



¹Sead Avdić

PROGRAM PRAĆENJA DEGRADACIJE MATERIJALA U EKSPLOATACIJI I PROCJENA SIGURNOSTI KONSTRUKCIJE ZA PRODUŽENJE ŽIVOTNOG VIJEKA MONITORING PROGRAM FOR MATERIAL'S DEGRADATION DURING EXPLOATATION AND ASSESSMENT OF STRUCTURE SAFETY FOR LIFETIME EXTENSION

Originalni naučni rad / Original scientific paper

Rad je u izvornom obliku objavljen u Zborniku sa 4. IIW Kongresa zavarivanja Jugoistočne Evrope „Safe Welded Construction by High Quality Welding“ održanog u Beogradu 10-13. Oktobra 2018

Rad primljen / Paper received:

Januar 2019.

Ključne reči: parni kotao, cijevni sistem, stanje materijala, ispitivanje, proračun, nivo degradacije, puzanje, visoka temperatura

Sažetak

Praćenje i procjena stanja materijala cijevnih sistema koji rade na povišenim temperaturama, vršeno je na osnovu proračuna teoretskog radnog vijeka elemenata parovaoda koji se zasniva na proračunu degradacije materijala usljed puzanja i malocikličnog zamora. Ovaj rad prikazuje program koji se posebno koristi za praćenje ponašanja materijala u cijevnom sistemu u eksploataciji. Program se temelji na proračunu maksimalnog naprežanja u stijenci pojedinog elementa parovoda, a zavisi od izmjerenih temperature i pritisaka, kao i izmjerenih najmanjih debljina stijenke tog elementa. Na taj način moguće je izračunati ukupan nivo degradacije materijala. Ispitivanja su rađena na kotlovskom postrojenju u TE Tuzla, Bosna i Hercegovina. Ovakvim načinom praćenja i ispitivanja materijala stvara se osnova za pravovremeno donošenje odluke o popravkama, sanaciji, zamjeni ili revitalizaciji postrojenja ili kritičnih komponenata, što može rezultirati produženjem vijeka trajanja.

1. Uvod

Tehnički propisi za parne kotlove utvrđuju određena mjerenja i ispitivanja za vrlo opterećene konstrukcijske elemente tokom proizvodnje i eksploatacije:

- mjerenje radi utvrđivanja geometrije,
- ispitivanja bez razaranja u proizvodnji i pogonu,
- ispitivanja bez razaranja strukture materijala,
- mjerenja radi utvrđivanja zaostalog naprežanja,
- računsko praćenje iscrpljenosti materijala.

Vrlo opterećeni konstrukcijski dijelovi definisani su kao dijelovi od kojih se uz uticaj temperature,

Adresa autora / Author's address:

¹Institut za zavarivanje d.o.o. Tuzla, Bosne Srebrene br. 6, Bosna and Hercegovina
avdic.inz@gmail.com

Key words: steam boiler, pipe system, material condition, examination, calculation, level of degradation, crawl, high temperature

Abstract

Details of evaluation and tracking the material condition of steam boiler's pipe system, which work on high temperature was made on the basis calculations of theretically working age of the steam line's element. This calculation presents calculation of material degradation caused by crawling and small periodic fatigue.

This work show a program, especially used for tracking the material's behavior of pipe system in exploitation. This program was based on the calculation of maximal effort in the wall of each steam line's part. This calculation dependens from the measure of temperature, preasure and the smollest tickness of wall this elements. In that way is possible to make the total level of material degradation. It can be concluded that this way of tracking and calculation presents the basis for a timely decision about repair, sanation, exchange or plant revitalisation or critical components, which can make it's longer lived extension.

1. Introduction

Technical regulations for steam boilers establish the determined measurement and testing of very burdened constructional elements during the production and exploitation:

- measurement because of the establishing of geometry,
- testing without the destruction in the production and plant,
- testing without the destruction of structure of material,
- measurements because of the establishing of rest of tensions,
- the computer tracking of material weariness.



unutrašnjeg pritiska, vanjskih sila i momenata, vibracija, ugrađenih osobina materijala očekuje i najmanji vijek trajanja.

Pod uticajem visoke temperature i napreznja toplinski otporni materijali reaguju puzanjem koje se očituje u trajnoj deformaciji metalnog dijela. Na kraju osim trajne deformacije ovaj proces se očituje i pojavom pukotina na vanjskoj površini konstrukcijskog dijela. Lukovi, T i Y komadi, kao i zavareni spojevi predstavljaju kritične tačke parovoda.

Procjena stanja materijala usljed trajnog napreznja kod povišenih temperatura (puzanje) kod kotlova u eksploataciji može se pratiti uz pomoć odgovarajućeg računarskog programa. Redovnom konstatacijom promjena na materijalima moguća je ocjena stanja materijala i prirast degradacije (kompjuterizacija informacija).

2. Program praćenja stanja materijala cijevnog sistema kotla u eksploataciji

Praćenje i ocjena stanja materijala parovoda koji radi pri povišenim temperaturama, vršena je na osnovu proračuna teoretskog radnog vijeka elemenata parovoda koji se zasniva na proračunu degradacije materijala usljed puzanja i malocikličnog zamora. Kod elemenata gdje je materijal izložen stalnom opterećenju usljed pritiska vrši se proračun na puzanje, a kod elemenata izloženih raznim cikličnim napreznjima (hladni i topli startovi, nagle promjene temperature, promjene opterećenja, pritiska i td.) i proračun od malocikličnog zamora materijala. Ukupna degradacija materijala se dobiva sabiranjem pojedinačnih stepeni degradacije:

$$e_u = e_z + e_c \dots(1)$$

pri čemu je :

e_z – degradacija materijala usljed trajnog napreznja pri povišenim temperaturama,

e_c – degradacija materijala usljed izmjeničnog napreznja.

Very burdened constructional parts defined as parts from which beside the influence temperatures, the internal pressure, outer force and moments, vibration, built-in characteristic of materials expects and smallest life cycle. Heat resistant materials under the influence of high temperature and tensions make reactions by crawling which manifests itself in the permanent deformation of metal part. In the end besides the permanent deformation this process manifests itself and appearance crack on the outer surface of constructional part. Bows, T and Y pieces, as well as are welded connections present critical points of steam pipe lines. Evaluation of state of material caused of permanent tensions by raised temperatures (the crawling) at boilers in the exploitation were able accompany with the aid the suitable computer program. The regular statement change on materials is possible to evaluate of state of material and degradations will grow (computerizations of information).

2. Materials states of boiler pipe system tracking program (in the exploitation)

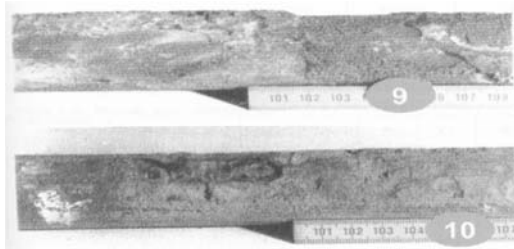
Tracking and evaluations of state of material of steam line which works by raised temperatures, has been performed on the basis of calculates the theoretical working life of elements of steam lines which bases on the budget of degradation of material because the crawling and low-cycle fatigue. By elements where the material has been displayed continuous load because of the presses is performed the budget on the crawling, and by elements displayed different cyclic tension (turns cold and warm starts, rash changes of temperature, load variations, presses and td.) and budget from the low-cycle fatigue of material. Total degradations of materials get collection of the single degradations:

$$e_u = e_z + e_c \dots(1)$$

by what is:

e_u - degradations of materials because the permanent tension on raised temperatures,

e_c - degradations of materials because of alternate tensions.



Slika 1. Vizuelni pregled cijevi (10CrMo 9-10)
Figure 1. Visual inspection of pipes (10CrMo 9-10)



2.1 Stepen degradacije usljed trajnog naprezanja pri povišenim temperaturama (puzanje)

Određivanje stepena degradacije teorijskog životnog vijeka temelji se na proračunu maksimalnog naprezanja u stijenci pojedinog elementa parovoda, koje proizlazi od izmjerenih temperatura i pritiska, kao i izmjerenih najmanjih debljina stijenke tog elementa. Na ovaj način se u razmatranje uzimaju najslabija mjesta pojedinih elemenata parovoda.

Na osnovu izračunate vrijednosti pogonskog naprezanja iz dijagrama vremenske čvrstoće za odgovarajući materijal i radnu temperaturu na donjoj graničnoj krivulji pojasa vremenske čvrstoće ($0,8 \cdot$ srednja vrijednost, što znači da se radi s minimalnim radnim vijekom) očitava se teorijski radni vijek $Z_{B/9/p}$. Vremenski ovisna čvrstoća je ona čvrstoća materijala koja na početnom presjeku epruvete, podvrgnute mirnom naprezanju na istezanje σ kod temperature q , nakon vremena opterećenja t rezultira lomom epruvete. Degradacija e_z se tvori pomoću pojedinih pogonskih vremena $Z_{9/p}$ i teorijskog životnog vijeka elemenata $Z_{B/9/p}$. Prirast degradacije iznosi Δe_z .

Degradacija zbog dugotrajnog rada na visokim temperaturama za vrijeme pripadajućeg vremenskog perioda dobiva se na osnovu linearnog pravila udjela vijeka trajanja zbrajanjem određenih vrijednosti Δe_z za sve nivoe temperatura (i ako je potrebno pritiska).

$$e_z = \sum \Delta e_z \dots (2)$$

Ako stepen degradacije dostigne vrijednost 100%, to znači da je teorijski radni vijek promatranog elementa iscrpljen, to se mora računati s lomom stijenke. To još ne znači da će lom stvarno i nastupiti, što ovisi o tome gdje se u području vremenski ovisne čvrstoće nalazi vrijednost koja odgovara materijalu posmatranog elementa.

Kritično vrijeme opterećenja tj. vrijeme nakon kojeg se očekuje da će teorijski radni vijek materijala parovoda koji radi pri povišenim temperaturama (iznad $450 \text{ }^\circ\text{C}$) biti iscrpljen, može se produžiti ili skratiti promjenama temperature i pritiska. Pri tome treba napomenuti da temperatura ima znatno veći uticaj.

2.2. Stepen degradacije usljed izmjeničnog naprezanja (malociklički zamor)

Proračun degradacije izmjenično napregnutih dijelova je postupak koji uzima u obzir izmjenično pogonsko naprezanje, posebno kod pokretanja i zaustavljanja. Prilikom određivanja degradacije materijala koristi se niskociklički zamor materijala kod promjenljivog naprezanja, a pri kojem dolazi do

2.1 Degradations level because the permanent tensions on raised temperatures (creep)

Determining of the degradation level of theoretical lifespan bases on the budget of maximal tensions in the wall of single element of steam line, which follows from measured temperatures and pressures, as well as the measured smallest thickness of wall of this element. In this way in the deliberation takes weakest places of single elements of steam lines.

On the basis of computed values of operating tensions from the diagram of time firmness for the suitable material and working temperature on the lower border curve of time firmness ($0,8 \cdot$ the average, what mean that works with the minimal working life) manifests the theoretical working life $Z_{B/9/p}$. Temporally the dependent firmness is that firmness of material which on the start cut test tubes, are submitted to still tensions on the stretching out with the code temperatures q , after load times t result the breakdown test tubes. Degradation e_z creates using single operating times $Z_{B/p}$ and theoretical lifespan of elements $Z_{B/9/p}$. Will grow together degradations bring out Δe_z .

Degradation because of the long-lasting work on fevers during the belonging half-life gets on the basis of the linear rule thread the life cycle addition of determined values Δe_z for all levels temperature (and if is necessary pressures).

$$e_z = \sum \Delta e_z \dots (2)$$

If degradations level reach the value 100 %, this means that the theoretical working life of observed element has been exhausted, this must will count with the breakdown walls. This not as yet means that the breakdown really and will appear, what depends on this where in the area temporally the dependent firmness finds value which answers the material of mentioned element.

Emergency loads i.e. the time after which expect that the theoretical working life of material of steam line which works by raised temperatures (above $450 \text{ }^\circ\text{C}$) has been exhausted, was able will extend or will shorten changes temperatures and presses. By this needs mention that the temperature has considerably the larger influence.

2.2 Degradations level because of the alternate tension (the low-cycle fatigue)

Degradations calculation of alternate tensed parts is procedure, which takes into consideration, alternate operating tensions, especially by the starting and stopping. On the occasion of the determining degradations of material uses the low-cycle fatigue of material by changeable efforts, and



pojave pukotina nakon n_k ciklusa i kod zadane temperature.

Za svaku klasu proračunava se širina izmjeničnog naprezanja $\Delta\sigma_i$ s gornjim graničnim vrijednostima širine promjene temperature i pritiska.

Na osnovu veličina $\Delta\sigma_i$ izračunava se širina naprezanja ($2 * \sigma_a$) posebno za elastično i plastično područje. Iz dijagrama za veličinu $2 * \sigma_a$ i temperaturu očitava se broj promjena opterećenja n_k koji dovodi do loma. Za svaki slučaj promjenljivog opterećenja (hladni start, topli start i sl.) računa se prirast degradacije Δe_c . Ukupna degradacija zbog promjenljivog opterećenja e_c dobiva se prema linearnoj hipotezi akumulacije oštećenja iz pojedinih degradacija.

$$e_c = \sum \Delta e_c \dots(3)$$

Budući da su elementi parovoda relativno tankih stijenki, maksimalne temperaturne razlike po debljini stijenke koje određuju iznos toplinskih naprezanja male, pa su i naprezanja mala, iznosi degradacije životnog vijeka materijala malocikličkog zamora su zanemarivo mali.

3. Računarski model

Naprezanje se računa na osnovu radnog pritiska i izmjerenih debljina stijenki (prema izvještajima o obavljenim ispitivanjima). Propis TRD-508 propisuje da se dosadašnji period pogona podijeli u nivoe pritiska i temperatura kojima se onda pridružuju odgovarajuća naprezanja i degradacije te se sumiranjem pojedinačnih degradacija dolazi do ukupne degradacije. Radi efikasnijeg praćenja i ocjene stanja materijala u eksploataciji urađen je računarski model (RunLu, RunYk, RunTk), a odnosi se na procjenu stanja materijala za lukove, Y i T komade.

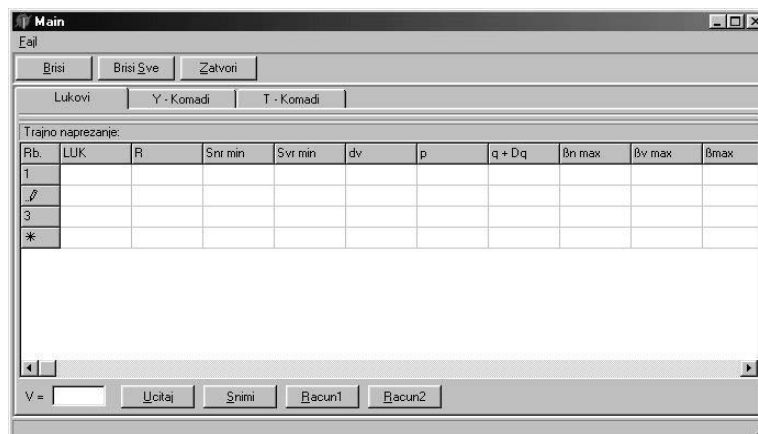
by which comes to the appearance crack after the n_k of cycle and by the given temperature. For the every class estimates the width of alternate tension $\Delta\sigma_i$ with upper boundary values of width changes of temperature and presses. On the basis of the size $\Delta\sigma_i$ calculates widths of tension ($2 * \sigma_a$) especially for elastically and plastic area. From the diagram for the size $2 * \sigma_a$ and temperature manifests the number of load variations n_k which adds up to the breakdown. For the every case of changeable load (the cold start, warm start similarly.) counts will grow together degradations Δe_c . The total degradation because of the changeable load e_c gets towards the linear hypothesis of accumulation of damage from single degradations.

$$e_c = \sum \Delta e_c \dots(3)$$

Since are elements of steam line relatively thin walls, the maximal temperature difference along the thickness walls which determines the amount of heat tension small, so are and efforts small, brings out the degradation of lifespan of material of low-cycle fatigue are neglectfully small.

3. The computer model

Strives reckons upon the base of working pressure and measured thickness of walls (towards reports about the done testing). Regulation TRD-508 prescribes that the past time of plant divided in levels of pressures and temperatures, which then join suitable efforts and degradation, this sum up single degradations comes to the total degradation. Because of the more efficient tracking and evaluations of state of material in the exploitation has been done the computer model (RunLu, RunYk, RunTk), and carries off on the evaluation of state of material for bows, Y and T piece.



Slika 2. Interpretacija programa za izračunavanje stepena degradacije materijala LUKOVA, Y i T komada(%)
Figure 2. Interpretations of programs for the calculation of the degradation level of material of L, Y and T carves to pieces (%)

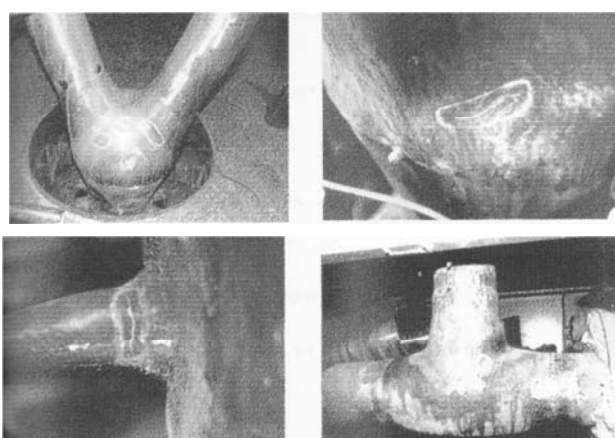


Legenda :

R – radijus simetrale luka,
 snr min - min izmjerena debljina stijenke na unutrašnjoj izvodnici luka,
 svr min - min izmjerena debljina stijenke na vanjskoj izvodnici luka,
 dv - vanjski promjer cijevi,
 p – radni pritisak,
 q + D – radna temperatura uvećana za dodatak zbog netačnosti mjerenja,
 βn max – naprezanje na unutarnjoj izvodnici luka,
 βvmax – naprezanje na vanjskoj izvodnici luka,
 βmax – max (β nmax, β vmax),
 ZB/q/p – teoretski životni vijek,
 Zq/p – stvarni radni vijek,
 Dez-stepen degradacije za određene pogonske parametra (%),
 ez - ukupni stepen degradacije usljed trajnog naprezanja na lukovima (%).

Legend:

R radius of center line of bow,
 Snr min min of the measured thickness of wall on the internal generatrix port,
 svr min min of the measured thickness of wall on the outer generatrix port,
 dv external diameter to the pipes,
 p the working pressure,
 q + D the working temperature is enlarged for the supplement because of measurements error
 βn max efforts on the inner generatrix port,
 βvmax efforts on the outer generatrix port,
 βmax max (β max, β max),
 ZB/q/p the theoretical lifespan,
 Zq/p the real working life,
 Dez-degradations level for the determined operating parameter (%),
 ez - total are shaken degradations because permanent efforts on L (%).



Slika 3. Pukotine otkrivene magnetnom metodom (Y i T komadi)
Figure 3. Cracks detected by the magnetic method (Y ant T pieces)

Rb,	LUK	R	Snr min	Svr min	dv	p	q + Dq	βn max	βv max	βmax	ZB/q/p	Zq/p	Dez	ez %
1	L.11	1600,0	17,6	15,1	426,0	2,39	545	28,271	33,157	33,157	1897	120	6,326	6,326
2	L.12	1600,0	17,5	16,0	426,0	2,39	545	28,44	31,222	31,222	2030	120	5,911	5,911
3	L.13	1600,0	18,3	14,4	426,0	2,39	545	27,142	34,83	34,83	1534	120	7,823	7,823
4	L.15	1600,0	18,5	16,2	426,0	2,39	545	26,835	30,822	30,822	2633	120	4,558	4,558
5	L.16	1600,0	16,6	14,7	426,0	2,39	545	30,049	34,094	34,094	1564	120	7,673	7,673
6	L.17	1600,0	16,9	14,5	426,0	2,39	545	29,493	34,581	34,581	1560	120	7,692	7,692
7	L.19	1600,0	17,4	15,0	426,0	2,39	545	28,61	33,387	33,387	1835	120	6,54	6,54
8	L.20	1600,0	17,7	15,0	426,0	2,39	545	28,104	33,387	33,387	1841	120	6,518	6,518
9	L.21	1600,0	16,8	14,4	426,0	2,39	545	29,676	34,83	34,83	1509	120	7,952	7,952
10	L.23	1600,0	17,4	16,2	426,0	2,39	545	28,61	30,822	30,822	1981	120	6,058	6,058
11	L.24	1600,0	16,1	14,7	426,0	2,39	545	31,021	34,094	34,094	1357	120	8,843	8,843
12	L.25	1600,0	16,4	14,6	426,0	2,39	545	30,431	34,336	34,336	1477	120	8,125	8,125
13	L.17	2100,0	20,1	16,3	508,0	2,39	545	29,575	36,759	36,759	1159	120	10,354	10,354
14	L.18	2100,0	21,1	17,2	508,0	2,39	545	28,114	34,771	34,771	1501	120	7,995	7,995
15	L.15	1100,0	26,9	25,0	219,0	13,53	545	49,159	53,43	53,43	468	120	25,641	25,641
16	L.26	1100,0	26,8	24,6	219,0	13,53	545	49,368	54,413	54,413	458	120	26,201	26,201
17	L.56	1100,0	30,6	26,2	219,0	13,53	545	42,363	50,66	50,66	661	120	18,154	18,154
18	L.60	1100,0	29,9	26,4	219,0	13,53	545	43,32	50,223	50,223	672	120	17,857	17,857
19	L.3	1250,0	34,8	31,8	273,0	13,53	545	47,112	52,221	52,221	537	120	22,346	22,346
20	L.6	1250,0	33,8	31,4	273,0	13,53	545	48,714	52,976	52,976	476	120	25,21	25,21
21	L.36	1600,0	40,4	37,1	324,0	13,53	545	48,32	53,244	53,244	496	120	24,194	24,194
22	L.38	1600,0	39,6	35,8	324,0	13,53	545	49,438	55,434	55,434	450	120	26,667	26,667

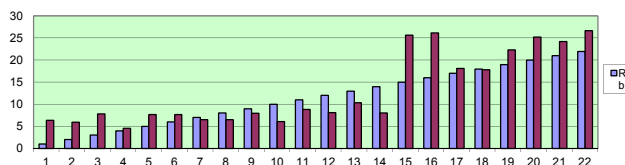
LUKOVI

Tabela 1. Izračunavanje stepena degradacije usljed trajnog naprezanja (puzanje) pri radu na povišenoj temperaturi materijala cijevnih LUKOVA cjevovoda vruće međupregrijane i svježe pare

Table 1. Calculation of the degradations level because of the permanent tension (the crawling) by the work on the raised temperature of material pipe ARC pipelines of hot middle-hot and fresh steam

U tabeli 1. su prikazane vrijednosti izračunatog stepena degradacije materijala na cijevnim lukovima. Iz prikazanih rezultata se vidi da najveći stepen degradacije ima luk sa oznakom "38" i to 26,6 % a najmanji stepen degradacije ima luk sa oznakom L15 i to 4,55 %. Na lukovima sa većim stepenom degradacije potrebno je uvesti češća ispitivanja.

In the table 1. present values of the calculated are the degradation level of material on pipe bows. From shown results is seen that biggest are shaken degradations have the bow with the mark "38" and this 26,6 % and smallest is shaken degradations have the bow with the mark L15 and this 4,55 %. On bows with larger degradations level is necessary brings in the more frequent testing.



Slika 4. Dijagram degradacije materijala pojedinih cijevnih LUKOVA (%)

Figure 4. Diagram of degradation of material single pipe L (%)

Na dijagramu (slika 4) su grafički prikazane ukupne vrijednosti degradacije materijala posmatranih cijevnih lukova. Lukovi cjevovoda vruće međupregrijane pare (1-14), imaju maksimalne vrijednosti do 10%, dok kod lukova na cjevovodima svježije pare (15-22), stepen degradacije se kreće i do 27%.

4. Zaključak

Uspješnost produženja vijeka korištenja energetskih postrojenja u osnovi se svodi na problem pravovremenog uočavanja oštećenja i utvrđivanja dinamike njihova rasta. Dinamika rasta oštećenja se može uspješno pratiti samo uz pomoć organizovanog i dosljedno provođenog sistema praćenja ponašanja materijala sistema u eksploataciji. Na osnovu takvog sistema na konkretnom kotlovskom postrojenju mogu se istražiti i utvrditi zakonitosti rasta vrlo upečatljivih i jasnih oštećenja i ocijeniti vrijeme postizanja dopuštenih i kritičnih veličina. Ispitivanja koja su vršena na uzorcima cijevnih sistema su ukazala na mogućnost dalje primjene materijala cijevnih lukova, Y i T komkada u eksploataciji i stepen degradacije materijala, a uvođenjem baze podataka kroz praćenje promjena na materijalima stvorila bi se mogućnost za ocjenu stanja materijala i prirast degradacije. Ovakvim načinom praćenja i ispitivanja materijala, stvara se osnova za pravovremeno donošenje odluke o popravcima, sanacijama, zamjeni ili revitalizaciji postrojenja ili kritičnih komponenti, a to znači produženje vijeka korištenja.

References

- [1] Malčević S.: Ocjena stanja materijala energetskih postrojenja, EGE, Zagreb, 1993.
- [2] Jakšić S.: Kritična točka energetske i procesne opreme u eksploataciji, EGE, Zagreb, 1994.
- [3] Juraga I., Ljubić K., Živčić M.: Pogreške u zavarenim spojevima, HDTZ, Zagreb, 1998.
- [4] Jakšić S.: Utvrđivanje i praćenje stanja materijala i zavarenih spojeva energetske i procesne opreme u eksploataciji, Zavarivanje 24, Zagreb, 1981.
- [5] Jakšić S.: Praćenje stanja materijala energetske, procesne i naftne opreme u eksploataciji, EGE, Zagreb, 1993.

On the diagram (figure 4) represent graphically total values of degradation of material of mentioned pipe bows. Arc pipelines of middle-hot steam (1-14), have maximal values to 10 %, while by bows on pipelines fresh steam (15-22), degradations level are up to 27 %.

4. Conclusion

Successfulness of lengthening of service life of power facilities basically boil down to the problem of the timely noticing of damage and establishing of dynamics did their not separate. Dynamics did not separate damages can successfully to accompany only with the aid of the organise and consistently the guided system of tracking material behaviours of system in the exploitation. On the basis of the system on the boiler plant can investigate and establish legalities did not separate very impressive and clear damages and evaluate the time of achieving allowed and critical sizes. Testing which has been performed on samples of pipe systems have pointed on the possibility of farther use material of pipe bows, Y and T pcs in the exploitation and are degradation level of material, and the introduction databases through the tracking change on materials would create the possibility for the evaluation of state of material and will grow together degradations. The such way of tracking and material testing, comes into being established for the timely taking a decision about corrections, improvements, replacement or revitalizations of facilities or critical components, and this means the lengthening of service life.

- [6] Lypolt A.: Važnost pouzdane procjene rezultata ispitivanja u produljenju vijeka trajanja postrojenja, Zbornik radova MATEST 98, Brijuni, 1998.
- [7] Lypolt A.: Istraživanje i praćenje stanja materijala u naftnoj i petrokemijskoj industriji, EGE, Zagreb, 1993.
- [8] Bradley E. F., Ed.: Source Book on Materials for Elevated Temperature Applications, American Society for Metals, 1979.
- [9] Rothman M. F., Ed.: High Temperature Corrosion in Energy Systems, The Metallurgical Society, 1985.