

Določanje preostale življenjske dobe parovodov

Assessment of Residual Lifetime of Steam Pipelines

Vojvodič-Gvardjančič J¹, F. Vodopivec, IMT Ljubljana

Za določanje preostale dobe trajanja parovoda je opisana ekstrapolacijska metoda, ki je zasnovana na kratkotrajnih preizkusih časovne trajne trdnosti. Obdelane so poškodbe parovodov zaradi statičnih in dinamičnih obremenitev. Z računskim primerom na parovodu izdelanim iz 10CrMo 910 je potrjena izbrana metoda za določanje preostale življenjske dobe.

Ključne besede: preostala življenjska doba, kratkotrajni preizkus časovne trdnosti, ekstrapolacijska metoda

In this article an extrapolation method is described, which is aimed at assessing the residual lifetime of steam pipelines. This method is based on short-term tests. The damages of pipelines due to static and dynamic loads are presented. A numerical example on steam pipeline made of 10CrMo 910 confirms that the selected method produces reasonable results.

Key words: residual lifetime, accelerated creep test, extrapolation method

1. Uvod

Projektne karakteristike in obratovalni pogoji parovodov v termoelektrarnah kažejo, da je potreba po ocenitvi preostale uporabne dobe konstrukcijskih elementov pomembna za zanesljivo in ekonomično obratovanje.

Mikrostruktura obremenjenega strojnega dela, ki obratuje pri visokih temperaturah, se sčasoma spremeni. Zaradi lezenja se pojavijo ireverzibilne poškodbe; na mejah zrn se tvorijo pore in nastanejo mikrorazpoke, ki vodijo k prelomu. Nastajajo tudi spremembe mikrostrukture z izločanjem in koagulacijo karbidov ali zaradi tvorjenja novih faz. Te poškodbe materiala zaradi lezenja so odvisne od temperature in obremenitve, te pa se v obratovanju lahko tudi spreminjajo in zato niso vselej določljive. Poleg obremenitev zaradi tlakov in temperature, so parovodi izpostavljeni tudi oksidaciji in koroziji. Jeklo je odporno proti oksidaciji do cca 580°C. Oksidna plast skaje zavira hitro napredovanje oksidacije. Nekateri elementi v pepelu in dimnih plinih, zlasti žveplo, močno pospešujejo korozijske procese. Jeklo na notranji površini cevi reagira s kisikom iz vode in pare in nastane zaščitna magnetitna plast. Pri neustrezno pripravljeni vodi nastajajo korozijske poškodbe. Določene komponente pa so izpostavljene korozijskim procesom v času, ko ti ne obratujejo. Tem poškodbam se pridružujejo še poškodbe zaradi termičnih napetosti zaradi nihanja temperatur med obratovanjem, pri zagonih in zaustavitvah, kar tudi močno vpliva na dobo trajanja parovodov. Poznati moramo dejansko mikrostrukturno stanje materiala. Za določitev mikrostrukturnega stanja imamo na voljo neposredno metodo metalografskega opazovanja s pomočjo odvzemanja replik, medtem ko določanje preostale življenjske dobe lahko opravimo z različnimi kratkotrajnimi mehanskimi preizkušnji pri povišanih temperaturah in z ekstrapolacijo dobljenih odvisnosti do obremenitev in temperatur v eksploataciji.

2.0 Teoretični del

Parovodi so konstrukcije, ki so poleg osnovne obtežbe z notranjim tlakom in temperaturo, ki se lahko spreminja, obremenjeni tudi z lastno težo in zaostalimi napetostmi zaradi varjenja. Parovodi se projektirajo na neko vnaprej dogovorjeno življenjsko dobo, na primer 10^5 ali $2 \cdot 10^5$ ur. Zaradi neenakomerne porazdelitve napetosti pa življenjska doba vseh elementov parovoda ni enaka¹.

V parovodih najdemo tri vrste poškodb². To so napake pred začetkom eksploatacije, poškodbe, ki nastanejo v začetku eksploatacije in poškodbe, ki so posledica režima eksploatacije. Na **sliki 1** je prikazano vrednotenje poškodb jekla v odvisnosti od trajanja statične obremenitve¹⁻³, oz. faze deformacije jekla z lezenjem. Proti koncu obdobja, ko se jeklo deformira s



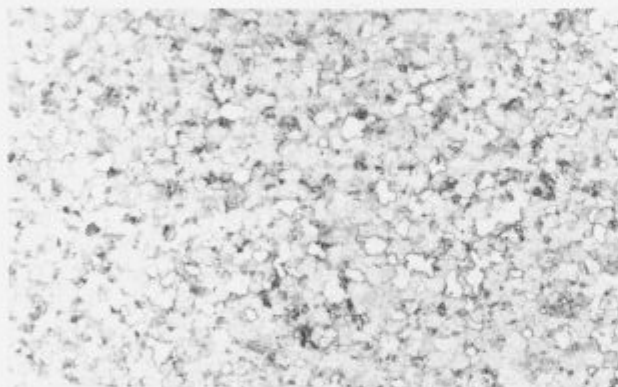
Slika 1: Poškodbe v jeklu v odvisnosti od trajanja deformacije z lezenjem¹

Figure 1: Damages in steel depending on duration of creep deformation¹

¹ dr. Jelena Vojvodič-Gvardjančič, dipl. inž. gradb.
Inštitut za kovinske materiale in tehnologije
Lepi pot 11, 61000 Ljubljana

konstantno hitrostjo lezenja (faza II lezenja), se pojavijo posamične pore po mejah feritnih zrn (faza A). Proces se nadaljuje z nastajanjem novih por in nizov por (faza B). V fazi C se pore povežejo v interkristalne razpoke in jeklo preide v fazo III lezenja, kjer se deformacija pospešuje s časom. V fazi D se proces nadaljuje v mikrorazpoke, ki nato hitro privedejo do zloma. Skelton¹ navaja, da je mogoče pričakovati še cca tri leta normalne eksploatacije parovoda v primeru poškodb vrste A v jeklu. Potem, ko ugotovimo poškodbe vrste B, lahko pričakujemo nemoteno eksploatacijo še cca leto in pol, po fazi C le še cca pol leta, medtem ko je po fazi D potrebna takojšnja sanacija parovoda.

Kljub temu, da so jekla za cevi v toplotno obremenjenih delih parnih kotlov načrtovana in razvita tako, da dolgo časa ohranjajo odpornost proti deformaciji pri temperaturah v kotlu, nimajo popolnoma stabilne mikrostrukture. Začetna mikrostruktura teh jekel kot je 10CrMo 910 je iz visoko popuščene bainita oz. martenzita, vendar z značilno dvofazno razdelitvijo karbidnih precipitativ, ki jih je več v delih mikrostrukture bainitnega in martenzita tipa, manj pa v delih mikrostrukture feritnega tipa. Začetna mikrostruktura jekla 10CrMo 910 je prikazana na **sliki 2 in 3**, na **sliki 4** pa je prikazana mikrostruktura posneta s SEM mikroskopom še pri veliko večji povečavi. Temperatura, na katero je stena cevi ogreta npr. v pregrevalnikih, dosega mejo, pri kateri so že mogoči počasni procesi tvorbe precipitativ iz trdne raztopine ogljika in dušika, torej tudi difuzije teh dveh elementov. Oboje skupaj ima



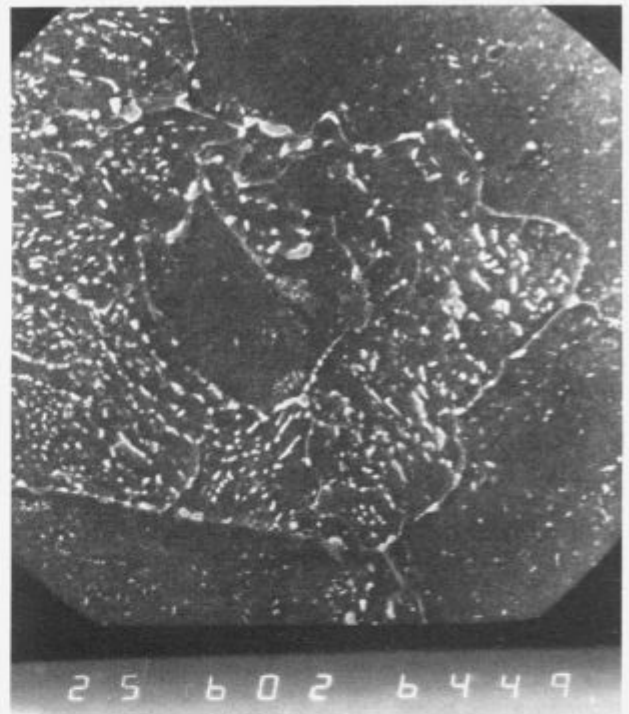
Slika 2: Mikrostruktura jekla 10CrMo 910 iz visoko popuščene martenzita (200 x)

Figure 2: Microstructure of steel 10CrMo 910 from high tempered martensite (200 x)



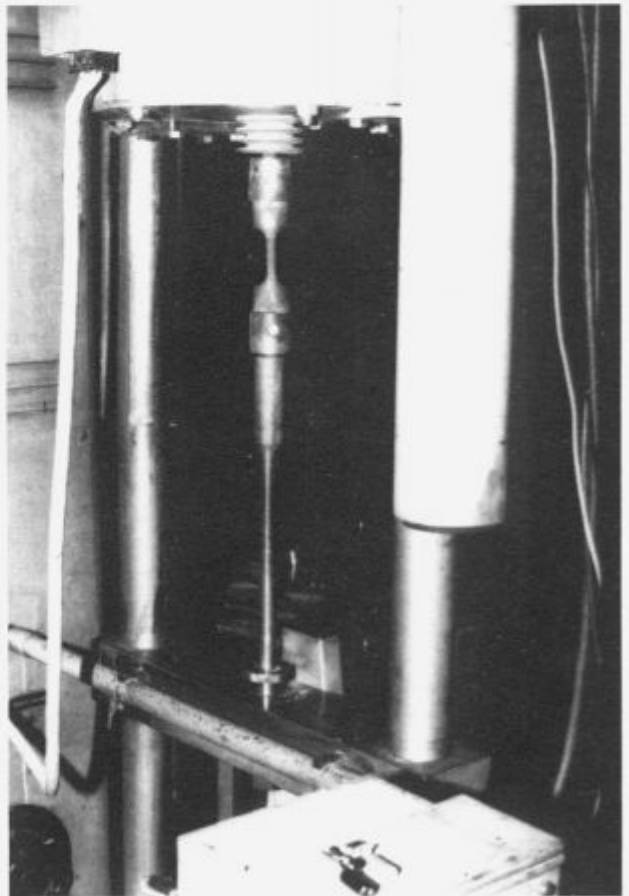
Slika 3: Mikrostruktura jekla 10CrMo 910 iz visoko popuščene martenzita (400 x)

Figure 3: Microstructure of steel 10CrMo 910 from high tempered martensite (400 x)



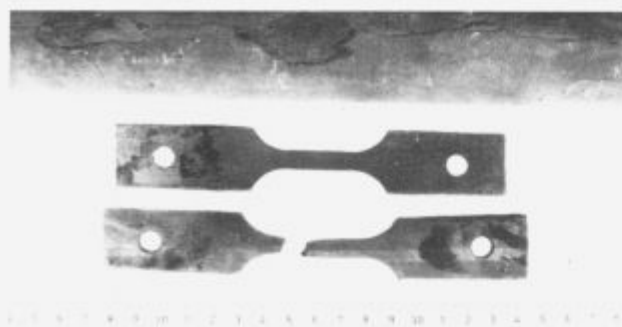
Slika 4: Mikrostruktura jekla 10CrMo 910 slikana s SEM - cev v izhodnem stanju (6000 x)

Figure 4: Microstructure of steel 10CrMo 910 - SEM, pipe in as received condition (6000 x)



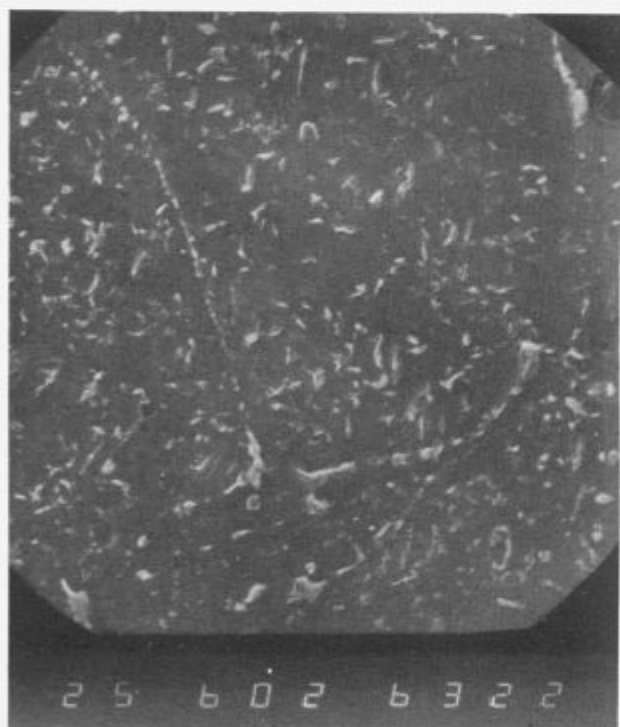
Slika 5: Naprava za preizkus lezenja na IMT

Figure 5: Creep test equipment on IMT



Slika 6: Preizkušanci izdelani iz cevi kvalitete 10CrMo 910 za merjenje lezenja
Figure 6: Specimens for creep testing made of 10CrMo 910

rezultat – rast velikosti v začetku prisotnih izločkov in tvorbo novih izločkov v feritnih zrnih začetne mikrostrukture. Deformacija z lezenjem omogoča pojav gibanja dislokacij, ki s plezanjem obidejo ovire njihovemu gibanju, torej precipitate. Rast precipitativ v delih mikrostrukture, ki so nastali iz bainita oziroma martenzita, zmanjšuje odpornost jekla proti lezenju, nastajanje novih primerno velikih in gosto porazdeljenih precipitativ v feritnih delih začetne mikrostrukture pa odpornost proti lezenju povečuje. Bilanca obeh procesov je, da jeklo ohranja zadovoljivo odpornost proti deformaciji z lezenjem, dokler se ne začne rast precipitativ obeh tipov, začetnih in tistih, ki so nastali med obratovanjem. Ta pojav je mogoče spremljati s preiskavami v elektronskem mikroskopu in z ugotavljanjem mehanskih lastnosti pri delovnih temperaturah (slika 5, 6). Hitri standardni natezni preizkusi pri tem pokažejo manj koristne podatke kot preizkusi pod statično obremenitvijo z merjenjem časa, ko deformacija doseže vnaprej izbrane vrednosti. Mikrostruktura cevi iz jekla



Slika 7: Mikrostruktura jekla 10CrMo 910 slikana s SEM - parovod v eksploataciji 75 000 ur (6000 x)
Figure 7: Microstructure of steel 10CrMo 910, SEM, steam pipe after 75 000 hours of exploitation (6000 x)

10CrMo 910, ki je bila 75 000 ur v obratovanju, slikana s SEM, je prikazana na sliki 7.

Lezenje je pojav, ki je vezan na difuzijo intersticijev ogljika in dušika, ki sta v intersticijski trdni raztopini v feritu, in je eksponentna funkcija temperature. Odpornost proti lezenju se hitro zmanjša, ko kombinacija obremenitve in temperature doseže določeno vrednost, zato sta pri vseh preverjenih stanjih materiala temperatura in obremenitev enakovredna faktorja in tudi nastopata pri ekstrapolacijah, zunaj vnaprej izbranega temperaturnega nivoja.

Praksa pokaže, da pri temperaturi nad 560°C hitro padeta odpornost proti lezenju in odpornost proti oksidaciji, zato moramo včasih pri analizah mikrostrukture vzorcev cevi, ki so bile dlje časa v obratovanju, razlikovati vpliv enega in drugega dejavnika. Predvideva se, da je jeklo popolnoma izčrpano zaradi deformacije, ko se v njegovi mikrostrukturi, običajno na stičiščih treh feritnih zrn, pojavijo mikropore zaradi kondenzacije vrzeli na deformacijsko najbolj šibkih delih mikrostrukture jekla.

Za določitev preostanka uporabnosti parovodov je najboljša metoda, ki dovoljuje direktno, kvantitativno primerjavo s kriterijem, ki mora biti vnaprej podan. V prispevku bo opisana ekstrapolacijska metoda, ki je zasnovana na kratkotrajnih preizkusih časovne trajne trdnosti.

2.1 Določitev preostanka življenjske dobe

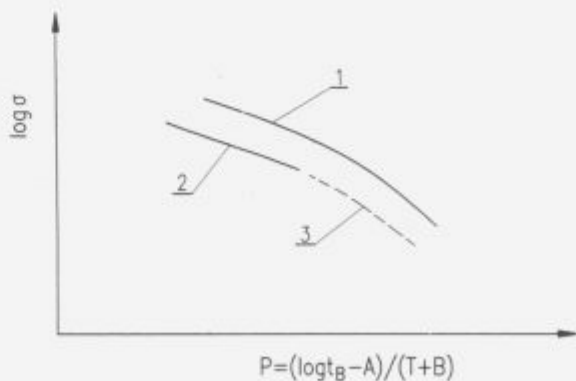
Za določitev preostanka življenjske dobe parovoda je bila izbrana metoda ekstrapolacije rezultatov kratkotrajnih preizkusov časovne trdnosti².

Prostorska odvisnost med napetostjo σ , temperaturo preizkušanja T in časom do porušitve t_B , je izpeljana s parametrom P v dvodimenzijsko odvisnost ($\sigma - P$), pri čemer je parameter P odvisen od temperature t in časa do porušitve t_B . Parameter P ima po Mansonu in Haferdu naslednjo obliko:

$$P = \frac{\log t_B - A}{T + B} \quad (1)$$

kjer sta A in B konstanti materiala, T temperatura preizkušanja merjena v K in t_B čas do porušitve v urah.

Ekstrapolacijska metoda omogoča ocenitev preostale dobe trajanja parovoda, ne da bi poznali izhodiščno stanje preizkušane materiala. Zadoščajo podatki o najmanjši trajni trdnosti materiala, ki je preizkušena tako, kot to zahtevajo predpisi. Konstante materiala A in B so določene iz podatkov o najmanjši časovni trdnosti materiala tako, da parameter P približno ustreza za časovne trdnosti pri 100 000 urah, in pri 200 000 urah obremenitve parovoda.

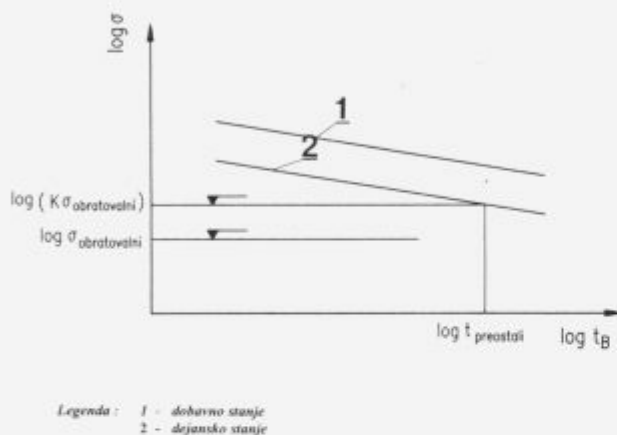


Legenda: 1 - dobavno stanje
2 - dejansko stanje
3 - ekstrapolirani del krivulje

Slika 8: Odvisnost med napetostjo σ in parametrom P
Figure 8: Diagram $\sigma - P$

Tako določena odvisnost ($\sigma - P$) za dobavno stanje, prikazana na **sliki 8**, omogoča približno programiranje kratkotrajnih preizkusov časovne trdnosti materiala, ki je bil v obratovanju.

Kratkotrajne preizkuse časovne trdnosti izvedemo pri najmanj treh različnih temperaturah, pri tem pa izberemo parameter P oziroma ustrezno napetost σ tako, da je čas do porušitve preizkušanca približno 50 ur. Na ta način dobimo neposredno primerjavo med dobavnim in dejanskim stanjem materiala. Na **sliki 8** je prikazano, da kratkotrajni preizkusi časovne trdnosti omogočajo eksperimentalno določiti le levi zgornji del krivulje ($\sigma - P$), preostali del krivulje, ki je na **sliki 8** označen črtkano, pa določimo z ekstrapolacijo.



Slika 9: Odvisnost med napetostjo σ in časom do porušitve t_B za dejansko obratovalno temperaturo

Figure 9: Diagram $\sigma - t_B$ for the exploitation temperature

Na podlagi tako dobljenih podatkov določimo izotermično odvisnost med napetostjo σ in časom do porušitve t_B za dejansko obratovalno temperaturo, kar je prikazano na **sliki 9**. Če v ta diagram vnesemo še obratovalno napetost, oziroma s faktorjem varnosti K povečano vrednost obratovalne napetosti, lahko iz diagrama odčitamo preostalo življenjsko dobo preverjanega parovoda. Obodna obratovalna napetost v MPa lahko določimo takole:

$$\sigma_{\varphi} = \frac{D_z^2 \cdot p}{D_i^2 - D_z^2} \cdot \left[1 + \left(\frac{D_z}{D_n} \right)^2 \right] \quad (2)$$

kjer pomeni D_z zunanji premer parovoda merjen v mm, D_n notranji premer parovoda v mm, p pa je obratovalni tlak v MPa. Če upoštevamo faktor varnosti $K = 1,5$ s katerim pomnožimo obodno obratovalno napetost izračunano z izrazom (2), potem v točki, kjer nivo obratovalne napetosti povečane s faktorjem varnosti K , preseka izotermično premico dejanskega stanja materiala, odčitamo vrednost t_B , to je še preostalo življenjsko dobo parovoda.

3.0 Testni primer

Kemijska sestava jekla je zbrana v **tabeli 1**.

Tabela 1: Kemijska sestava jekla v ut. - %

Vrsta jekla	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al
10CrMo 910	0.13	0.25	0.55	0.013	0.019	2.24	0.09	1.07	0.010

Za parovod izdelan iz 10CrMo 910, ki je bil 75 000 ur v obratovanju pri temperaturi 540°C, določimo konstanti A in B po enačbi (1) tako, da dobimo:

$$P = \frac{\log t_B - A}{T + B} \quad (1)$$

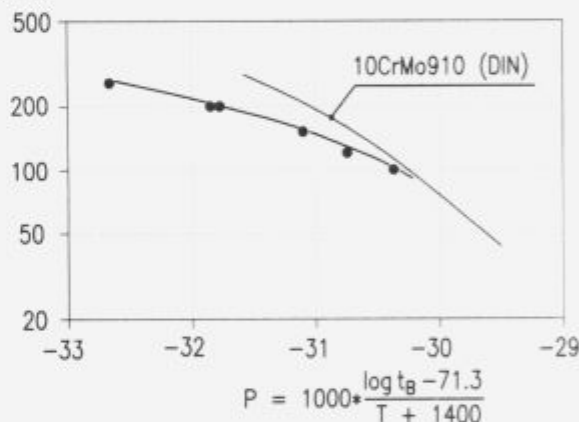
$$P = 1000 (\log t_B - 71,3) / (T + 1400)$$

Rezultati kratkotrajnih preizkusov časovne trdnosti so grafično prikazani v diagramu na **sliki 10**. V diagramu na **sliki 10** izberemo na krivulji A tri točke in določimo izotermično premico ($\sigma - t_B$) za obratovalno temperaturo 540°C = 813 K. Rezultati izbranih točk so zbrani v **tabeli 2** in grafično na **sliki 11**, kjer je vrisana tudi izotermična premica za dobavno stanje materiala 10CrMo 910.

Tabela 2: Določitev izotermičnih vrednosti za parovod izdelan iz 10CrMo 910 pri obratovalni temperaturi 813 K po 75 000 urah obratovanja

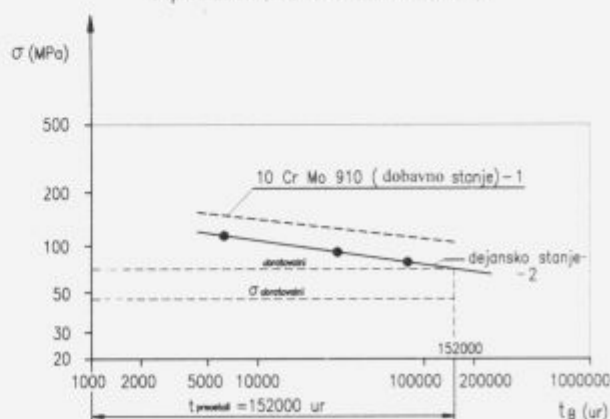
Točka	P_i	$\log t_{B_i}$	t_{B_i}	σ
A1	-30.00	4.91	81283	76
A2	-30.20	4.47	29512	91
A3	-30.50	3.80	6309	109

V diagramu na **sliki 11** je vrisana tudi obodna obratovalna napetost določena z izrazom (2), ki znaša 46 MPa in obodna σ (MPa)



Slika 10: Odvisnost med napetostjo σ in parametrom P za parovod po 75 000 urah obratovanja (pri 540°C in 48 N/mm²)

Figure 10: Diagram $\sigma - P$ for the steam pipe after 75 000 hours of exploitation (at 540°C and 48 N/mm²)



Slika 11: Odvisnost med napetostjo σ in časom do porušitve t_B za parovod po 75 000 urah obratovanja (pri 540°C in 48 N/mm²)

Figure 11: Diagram $\sigma - t_B$ for steam pipe after 75 000 hours of exploitation (at 540°C and 48 N/mm²)

napetost pomnožena s faktorjem varnosti 1,5, ki je 69 MPa. Tako določimo preostalo dobo trajanja parovoda, ki znaša 152 000 obratovalnih ur.

4.0 Sklep

Ocena preostale dobe trajanja cevovoda je po tej metodi dokaj enostavna, vendar pa moramo v kritičnih primerih, ko bi po tej metodi ugotovili, da je preostala življenjska doba trajanja parovoda razmeroma kratka, nujno preveriti časovno trdnost pri parametrih (σ , T), ki so čim bližji obratovalnim, oziroma pri parametrih, ki so enaki obratovalnim.

Literatura

- ¹ F. Vodopivec, O poškodbah jekla v parovodih in metodah za njihovo opredelitev, *Železarski zbornik*, 24, 1990, 3, 145-152
- ² H. J. Shuller, A. Woitscheck, A. Heinz, Unbeheizte dampfführende Rohrleitungen; Allianz handbuck der Schadenverhütung, Allianz AG München, 1979, 195-207
- ³ R. P. Skelton, *Materials Science and Engineering*, 35, 1978, 287-298
- ⁴ I. A. Rosselet, Numerische und statistische Auswertung der Ergebnisse von Zeitstandversuchen, unter anderem mit Berücksichtigung der Gefügeveränderungen während der Prüfzeit, Internationale Tagung der Arbeitsgemeinschaft für warmfeste Stähle, Eigenschaften warmfester Stähle, Düsseldorf, 1972
- ⁵ R. V. Hart, Assessment of remaining creep life using accelerated stress-rupture tests, *Metals Technology*, 3, 1976, 1-7
- ⁶ R. Viswanathan, Residual Life Techniques for Plant life Extension, *Materials Science and Engineering*, A 103, 1988, 131-139
- ⁷ F. H. Van Zyl, Quantifiable Destructive and Non-Destructive Methods for Lifetime Assessments of Eskom's High Temperature Plant, *International Journal Pressure Vessels & Piping*, 50, 1992, 349-370
- ⁸ J. A. Williams, M. C. Coleman, D. J. Walters, Weld Performance Factors for High temperature Welded Components, Proceedings of the Second International Conference on Creep and Fracture of Engineering Materials and Structures, part II., Swansea, UK, 1984, 873-900
- ⁹ J. Žvokelj, F. Vodopivec, D. Kmetič, Investigation on steel tubes failed in long service, 14th Conference on Materials testing in Metallurgy, Balatonaliga, 1991, 108-113
- ¹⁰ J. Žvokelj, F. Vodopivec, D. Kmetič, Uticaj temperature austenizacije na osobine čelika X20CrMoV121 za kotlovske cevi, IV. Jugoslovanski simpozij o metalurgiji, Beograd, JSM 4, 1988, 468-471
- ¹¹ F. Šliber, Ocenitev preostale dobe trajanja elementov, ki obratujejo pri zvišanih temperaturah, *Strojniški vestnik*, 1984, 11-12, 284-287
- ¹² J. Žvokelj, F. Vodopivec, D. Kmetič, Degradacija lastnosti cevi iz legiranih jekel med dolgotrajnimi toplotnimi in mehanskimi obremenitvami, XXXIX. Posvet o metalurgiji in kovinskih gradivih, Portorož, 1988, 185-196
- ¹³ J. Žvokelj, F. Vodopivec, N. Žvokelj, Življenjska doba materialov termoelektričnih naprav, 41. Posvet o metalurgiji in kovinskih gradivih, Portorož, 1990, 315
- ¹⁴ F. Vodopivec, L. Kosec, Trdnostna in metalurška analiza poškodb na membranskih cevnihih stenah visokotlačnega parnega kotla, *Strojniški vestnik*, 1976, 5-6, 131-139