

METODOLOGIJA OCENE EKSPLOATACIONA POUZDANOSTI I UNAPREĐENJA MERA ODRŽAVANJA MAGISTRALNIH CEVOVODA SPROVEDENA NA PRIMERU

SERVICE RELIABILITY ASSESSMENT METHODOLOGY AND MAINTENANCE IMPROVEMENT OF MAGISTRAL PIPELINES THROUGH EXAMPLE

G.M.Bakić*, V.B.Šijački*, M.B.Đukić*, B.M.Rajičić*, B.M.Anđelić**

*Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Kraljice Marije 16, 11120 Beograd**
*Tehnički Fakultet Čačak, Univerziteta u Kragujevcu, Svetog Save 26, 32000 Čačak***

Abstract: Service reliability and maintenance of the major pipeline systems is still not considered to be an important issue in the country. The explicit methodology has been developed that can answer more or less accurately the crucial question of how long certain part of the pipeline can be in reliable service. This methodology is a generalized approach, and can be fully applicable to the system of interest only if all specific characteristics of the examined system are taken into account, including type of fluid, specific track, expected service life, etc. In this paper, the example of how methodology for reliability assessment of the pipeline is demonstrated for the case of the magistral pipeline in a fossil fuel plant, together with the example of how obtained results of the applied methodology in addition to some other measures can be used to enhance maintenance.

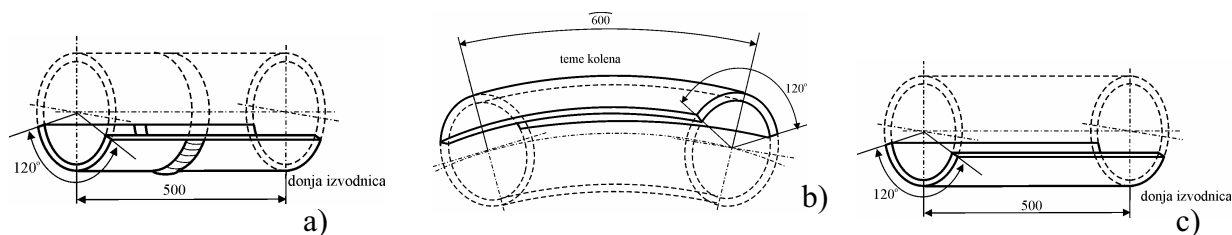
Key words: pipeline, reliability, maintenance

1. Uvod

Magistralni cevovod koji služi za transport pare dužine 5 km povezuje dva postrojenja i ima ulogu transporta pare samo povremeno za pokretanje jednog od postrojenja, dok se u režimu kada nema transporta pare u njemu nalazi para vrlo niskog pritiska čime je on zaštićen od delovanja korozije, odnosno konzerviran. Za ovaj cevovod je bilo potrebno odrediti eksploatacionu upotrebljivost na osnovu rezultata ispitivanja koja su obuhvatila ispitivanja sa i bez razaranja. Iako je cevovod u funkciji nešto više od 20 god. parovod je proveo u radnom režimu oko 8000 h, bez incidentnih situacija bilo kog tipa. Cevovod, je izrađen od čelika Č1215, dimenzija $\varnothing 323,9 \times 7,1$ projektnog pritiska 27,2 bara i temperature 325°C.

Zbog velike dužine cevovoda, detaljno ispitivanje klasičnim metodama bez razaranja nije imalo svrhe, zbog čega je odlučeno da se na pozicijama koje su kritične sa aspekta rada, jer po svojoj konfiguraciji i naponskom stanju predstavljaju pogodna mesta za nastanak oštećenja, izvrši uzorkovanje. Uzorci su obuhvatili: U1 – ravnu deonicu sa zavarenim spojem sa početka cevovoda, slika 1a; U2 – ravnu deonicu sa zavarenim spojem iz srednjeg dela cevovoda koji je duže bio bez izolacije, slika 1a; U3 – istegnuti deo cevne luka na deonici gde je slabije funkcionisao sistem oslanjanja, slika 1b; U4 – deo cevne luka koji sadrži zavareni spoj, slika 1a i U5 – ravnu deonicu u blizini drugog kraja cevovoda, slika 1c. Eksploataciona upotrebljivost ispitivanog parovoda, koja je prikazana u ovom radu, je

određivana sa više aspekata: trenutnog stanja materijala parovoda, minimalnih debljina i korozionih oštećenja sa spoljašnje strane, broja startova (niskociklični zamor) [1].



Slika 1 Vrste uzoraka isečenih sa deonica magistralnog cevovoda

2. Rezultati ispitivanja

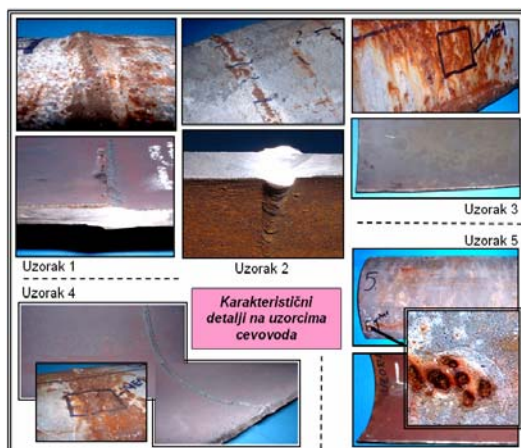
Ispitivanja sa razaranjem su obuhvatila: vizuelnu kontrolu, analizu hemijskog sastava, dimenzionu kontrolu, određivanje zateznih svojstava, određivanje tvrdoće, mikrostrukturna ispitivanja i ispitivanje udarne žilavosti (dva uzorka sa većim brojem grešaka iz fabrikacije).

Vizuelna kontrola sa makrosnimanjem - utvrđeno prisustvo i karakter naslaga, stepen oštećenja i deformisanost uzoraka cevi, slika 2. Konstatovana je opšta korozija sa unutrašnje strane cevovoda (uzorci 2 i 5) i lokalna korozija sa spoljašnje strane cevi u vidu grupisanih korozionih kratera veće dubine, čija dubina je dostizala $> 1,5$ mm (uzorak 5), greške u zavarenim spojevima (uzorci 2 i 4).

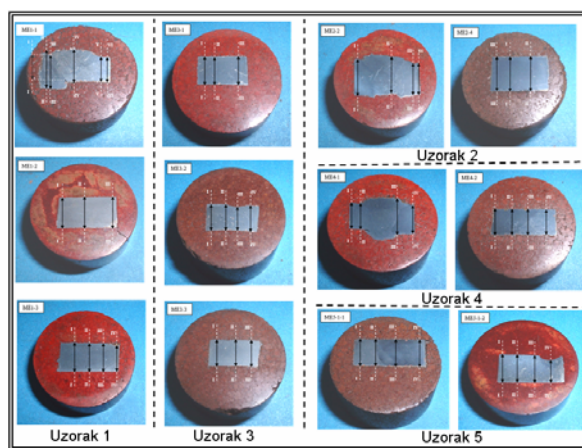
Dimenziona kontrola uzoraka je izvršena merenjem debljine zida na metalografskim uzorcima (najpreciznije merenje debljine zida), tabela 3 i slika 3, koja su poslužila kao podloga za kontrolne proračune napona u zidu cevi i minimalno potrebne debljine.

Tabela 3: Rezultati dimenzione kontrole uzorka U1

Uzorak	Uzorak 1			Uzorak 2		Uzorak 3			Uzorak 4		Uzorak 5	
	M1-1	M1-2	M1-3	M2-2	M2-4	M3-1	M3-2	M3-3	M4-1	M4-2	M5-1	M5-2
s, mm	6,2- 9,0	7,85- 8,1	6,45- 7,6	7,8- 9,55	8,8- 8,85	6,0- 7,0	5,5- 6,5	6,35	6,6- 9,6	6,1- 6,45	7,15- 7,2	6,5- 7,35



Slika 2 Makrosnimci vizuelne kontrole uzoraka cevovoda



Slika 3 Metalografski uzorci sa pozicijama merenja debljine zida

Analiza hemijskog sastava - obavljena je kvantometerskom metodom i svi uzorci po sadržaju elemenata odgovaraju deklarisanom materijalu Č1215 (JUS).

Ispitivanje zatezanjem na sobnoj temperaturi i ispitivanje tvrdoće. Zatezne osobine su određivane na uzorcima U1, U2 i U4 tako da je obuhvaćen zavareni spoj, dok su kod uzoraka U3 i U5 obuhvaćene različite zone temena cevog luka, zone sa grupisanim korozionim

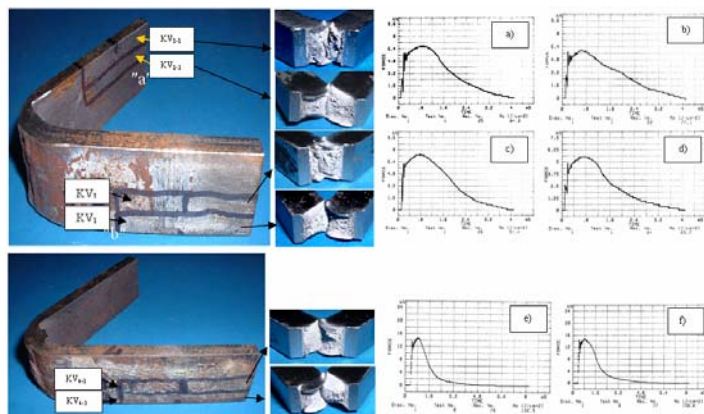
oštećenjima i u zone bez oštećenja. Dobijeni rezultati zajedno sa merenjima tvrdoće su prikazani u tabeli 4. Karakteristike svojstava otpornosti (R_m i $R_{0,2}$), kao i izduženje (A , %), odgovaraju standardom preporučenim vrednostima kod svih uzoraka izuzev kod uzorka 3 (najverovatnije posledica kombinovanog uticaja proizvodnih i eksploatacionih faktora). Izmerene vrednosti tvrdoće su u skladu sa rezultatima dobijenim zatezanjem.

Tehnološkim ispitivanjem savijanjem uočeno je razdvajanje šava zavarenog spoja uzorka 1 pri uglu od 120° (vrednost manja od preporučene) što ukazuje na loše vezivanje u zoni lica spoja. Takođe, kod uzoraka 2 i 4 uglovi savijanja pri kojima su se pojavile prsline su iznosili 50 i 60° (znatno manji od zahtevanog ugla od 180°) što ukazuje ne samo na gubitak plastičnosti zavarenog spoja već i na grešku vezivanje u zoni lica šava.

Tabela 4: Mehaničke osobine

Uzorak		$R_{0,2}$, MPa	R_m , MPa	A, %	HBS
U1	U1-Z1zs	377,5	502	-	160-162
	U1-Z2	367	465	26,53	
	U1-Z3	379,5	506,5	22	
U2	U2-Z1 zs	342	499	-	156-160
	U2-Z2	370	508	28,29	
U3	U3-Z1	461	598	20,77	169-170
	U3-Z2	412	560	25,38	
	U3-Z3	418	573	26,92	
U4	U4-Z1 zs	383	519	-	161-165
	U4-Z2	332	480	25,0	
U5	U5-Z1	343	477	27,14	159-163
standard za Č1215		255	440-540	min 21	

Ispitivanje udarne žilavosti je izvršeno na instrumentiranom klatnu na uzorcima 1 i 4, slika 4, na KV epruvetama čiji je zarez postavljen u pravcu otvaranja prsline u zoni zavarenog spoja, odnosno u pravcu koji je normalan po debljini cevi u odnosu na njega, tabela 5.



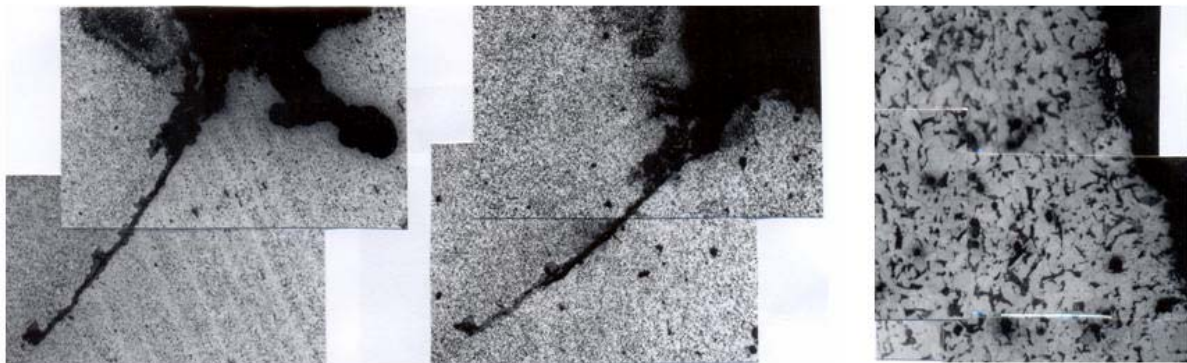
Slika 4 Šema isecanja epruveta za ispitivanje žilavosti, prelomne površine i dijagrami sila-vreme za: a) KV₁₋₁; b) KV₁₋₂; c) KV₁₋₃; d) KV₁₋₄; e) KV₄₋₁; f) KV₄₋₂

Tabela 5: Rezultati ispitivanja udarne žilavosti

Oznaka uzorka	Pravac zarez	Ukupna energija utrošena za lom, A_{u} , J	Utrošena energija za inicijaciju prsline, $A_{inic.}$, J	Utrošena energija za širenje prsline, $A_{šir.}$, J	Ugib D_f , mm
KV ₁₋₁	obimni	114,29	47,79	66,50	21,1
KV ₁₋₂	po debljini	89,82	37,07	52,75	18,4
KV ₁₋₃	obimni	116,33	49,66	66,67	21,6
KV ₁₋₄	po debljini	86,83	35,98	50,85	18,1
KV ₄₋₁	obimni	129,63	47,57	82,05	24,3
KV ₄₋₂	po debljini	143,13	52,65	90,48	27,5

Dobijeni rezultati ispitanih uzoraka su zadovoljavajući i odlikuju se vrlo visokim vrednostima energije utrošene za lom epruveta. Takođe, energija širenja prsline je po vrednosti veća od energije za inicijacije. Sve površine loma imaju izgled koji je u skladu sa dobijenim energijama i ukazuju, kao i dijagrami na slici 4, na dobra svojstva duktilnosti ovog materijala. Ova konstatacija inače predstavlja preduslov za pozitivnu ocenu integriteta cevovoda izloženih unutrašnjem pritisku.

Mikrostrukturna ispitivanja su pokazala da je struktura materijala nehomogena, sa velikom količinom grešaka iz fabrikacije (šupljine, prsline, neravnomerna sekundarna trakavost posebno izražena sa unutrašnje strane, ogromna količina MnS uključaka, nehomogena mikrostruktura) i da su prisutne greške zavarivanja (smaknutost, prsline, neprovar, šupljine), slika 5. Površinski sloj sa unutrašnje strane je izložen koroziji. Izgled oštećenja treba korelisati sa lošim mikrostrukturnim stanjem koje se odlikuje manjom otpornošću prema koroziji u odnosu optimalnu mikrostrukturu.



Slika 5 Greške i nehomogenosti u mikrostrukтури ispitivanih uzoraka

3. Procena eksploatacione upotrebljivosti parovoda TEKOA - TEKOB

Eksploataciona upotrebljivost sa aspekta trenutnog stanja materijala parovoda - objedinjeni rezultati ispitivanja elementa cevovoda su prikazani u tabeli 6.

Tabela 6: Zbirni pregled relevantnih rezultata ispitivanja i ocene stanja elemenata cevovoda

Uzorak	Hemijski sastav	Debljina zida, mm	Ocena mehaničkih karakteristika			Žilavost	Tvrdoća, HBS	Ocena mikrostrukture	Stepen korozivnih oštećenja		Ocena valjanosti zavarenog spoja
			R _{0,2} , MPa	R _m , MPa	A, %				spoljšanja površina	unutrašnja površina	
U1	+	±	+	+	+	/	+	±	+	0,7	
U2	+	+	+	+	+	+	+	±	±	0,8	
U3	+	±	+	-	±	/	+	±	+	/	
U4	+	±	+	+	+	+	+	±	±	0,7	
U5	+	+	+	+	+	/	+	±	+	/	

"+" zadovoljavajuće; "±" prihvatljivo; "-" nezadovoljavajuće; "/" nije ispitivano

Na osnovu konstatacija koje su već iznete i podataka o eksploatacionoj istoriji proizilazi da:

- kvalitet zavarenih spojeva, procenjen prema stanju uzoraka U1, U2 i U4, je još uvek u okviru dozvoljenih vrednosti za cevi izložene nižim pritiscima, kao što je slučaj kod ovog cevovoda (min 0,7); u saglasnosti sa ovom konstatacijom su i svi rezultati tehnološkog ispitivanja savijanjem
- loše mikrostrukturno stanje, uključujući i zavarene spojeve, ukazuje na manju eksploatacionu upotrebljivost cevovoda od očekivane jer pogoduje smanjenju radnog veka i pouzdanosti u radu;

- koroziona oštećenja prisutna na spoljašnjoj i unutrašnjoj površini uzoraka cevi nisu značajnijeg obima za dimenzije ovog cevovoda.

Kontrolni proračun minimalno potrebnih debljina. U tabeli 7 su dati rezultati kontrolnih proračuna min debljine zida za različite koeficijente valjanosti zavarenog spoja i različite stepene sigurnosti za projektne i radne uslove i min izmerenu debljinu zida cevi, koji su izvedeni prema TRD normama serije 300.

Tabela 7: Rezultati kontrolnih proračuna min potrebne debljine u zoni zavarenih spojeva

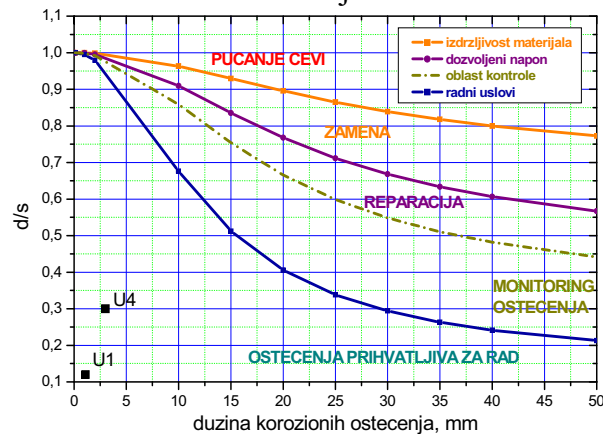
Vrsta proračuna: za projektne parametre					
Veličina	Ulazni podaci: $D_s=323,9\text{mm}$; $s=7,1\text{mm}$; $p=2,72\text{ MPa}$; $T=325^\circ\text{C}$;				
stepen sigurnosti, s	1,5	1,5	1,5	1,5	1,25
koeficijent valjanosti ZS, v	1	0,9	0,8	0,7	0,7
$\sigma_{\text{doz.}}$, MPa	98,67	98,67	98,67	98,67	118,4
s_{min} , mm	6,18	6,73	7,41	8,29	7,12
Resurs	+15%	+6%	-4%	-14%	-0%
Vrsta proračuna: za trenutne radne parametre					
Veličina	Ulazni podaci: $D_s=323,9\text{mm}$; $s=7,1\text{mm}$; $p=2,4\text{ MPa}$; $T=325^\circ\text{C}$;				
stepen sigurnosti, s	1,5	1,5	1,5	1,5	1,25
koeficijent valjanosti ZS, v	1	0,9	0,8	0,7	0,7
$\sigma_{\text{doz.}}$, MPa	98,67	98,67	98,67	98,67	118,4
s_{min} , mm	5,59	6,08	6,69	7,46	6,43
Resurs	+27%	+17%	+6%	-5%	+10%

Na osnovu prikazanih rezultata, uz variranje koeficijenta valjanosti zavarenog spoja, i u slučaju projektnih i radnih parametara, ustanovljeno je da je prihvatljiv resurs u debljini zida, dobijen za najniži koeficijent valjanosti $v=0,7$ za stepen sigurnosti od 1,25.

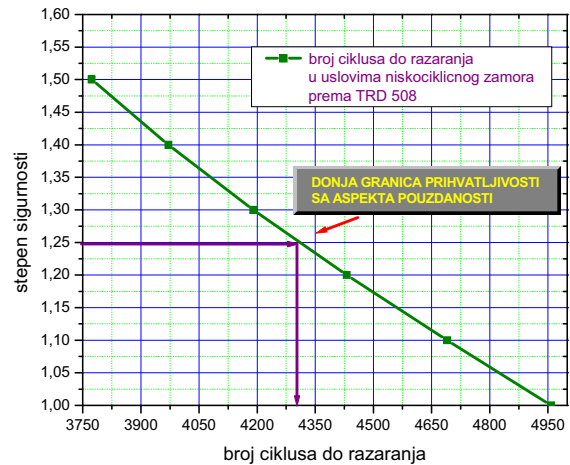
Eksploataciona upotrebljivost parovoda sa aspekta uticaja korozionih oštećenja [2,3]. U cilju utvrđivanja uticaja prisutnih korozionih oštećenja na pouzdanost rada cevovoda, za postojeće dimenzije i uslove rada, kao i projektne parametre napravljen je dijagram pucanja/curenja cevi, slika 6. Ovim dijagramom se u osnovi proverava da li cevovod sa postojećim korozionim oštećenjem ima eksploatacionu upotrebljivost i da li može da mu se garantuje siguran rad. Izrada ovakvog tipa dijagrama je vrlo značajna za cevovode velikih dužina i omogućuje praćenje njegovog pouzdanog rada sa najmanjim brojem ispitivanja. Ovakvi dijagrami, slika 6, uobičajeno sadrže pet oblasti mogućeg rada cevi sa korozionim oštećenjima na unutrašnjoj i spoljašnjoj površini: 1) oblast sigurnog rada – proverava se u odnosu na napon koji izazivaju radni uslovi; ovo je najstroži limit koji garantuje da su sva oštećenja pouzdana za rad; 2) oblast monitoringa oštećenja - ukoliko je oštećenje takvih dimenzija da je napon u zidu cevi nešto veći od radnog napona, propisuju se mere periodičnog praćenja i moguće je računati na pouzdan rad; 3) oblast reparacije – prisutna oštećenja svojim dimenzijama izazivaju napon u zidu cevi blizak dozvoljenom naponu ali je moguće izvršiti popravku pre pucanja cevi, čime se deonici sa oštećenjem vraća pouzdanost za dalji rad; 4) oblast zamene – napon u zidu cevi veći od dozvoljenog ali ipak manji od izdržljivosti materijala; prisutna oštećenja iz ove oblasti odgovaraju nepouzdanom radu pa se smatra da ih je potrebno odstraniti zamenom oštećene deonice; 5) oblast pucanja cevi - može da dođe do pucanja cevi sa većim štetnim posledicama. Na dijagramu, slika 6, su uneta samo očitavanja korozionih oštećenja najvećih dimenzija otkrivenih na uzorcima U1 i U4, koja ukazuju da ispitani cevovod ima značajniju pouzdanost u radu sa aspekta korozionih oštećenja (oblast 1).

Eksploataciona upotrebljivost cevovoda sa aspekta niskocikličnog zamora - određena za trenutne radne parametre u funkciji stepena sigurnosti i na osnovu proračuna prema TRD normama serije 508, slika 7. Prema ovom proračunu cevovod ima značajniji resurs sa aspekta niskocikličnog zamora i za propisani stepen sigurnosti može da izdrži još 3750 ciklusa prelaza

iz stanja konzervacije u radno stanje kada isporučuje paru radnih parametara i radnog pritiska (radni ciklus) do razaranja. Realno, sudeći po stanju materijala, broj ciklusa dobijen na osnovu proračuna sa koeficijentom sigurnosti od 1,5 daje veliku zaštitu pa je i dobijena vrednost radnih ciklusa do razaranja konzervativno određena. Granična vrednost broja radnih ciklusa, koja odgovara elementima najnižeg kvaliteta za koeficijent sigurnosti 1,25 iznosi ~ 4300 ciklusa do razaranja.



Slika 6 Dijagram pucanja/curenja cevi d-dubina oštećenja; s-debljina zida



Slika 7 Broj ciklusa do razaranja u funkciji stepena sigurnosti i niskocikličnog zamora

4. Umesto zaključka

Za cevovode sa dugom trasom je zbog specifičnosti konstrukcije program održavanja složen pošto moraju da se uzmu u obzir svi mogući mehanizmi, ne samo oštećivanja (korozija, niskociklični zamor, ...) nego i moguće varijacije u parametrima rada zbog otežane kontrole i nedostatka adekvatne merno-regulacione opreme. S toga je u okviru programa održavanja predložena obavezna upotreba:

1. Kontrolnog lista za periodična ispitivanja na cevovodu i
2. Kontrolnog lista za slučaj otkaza elementa cevovoda

koji u svakom trenutku mogu da pruže nedvosmislene podatke o stanju cevovoda. Kontrolni list bi trebalo da se sastoji iz dva dela: opšteg dela koji se odnosi na jednu tačno definisanu deonicu (prirodna podela prema trasi) sa skicom te deonice i svim detaljima i pojedinačnog dela koji se odnosi na svaki element cevovoda te deonice pojedinačno. Oba ova lista popunjavaju inženjeri održavanja, a treba da obuhvate podatke o rezultatima ispitivanja, dijagrame pucanja/curenja cevi koji se stalno koriste i na osnovu kojih se određuje u kojoj oblasti se cevovod nalazi. Kada su oštećenja takve veličine da se dostiže oblast 4 ili 5 donose se odluke o blagovremenim popravkama odnosno zamenama.

Literatura

- [1] V. Šijački, G.Bakić, M.Đukić, et al: *Utvrđivanje trenutnog stanja na osnovu ispitivanja uzoraka i ocena dalje eksploatacione upotrebljivosti parovoda TE Kostolac A – TE Kostolac B sa planom preventivnog održavanja*, Izveštaj 12-05-12.04/2004, Mašinski fakultet Beograd
- [2] David Jones et al: *Pilot Study Demonstrates Benefits Of Pipeline Inspection And Risk Assessment Pipeline & Gas Journal* December, 1999
- [3] Levin, M.A., Kalal, T.T.: *Improving Product Reliability—Strategies and Implementation*, Wiley, 2003.