysis*, Proceedings of IV International Conference Industrial

Engineering and Environmental Protection, University of Novi Sad, Technical faculty "Mihajlo Pupin", October 15<sup>th</sup>, 2014, Zrenjanin, ISBN 978-86-7672-234-1, pp.173-178

73. Kucora, I., Radovanovic, Lj., Palinkas, I., Adamovic, Z., *Methodology for applying the differential Quadrature (dq) method to the free vibration Analysis*, ANNALS of Faculty Engineering Hunedoara – International Journal of Engineering, Tome XIII [2015] – Fascicule 2 [May], p.156-162., ISSN: 1584-2665 [print]; ISSN: 1584-2673 [online]
74. Kucora, I., Paunjoric, P., Tolmac, J., Vulovic, M., Speight, J and Radovanović, Lj., Coke Formation in Pyrolysis Furnaces in the Petrochemical Industry, *Petroleum Science and Technology*, ISSN 1091-6466 (Print), 1532-2459 (Online), (LPET-2016-0542; DOI: 10.1080/10916466.2016.1198810)
75. Kucora, I., Radovanovic, Lj., Milosevic, D., Vulovic, S., Kovacevic, M., Otic, G., Adamovic, Z., 2016, Increasing Safty of Power Plant Using a New Model of Reliability, *Energy Sources Part B: Economics, Planning, and Policy*, (UESB-2016-0082; DOI: 10.1080/15567249.2016.1185481)
76. Lai, G.Y., *High Temperature Corrosion of Engineering Alloys*, p.114, ASM International, 2001.
77. Larson, F.R., Miller J., A time–temperature relationship for rupture and creep stresses, *Transactions of the ASME*, 74:765–771, 1952.
78. Leckie, F.A., *Damage Studies in Pressure Vessel Components*, WRC Bulletin 310, Welding Research Council, New York, NY, Dec. 1985.
79. M., Prager, *Development of the MPC Omega Method for Life Assessment in the Creep Range*, Pressure Vessels and Piping Conference, Minneapolis, Minnesota, June 19-23, 1994.
80. Manson, S.S., ASTM STP 520, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 744-782, 1973.
81. McLaughlin, J.E., Karcher, G.E., and Barnes, P., *Life Assessment of Carbon Steel Vessel with Cracks Operating in the Creep Range*, Service Experience and Reliability Improvement: Nuclear, Fossil and Petrochemical Plants, ASME Pressure Vessel and Piping Conference, Vol. 288, 1994.
82. Millwater, H.R., Fitch, S.K.H., Justin, Y.T., Riha, D.S., Enright, M.P., Leverant, G.R., McClung, R.C., Kuhlman, C.J., Chell, G.G., Lee, Y.D., A probabilistically based tolerance analysis computer program for hard alpha anomalies in titanium rotors, Presented at the International Gas Turbine and Aeroengine Congress, Munich, Germany, May 8-11, 2000.
83. Mitchell, D.R.G., Young, D.J., Kleemann, W., *Carburization of heat-resistant steels*, *Materials and corrosion*, Vol.49, pp.231–236 (No. 4/5), Weinheim: Wiley-VCH Publs., 1998.
84. Moller, G.E., Warren, C.W, *Survey of Tube Experience in Ethylene and Olefins Pyrolysis Furnaces*, NACE T-5B-6 Task Group Report, April, 1981.
85. Monkman, F.C., and Grant, N.J., *Proceedings, ASTM 56*, p.595, 1956.
86. Morniroli, J.P., Bauer-Grosse, E., Gantois, M, *Cristalline defects in M<sub>7</sub>C<sub>3</sub> carbides*, *Philos Mag A*, Vol.48, pp.311-327, 1983.
87. N., Meredith, *Dent. Mater*15, p.98, 1999.
88. Nelson, W., *Accelerated Testing: Statistical Models, Test Plans, and Data Analysis*, Wiley, New York, 1990.
89. Neubauer, B., and Wedel, V., *Restlife Estimation of Creeping Components by Means of Replicas*, *ASME International Conference on Advances in Life Prediction Methods*, eds. D.A. Woodford and J.R. Whitehead, New York, NY: ASME, pp.353–356, 1983.
90. Nikbin, K.M., Smith, D.J., Webster, G.A., *An engineering approach to the prediction of creep crack growth*, *Journal of Engineering Material Technology*, Trans ASME, 108, pp.186-191, 1986.
91. Nikbin, K.M., *Consideration of safety factors in the life extension modeling of components operating at high temperatures*, In: Rice, R.C., Tritsch, D. E., editors, *Effects of product quality control and*

- design criteria on structural integrity, American Society for Testing and Materials, pp.20-33, ASTM STP 1337, 1998.
92. Petkovic-Luton, R., Ramanarayanan, T.A., Mixed-oxidant attack of high-temperature alloys in carbon and oxygen containing environments, *Oxid Met* vol.34, p.381–400, 1990.
  93. Plavšić, M., Mogućnost stabiliziranja senzibilizirane i napsle strukture materijala katalitičkih cijevi reforming peći, doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Istočno Sarajevo, 2010.
  94. Poussard, C., Moulin, D., Creep fatigue crack growth in austenitic stainless steel centre cracked plates at 650°C – Part I: experimental study and interpretation, *Journal of Material High Temperature*, Vol.15. (3/4), pp.313-330, 1998.
  95. Prager, M., The Omega Method—An Effective Method for Life and Damage Prediction in Creep Tests and Service, presented at ICSMA 10, Sendai, Japan, August 21-26, 1994.
  96. Prager, M., and Masuyama, F., Examination of the Effects of Materials Variables in Advanced Alloys by Studying Creep Deformation Behavior, presented at ICSMA 10, Sendai, Japan, August 21-26, 1994.
  97. Rahmel, A., Grabke H.J., Steinkusch W., Carburization introductory survey, *Materials and corrosion*, vol. 49, pp.221–225 (No. 4/5), Weinheim: Wiley-VCH Publs., 1998.
  98. Ramanarayanan, T.A., Petkovic, R.A., Mumford, J.D., Ozekcin A., Carburization of high chromium alloys, *Materials and corrosion* Vol. 49., Weinheim: Wiley-VCH Publs., pp.226–230 (No. 4/5), 1998.
  99. RCC-MR, Materials design and construction rules for mechanical components of FBR nuclear test islands, Paris: AFCEN, Technical Appendix A3, Section 1, Subsection Z, 1985.
  100. Roach, D.B., VanECHO, J.A., Comparison of the properties of the HK-40 and HP-45 cast heat-resistant alloys, *ASTM STP 756*, Am Soc Test Mater, p.p. 275-312, 1982.
  101. Radovanovic, Lj., Palinkas, I., Kucora, I., *Modern approach to diagnosis of technical system*, 24. Međunarodni znanstveno stručni skup Organizacija i tehnologija održavanja – OTO 2016, Požega - R.Hrvatska, 22. Travanj 2016., ISBN 978-953-7973-13-1, pp.41-50.,
  102. S., Hamano, et. al., Application of Oxide Dispersion Strengthened Alloy for Radiant Tube, *Journal of the Japan Society for Heat Treatment*, 39(1), p.16, 1999.
  103. S.J., Zhu, P.E., Li, J., Zhao, and Z.B., Cao, The effect of prior aging on the creep crack growth behaviour of austenitic HK40 steel *Mater. Sci. Eng.*, A114, p.7, 1989.
  104. Sandstrom, R., and Kondyr, A., Model for Tertiary-Creep in Mo- and Cr-Mo Steels, *ICM 3*, Vol. 2, Cambridge, UK, pp. 275–284, 1979.
  105. Samuels, L.E., Coade, R.W., Mann, S.D., Pre-cracking Structures in a Creep-Ruptured Low-Carbon Cr-Mo Steel: their Nature and Detection by Light Microscopy and Scanning Electron Microscopy, *Materials /Characterization*, 29 pp.343–363, 1992.
  106. Seung, Hoon, Nahm, et. al., Degradation evaluation of HK-40 steel using electrical resistivity, *International Journal of Modern Physics B*, Vol. 17, Nos. 8 & 9, pp.1615–1620, 2003.
  107. Simonen, F.A., Jaske, C.E., A computational model for predicting the life of tubes used in petrochemical heater service, *Journal Pressure Vessel Technology* 107, pp.239–246, 1985.
  108. Tham, Chee, Mun, Pyrolysis Furnace, [www.kolmetz.com](http://www.kolmetz.com), 2007.
  109. The SAS institute, *SAS/STAT User's Guide*, Vol. 2, Version 6, Fourth Edition, 1990.
  110. Tillack, D.J., Guthrie, J.E., Wrought and cast heat-resistant stainless and nickel alloys for the refining and petrochemical industries, Nickel Development Institute, Technical Series No. 10071, Toronto, 1998.
  111. Victorian Work Cover Authority, The Requirements for Demonstration Under the Occupational Health and Safety (Major Hazard Facilities) Regulation, Guidance Note 16, 2001.

112. Vulovic, S., Otic, G., Radovanovic, Lj., Adamovic, Z, Spasic, D., Kucora, I., Vibrations of turbo rotor aggregate smederevo iron works caused by oil film in bearings, Journal of the Balkan Tribological Association (2016), Book 4, Vol. 22, ISSN 1310-4772
113. Wallace, R., Blischke, D.N., Prabhakar Murthy, Case Studies in Reliability and Maintenance John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey 2003.
114. Webster, G.A., Nikbin, K., Chorlton, M.R., Celard N.J.C., Ober M., A comparison of high temperature defect assessment methods. Journal of Material High Temperature, Vol.15 (3/4), pp.337-347
115. Wen-Tai, H., Honeycombe, R.W.K., Structure of centrifugally cast austenitic stainless steels: Part 1. HK40 as cast and after creep between 750 and 1000 °C, Mater Sci Technol., vol.1, pp.385–389, 1985.