

## O poškodbah jekla v parovodih in metodah za njihovo opredelitev

F. Vodopivec\*\*

UDK: 620.191.33:669.14.018.85:621.16  
ASM/SLA: Q7J, S13, W11n, W13h, SGAh, 9—72

Članek razpravlja o vplivu obremenitve na lastnosti jekla, o napetostih v parovodih, o poškodbah zaradi statičnih in dinamičnih obremenitev ter opisuje metodiko za oceno preostale življenjske dobe. Delo je kritična analiza literarnih podatkov, razširjena z lastnimi spoznanji.

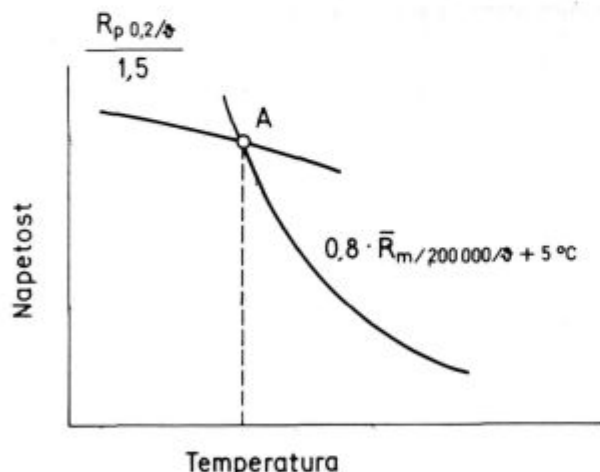
### 1. UVOD

Parovode v termoelektrarnah delimo v dve osnovni vrsti (1)

— parovode, v katerih mehanske lastnosti jekla niso odvisne od trajanja eksploatacije in je zanje parameter proračuna meja plastičnosti in

— parovode, v katerih so lastnosti jekla odvisne od trajanja eksploatacije in za katere je parameter proračuna neka mejna deformacija, na primer 1 %, po določenem trajanju eksploatacije, na primer  $10^5$  ali  $2 \cdot 10^5$  ur.

Meja med obema področjema eksploatacije (slika 1) je definirana z odvisnostjo med mejo plastičnosti ( $R_{p,0.2}$ ) in statično natezno trdnostjo za določen čas (v nadaljevanju časovna trdnost), na primer  $2 \cdot 10^5$  ur, pri temperaturi za  $+5^\circ\text{C}$  nad temperaturo eksploatacije ( $R_m$ , 200000)  $+5^\circ\text{C}$ . V tabeli 1 so po referenci 1 za nekatera jekla za parovode navedene kritične temperature. Pri standard-



Slika 1

Kritična temperatura A, ki razmejuje temperaturo eksploatacije parovodov v območju meje plastičnosti  $R_{p,0.2}$  in statične časovne trdnosti  $R_m$ .

Fig. 1

Critical temperature A which defines the exploitation temperature of steam pipelines in the region of 0.2 % proof stress and creep strength depending on time

nih jeklih je kritična temperatura pod  $500^\circ\text{C}$ , najvišja je pri jeklu 14 MoV 63. Nad kritično temperaturo se jeklo pod statično obremenitvijo počasi deformira z lezenjem (angl. creep). To je proces, ki se odvija s tokom vrzeli v kristalni mreži ferita in povečuje dolžino jekla v smeri zunanje sile. Jekla za parovode so predvsem feritnega tipa in se uporabljajo do temperature ca.  $550^\circ\text{C}$ . Oznaka feritni tip pomeni, da je mikrostruktura iz feritnega matriksa, v katerem so dispergirana zrna karbidnih in nitridnih faz, ki imajo različno obliko in velikost.

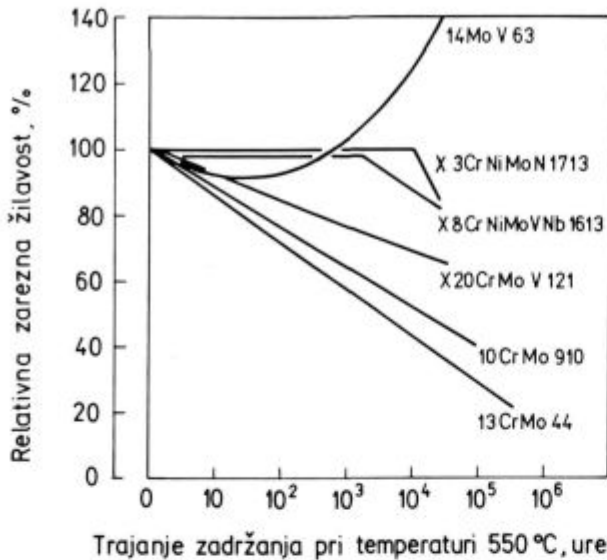
Pri temperaturi nad ca.  $450^\circ\text{C}$  je mobilnost atomov železa v  $\alpha$  mreži (to je kristalna mreža, v kateri so razporejeni atomi železa v feritu) že tolikšna, da se lahko odvija dva osnovna metalurška procesa: eden je sprememba morfologije mikroskopskih in submikroskopskih sestavin mikrostrukture jekla, vzporedno z njo pa tudi precipitacija različnih faz, ki so bile zadržane v trdni raztopini v feritu, drugi pa je že omenjena deformacija jekla z lezenjem. Prvi proces je enak tistemu, ki ga srečamo v popuščanju kaljenega jekla. Razlika je v tem, da je kaljena mikrostruktura zelo neravnotežna, mikrostruktura jekla v parovodu pa toliko ravnotežna, kolikor je mogoče doseči pri tehnologiji, primerni za gospodarsko proizvodnjo. Enostavno povedano, pri popuščanju kaljenega jekla se procesi odvijajo v časovnem razponu, ki ga merimo v urah, pri parovodih pa v časovnem razponu, ki ga merimo v letih ali celo desetletjih.

Zaradi obeh vrst procesov se spreminjajo lastnosti jekla v parovodu, pa tudi v vsaki drugi napravi, ki je izpostavljena mehanski sili nad kritično temperaturo s slike 1. Na sliki 2 je po ref. 3 prikazan vpliv časovne statične obremenitve pri temperaturi  $550^\circ\text{C}$  na žilavost nekaterih jekel za parovode pri temperaturi ambienta. Pri večini jekel se žilavost zmanjšuje skoraj proporcionalno s trajanjem statične napetosti. Izjema je jeklo 14 MoV 63, kjer se žilavost zmanjšuje, po določenem času pa začne rasti. Pri avstenitnih jeklih se žilavost zmanjšuje tem pozneje, čim manj ima jeklo ogljika. To je dokaz, da je vzrok za zmanjšanje žilavosti, precipitacija karbidov po mejah zrn. To oslabi trdnost zveze med njimi in propagacijo razpoke usmeri iz notranjosti kristalnih zrn na njihove meje. Pri jeklih s feritnim matriksom je vzrok za zmanjšanje žilavosti nekoliko drugačen in ga bomo obravnavali v nadaljevanju. Relativno najvišja kritična temperatura, pri kateri so procesi lezenja že toliko učinkoviti, da meje plastičnosti ni več mogoče uporabiti kot izhodišče za proračun, in zadovoljiva žilavost po dolgotrajni eksploataciji sta razloga, da se za parovode zelo pogosto uporablja prav jeklo, vrste 14 MoV 63. Zadnja leta narašča tudi uporaba jekla X 20 CrMoV 121, ki je legiran s 12 % kroma, zato ker je bolj odporno proti oksidaciji z vodno paro in z zgorevnimi plini, kar seveda pomeni, da je manj občutljivo predvsem za kratkotrajna pregrevanja, pri katerih še močno poveča hitrost škajanja jekla.

\*\* dr. Franc Vodopivec, dipl. ing. met. — Metalurški inštitut Ljubljana, Lepi pot 11, 61000 Ljubljana

\*\*\* Originalno objavljeno v ZEZB 24 (1990) 3

\*\*\*\* Rokopis prejet: junij 1990



Slika 2

Vpliv zadržanja pri temperaturi 550° C na žilavost nekaterih jekel za parovode pri sobni temperaturi.

Fig. 2

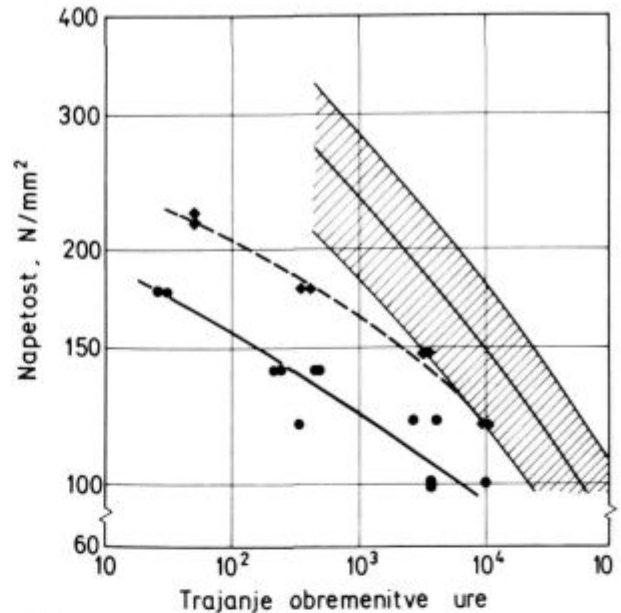
Influence of holding at 500° C on the toughness of some steel for steam pipelines at room temperature

## 2. VPLIV OBREMITVE V PAROVODIH NA LASTNOSTI JEKLA

Rast moči termoelektrarn, z njo rast premera parovodov in želja, da se čim bolj izkoristijo lastnosti jekla, so animirale sistematične raziskave tega problema. Med drugim so te raziskave privedle do tega, da je bila leta 1979 zmanjšana predpisana minimalna vrednost za časovno trdnost pri temperaturi 550° C za jeklo 14 MoV 63 za ca. 1/4 glede na vrednost iz leta 1961 (1). Odločitev je bila sprejeta, potem ko so bili na voljo popolnejši podatki o vplivu dolge časovne obremenitve na lastnosti jekla od tistih, ki so bili na voljo leta 1961.

Prizadevanje, da se podaljša življenjska doba parovodov, ki so dragi sestavni deli termocentral, ter iskanje možnosti, da se pravočasno napove možnost havarije parovodov, pa tudi drugih temperaturno napetostno obremenjenih delov termocentral, so razloga, zakaj se danes posveča toliko pozornosti raziskavam o vplivu toplotne deformacije z lezenjem na lastnosti jekla. Že vpliv začetne toplotne obdelave, torej začetne mikrostrukture, je zelo pomemben. V ref. 4 opisujemo vpliv hitrosti ohlajanja s temperature avstenitizacije (kaljenja) in trajanja popuščenja na statično časovno trdnost jekla 14 MoV 63. V odvisnosti od pogojev termične obdelave je bila po 10<sup>5</sup> urah obremenitve časovna trdnost v razponu med 90 in 115 N/mm<sup>2</sup>, meja 1 % deformacije pa v razponu med 91 do 114 N/mm<sup>2</sup> po 3 · 10<sup>4</sup> urah obremenitve. Tudi minimalna meja je nad tisto, ki o norma iz leta 1979 predpisuje za jeklo, vrste 14 MoV 63, in znaša 68 oz. 75 N/mm<sup>2</sup>. Očitno pa je mogoče pričakovati daljšo in manj moteno delo, če je bila že v začetku izvršena optimalna termična obdelava jekla.

Močan vpliv na časovne lastnosti jekla ima tudi hladna deformacija. Za jeklo, vrste 14 MoV 63, je bilo ugotovljeno, da je kontrakcija po 100 urah obremenitve pri 550° C za okoli 20 %, po 5 · 10<sup>4</sup> urah obremenitve pa celo za ca. 50 % manjša, če je bilo pred preizkušanjem hladno deformirano za 10 %. Razloga je, da so vsi mikrostrukturni procesi, torej precipitacija iz trdne raztopine,



Slika 3

Odvisnost časa do zloma od statične obremenitve pri 550° C za jeklo vrste 14 MoV 63 v dobavnem stanju (srafirani pas) in po različni dolgi eksploataciji.

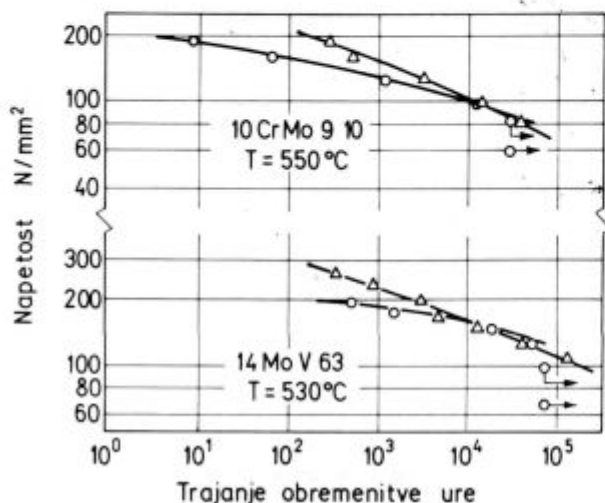
Fig. 3

Dependence of the time till failure on the static load at 550° C for steel grade 14 MoV 63 as supplied (dashed band), and after various periods of exploitation

sprememba oblike in povečanje velikosti karbidnih in nitridnih faz ter difuzija vrzeli mnogo hitrejši v deformiranem jeklu. S hladno deformacijo smo namreč vnesli v kristalno mrežo kovine različne napake, npr. dislokacije in vrzeli, kar pospeši vse procese, ki potekajo z difuzijo v trdnem stanju. Lahko torej ugotovimo, da je pričakovati optimalno obnašanje jekla v parovodu le v primeru, ko je bila izvršena optimalna termična obdelava in je jeklo čim bolj stabilizirano v trenutku vgradnje v parovod. Nekateri avtorji obravnavajo vpliv trajanja eksploatacije parovoda na časovno trdnost jekla in jo primerjajo s tisto pri svežem jeklu, torej takim, ki ni bilo v uporabi. Na **sliki 3** je po ref. 5 prikazana časovna trdnost jekla iz dveh cevi, ki sta v različnih kotlih delali v približno enakih pogojih eksploatacije, in svežega jekla. Obe jekli, ki sta bili v eksploataciji, imata nižjo časovno trdnost, kot sveže jeklo, razlika pa je precej večja pri jeklu, ki je bilo dalj časa v eksploataciji. To je dokaz, da se med eksploatacijo postopoma kopičijo poškodbe v jeklu zaradi deformacije z lezenjem.

V ref. 6 je objavljen diagram na **sliki 4**, ki kaže, da se pri jeklih 14 MoV 63 in 10 CrMo 910 časovna trdnost jekla iz eksploatacije približuje časovni trdnosti svežega jekla pri obremenitvi, daljši od 10<sup>4</sup> ur, torej približno pod dveh letih dela parovoda. Duktilnost svežega jekla je mnogo večja. Lahko torej sklepamo, da potekajo še med eksploatacijo parovoda v jeklu procesi, ki negativno vplivajo predvsem na duktilnost. To se močno odraža na hitrosti propagacije razpok. V referenci 7 je pokazano, da je propagacija v enakih temperaturno napetostnih pogojih pomembno bolj počasna v svežem jeklu, kot v jeklu iz eksploatacije. Velja še omeniti, da so bile vse raziskave materiala iz eksploatacije izvršene na jeklu, ki ni kazalo nobenih mikroskopskih znakov poškodb, pač pa le spremembe v mikrostrukturi. Te spremembe se kažejo, kot smo že omenili, v razpadu trdne raztopine

ogljika in dušika v feritu, nastanku karbidnih in nitridnih faz, v spremembi oblike karbidnih faz, ki so bile v jeklu že od začetka, v neprekinjeni rasti velikosti vseh teh faz in o vezavi posamičnih legirnih elementov, predvsem kroma in molibdena v karbidih, kjer nadomeščajo železo. S tem se zmanjšuje utrditev s trdno raztopino. S povečanjem velikosti karbidnih komponent mikrostrukture se zmanjšuje njihova disperznost, s tem pa tudi sposobnost, da z blokiranjem dislokacij zavirajo vse procese deformacije z lezenjem.



Slika 4

Izoterme časovne statične trdnosti za dve jekli v dobavnem stanju in po eksploataciji v parovodu.

Fig. 4

Isotherms of creep strength depending on time for two steel grades as supplied and after exploitation in steam pipeline

### 3. NAPETOSTI V PAROVODIH

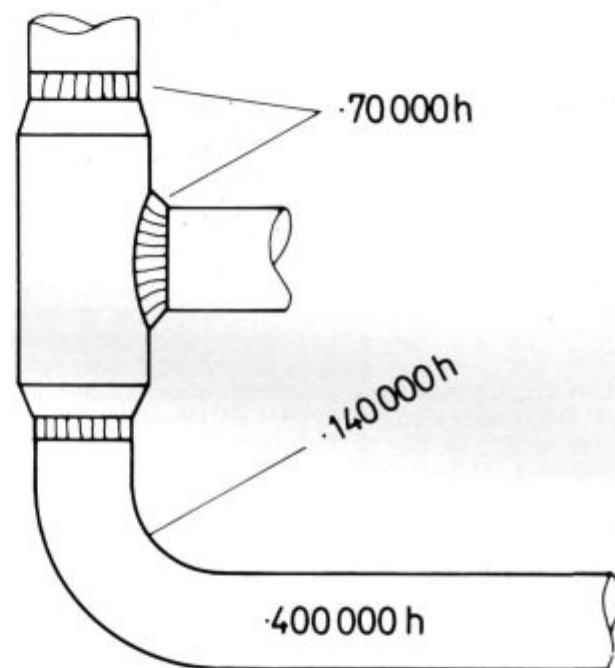
Parovodi so prostorsko komplicirani in togi sistemi zaradi tega, ker so izdelani iz debelostenskih elementov. To in proces izdelave ustvarja v parovodih zapleteno stanje napetosti. Osnovni izvori napetosti so:

- notranji tlak,
- lastna teža in oblika,
- sprememba temperature in togost ter
- notranje napetosti zaradi varjenja.

Notranji tlak daje enakomerno napetost, ki jo je mogoče zelo natančno izračunati. Porazdelitev teže in oblika je potrebno izbrati tako, da so na vseh segmentih parovoda čimmanjši upogibni momenti, predvsem da so ti čimmanjši v bližini varov, kolen, priključkov in sprememb debeline stene. Parovodi imajo, kot vsi debelostenski elementi konstrukcij, veliko toplotno vztrajnost, zato je v njih počasen proces spremembe in homogenizacije temperature. Debelina stene, priključki in kolena dajejo parovodu tudi geometrično togost in omejujejo možnosti termičnega raztezanja. To je vzrok, da napetosti neenakomerno zrastejo pri temperaturnih spremembah v parovodu. Posebno škodljive so vse hitre spremembe temperature, ker poškodujejo jeklo po mehanskemu termičnemu utrujanju. Niso zanemarljive tudi notranje napetosti v varih in v njihovi bližini. Te so deloma posledica krčenja dodanega materiala pri strjevanju, deloma pa posledica spremembe specifičnega volumna jekla pri faznih spremembah pri segrevanju in ohlajanju. Na primer pri segrevanju nastaja iz ferita in karbidov avstenit, ki ima manjši specifični volumen, nas-

protno pri ohlajanju nastanejo iz avstenita komponente mikrostrukture, ki imajo vse različen, vendar večji specifični volumen kot matična faza.

Parovodi se projektirajo za neko vnaprej dogovorjeno življenjsko dobo, na primer  $10^5$  ali  $2 \cdot 10^5$  ur. Vendar pa zaradi specifičnosti v porazdelitvi napetosti življenjska doba vseh elementov parovoda ni ista. Na sliki 5 je po ref. 9 prikazan idealiziran segment parovoda, na njem pa so označene življenjske dobe posamičnih delov. Življenjska doba je najkrajša v bližini varov, posebno ob mestih, kjer se spremeni debelina stene ali kjer so priključki, in na mestih, kjer se spreminja togost in prihaja do izraza tudi vpliv notranjih napetosti zaradi varjenja. Prve napake se pojavijo ponavadi ob zvarih, ob priključkih in sploh ob mestih spremembe togosti. V parovodih ne sme biti vibracij visoke frekvence, ki lahko močno pospešuje proces utrujanja jekla. Te vibracije se lahko pojavijo predvsem v bližini manjših priključkov.



Slika 5

Tipična življenjska doba posameznih delov parovoda.

Fig. 5

Typical duration of single parts of steam pipeline

### 4. POŠKODBE PAROVODOV

V parovodih najdemo tri vrste poškodb (2)

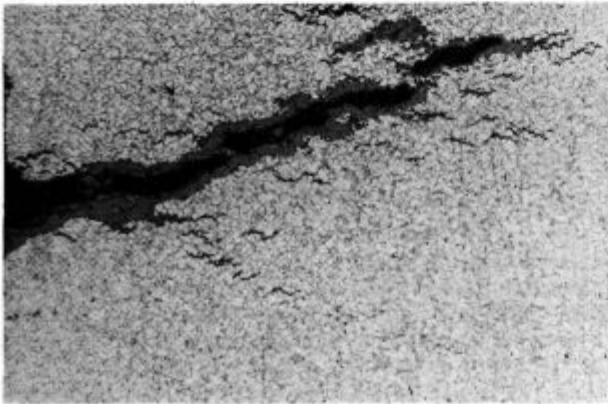
- napake izpred začetka eksploatacije,
- poškodbe, ki nastanejo v začetku eksploatacije in
- poškodbe, ki so posledica režima eksploatacije.

Poškodbe prve vrste so napake v materialu in varih, ki jih kontrola ni odkrila zaradi njihove velikosti, specifičnosti v položaju ali pa zaradi premajhne pazljivosti. Napake v materialu mora kontrola obvezno odkriti, ni pa mogoče z neporušnimi metodami preiskav zagotoviti, da je var brez napak. Pri debelih varih se ne odkrijejo majhne napake, predvsem pa se ne odkrijejo ev. relaksacijske razpoke (reheat cracks). To so mikrorazpoke na mejah zrn martenzita (avstenita), ki nastanejo zato, ker se pri napetostnem žarjenju deformacija lokalizira na posamične meje z neugodno lego in zato zmanjšano

deformacijsko sposobnostjo (10). Edina obramba proti napakam te vrste je dobra tehnologija varjanja in stroga kontrola spoštovanja te tehnologije pri izdelavi parovoda. Podobno velja za preprečevanje drugih varilnih napak, ki so premajhne, da bi jih odkrili z neporušno preiskavo, vendar pa so škodljive v pogojih eksploatacije parovodov. Relaksacijske razpoke nastanejo lahko tudi v začetku ali kmalu po začetku eksploatacije.

#### 4.1. Poškodbe parovodov zaradi statičnih napetosti

Poškodbe lahko nastanejo pred pretekom projektirane življenjske dobe, če pride do kombinacije napetosti iz točke 3, ki niso upoštevane v proračunu. Na ravnih delih in na kolenih parovoda nastajajo aksialne razpoke zaradi prekoračenja časovne trdnosti (s tem označujemo statično napetost, ki po določenem času, na primer  $10^5$  ur, povzroči zlom). Poškodbe imajo obliko razpok, ki se odpirajo na zunanjo površino, ponavadi v snopih, v jeklo prodirajo po kristalnih mejah feritnih zrn, so ponavadi močno razvejane in se v zdrav material nadaljujejo s poljem interkristalnih, redko intrakristalnih por.



Slika 6

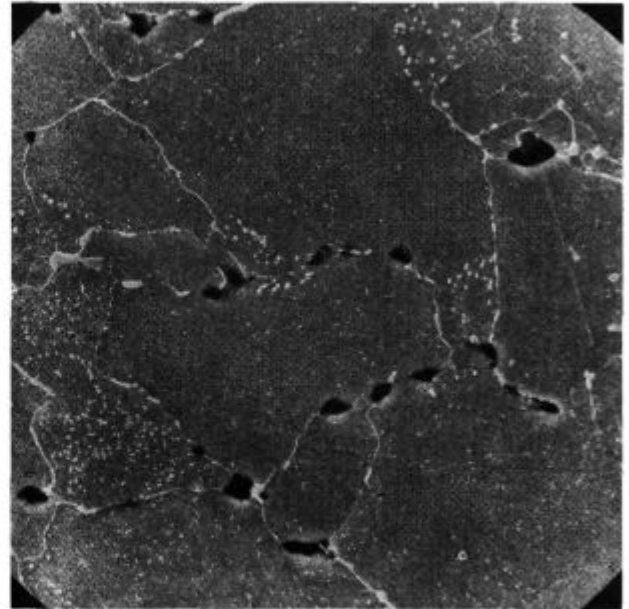
Razvejana interkristalna razpoka v jeklu iz parovoda, nastala zaradi prekoračenja časovne statične trdnosti (pov.  $30 \times$ )

Fig. 6

Branched intercrystalline crack in steel of steam pipeline formed due to excessive creep strength depending on time (magn.  $30 \times$ )

Na sliki 6 je prikazan prečni presek take razpoke, na sliki 7 pa interkristalne pore v njenem podaljškju. Začetne poškodbe te vrste so ponavadi zelo plitve, se lahko odkrijejo z metodo replik in jih je mogoče brez nevarnosti odstraniti z brušenjem (9, 10). Če se ne izbrusijo, se širijo v makrorazpoke in dalje do netesnosti. Za ustnice razpok te vrste je značilno, da ne kažejo nobene kontrakcije materiala.

Na sliki 8 je prikazana po ref. 8 evolucija poškodb jekla v odvisnosti od trajanja statične obremenitve, oz. faze deformacije jekla z lezenjem. Proti koncu obdobja, ko se jeklo deformira s 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 makrorazpoke, ki nato hitro privedejo do zloma. Po isti referenci je mogoče pričakovati še ca. tri leta normalne eksploatacije parovoda v primeru poškodb vrste A v jeklu. Potem, ko se najdejo poškodbe vrste B, lahko pričakujemo nemoteno eksploatacijo še

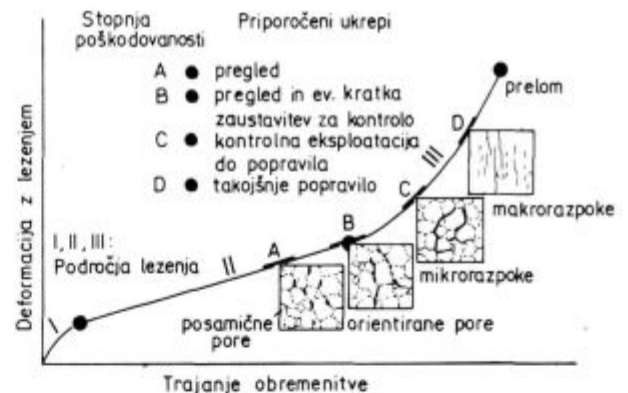


Slika 7

Pore po mejah zrn ferita v podaljškju razpoke iz slike 6 (pov.  $2000 \times$ )

Fig. 7

Pores on grain boundaries of ferrite in the crack extension from Fig. 6 (magn.  $2000 \times$ )



Slika 8

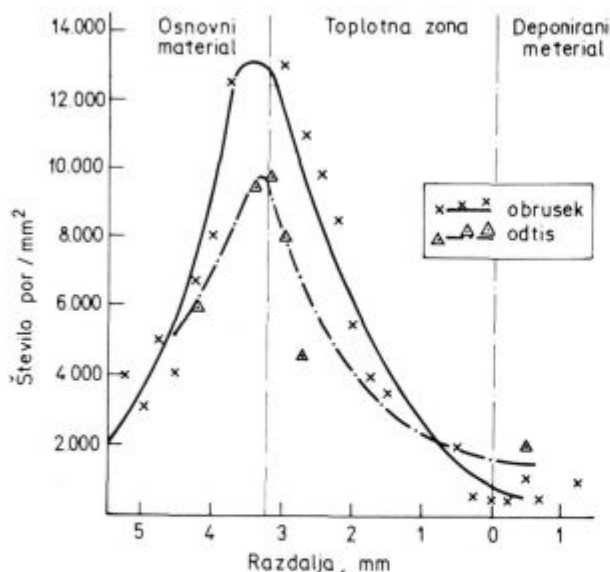
Poškodbe v jeklu v odvisnosti od trajanja deformacije z lezenjem.

Fig. 8

Damages in steel depending on duration of creep deformation

ca. leto in pol, po fazi C ca. pol leta, po fazi D pa je potrebno takojšnje popravilo. Podobno zaporedje evolucije poškodb zaradi lezenja navajata tudi ref. 11 in 14. Še enkrat velja pojasniti, da se pred fazo A praktično konča precipitacija karbidnih in nitridnih faz iz trdne raztopine v feritu, vezana legirnih elementov v te faze in sferoidizacija teh faz, rasti karbidnih in nitridnih faz pa so tem hitrejše, čim večja je deformacija.

V toplotni coni se pokaže prekoračenje statične časovne trdnosti z nastankom razpok, ki so vzporedne z varom. Za to sta dva razloga: eden so povečane napetosti zaradi varjenja, drugi pa je začetna mikrostruktura, ki vpliva na časovno trdnost jekla. V toplotni coni, kjer je bilo jeklo segreto v razponu temperature od taljenja do temperature predgrevanja, nastane pri ohlajanju zaporedje mikrostruktur, ki imajo različno časovno trdnost.

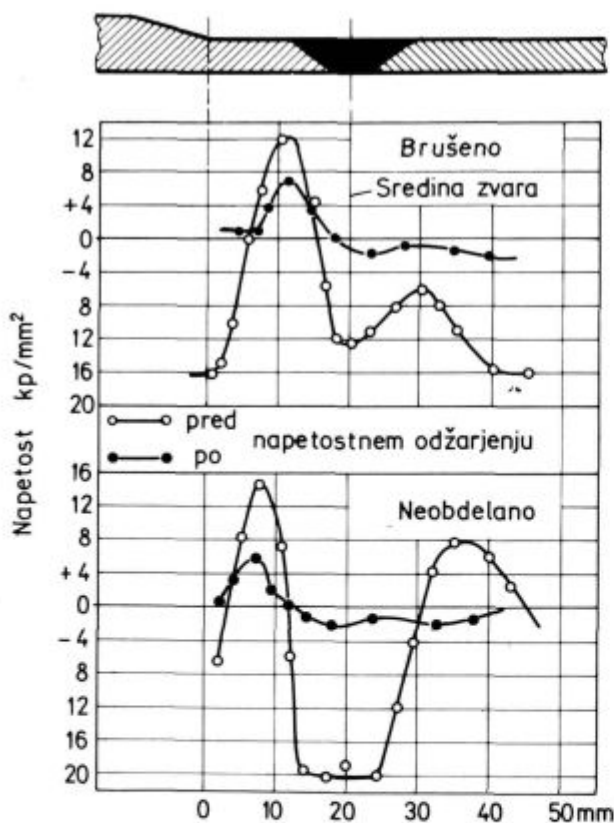


Slika 9

Porazdelitev por v podaljškju razpoke v zvaru parovoda iz jekla 14 MoV 63.

Fig. 9

Distribution of pores in the crack extension in the weld of steam pipeline made of 14 MoV 63 steel



Slika 10

Porazdelitev notranjih napetosti v zvaru na surovi in na obdelani površini vara pred in po napetostnem žarjenju

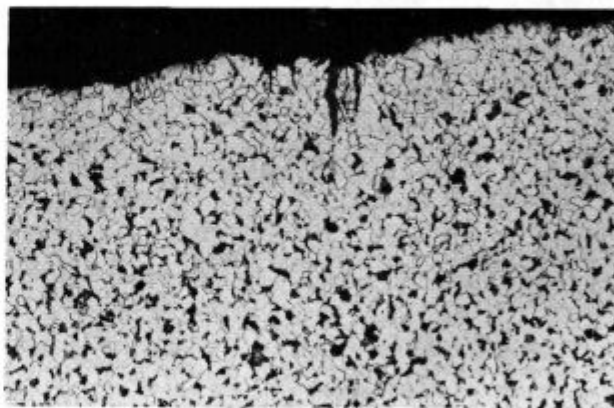
Fig. 10

Distribution of internal stresses in the weld on a rough and on a machined surface of weld and after stressrelief annealing

V ref. 12 najdemo opis porazdelitve por v več delih parovoda iz jekla 14 MoV 63, ki so imeli poškodbe v obliki razpok, vzporednih z obodnim varom. V postopku popravila so bile razpoke izbrusene, preiskava mikrostrukture pa je bila izvršena s pomočjo replik in na koščkih materiala, ki so bili izrezani z boka razpok. Na sliki 9 je prikazana porazdelitev površinske gostote por. Ta dosega maksimum ca. 12000 pot/mm<sup>2</sup> na meji med toplotno cono in osnovnim materialom. Po podobni metodi je bilo ugotovljeno, da je ob razpoki, ki je nastala na mestu povečanja premera parovoda, gostota por ca. 1500/mm<sup>2</sup>. To kaže, da je časovna trdnost jekla močno zmanjšana v ozkem pasu na prehodu iz osnovnega materiala v toplotno cono vara. Ref. 12 ne pojasnjuje vzroka za lokalizacijo nastanka por, pa tudi ne za kritične razlike v njihovi gostoti pred njihovo združitvijo v interkristalne rapoke. Lahko je vzrok razlika v velikosti feritnih zrn, ki so v toplotni coni najmanjša tam, kjer se material segreje tik nad premensko temperaturo, ali pa malo pod njo. Verjetno pa je lokalizacija por tudi v zvezi s porazdelitvijo notranjih napetosti v varu. Na sliki 10 po ref. 2 se vidi, da je maksimum teh napetosti v zunanem delu toplotne cone pred napetostnim žarjenjem in po njem na površini in v sredini sočelnega vara. Tudi ref. 13 navaja podobno porazdelitev por ob razpoki, kot je razvidno na sliki 9.

#### 4.2 Poškodbe parovodov zaradi dinamičnih napetosti in korozije

Trajna dinamična trdnost jekla je prekoračena ponavadi pri kombinaciji mehanskih, termičnih, statičnih in cikličnih obremenitev. Poškodbe nastanejo, če pride kondenzat (voda) na vročo notranjo ali na zunanjo površino cevi. Izparevanje tekočine lokalno ohladi jeklo, nastanejo natezne napetosti, ki jih poznamo pod nazivom termošoki (8). Na steni cevi se poškodbe zaradi termošoka vidijo kot snop drobnih razpok. Presek takih razpok v steni kotlovske cevi kaže slika 11. Poškodbe zaradi ponavljanja termošokov so neodvisne od materiala in mikrostrukture, preprečijo se lahko samo tako, da se prepreči kontakt površine parovoda z vodo. Poškodbe nastanejo tudi tako, da lokalne, termične ali mehansko termične napetosti poškodujejo varovalni sloj magnetita na notranji površini ali sloj škaže na zunanji površini cevi. Obe oksidni prevleki imata manjšo deformabilnost od jekla. Skozi nastalo režo nastane nov

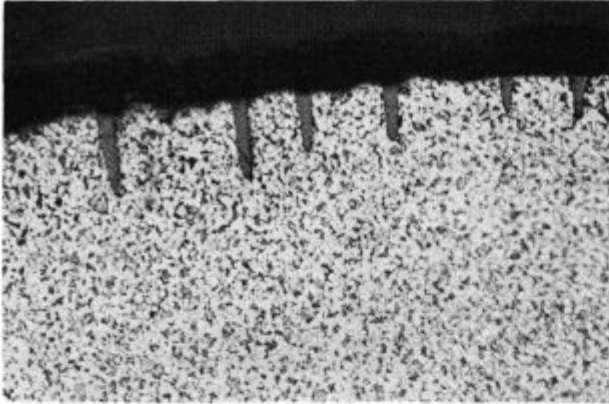


Slika 11

Poškodbe na notranji površini kotlovske cevi zaradi termošokov (pov. 100 ×)

Fig. 11

Damages on the internal surface of boiler pipe due to thermal shocks (magn. 100 ×)



Slika 12

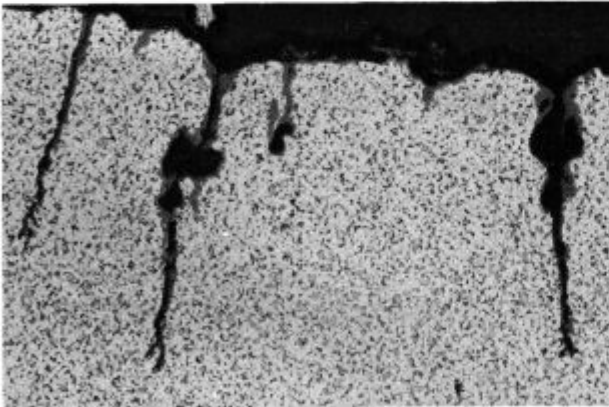
Poškodbe na zunanji površini kotlovske cevi zaradi deformacije z napihovanjem, ki jo neplastina škaja ne prenese (pov. 50 ×)

Fig. 12

Damages on the external surface of boiler pipe due to deformation by blowing which cannot be sustained by unplastic scale (magn. 50 ×)

oksid. Če se proces nadaljuje, nastanejo poškodbe, ki jih vidimo na **sliki 12**. Poškodbam zaradi termošoka ali prevelikih mehanskih napetosti drugega izvora se lahko pridruži še korozija v obdobju mirovanja, če se notranja površina cevi navlaži v prisotnosti kisika. Razpoke, ki so klinaste na prečnem preseku stene, cevi dobijo zaradi korozije, ki je lokalizirana v vrh zaradi diferencialne aeracije, razširitve, napolnjene s porozno snovjo (**slika 13**). Zato iz oblike poškodbe na preseku stene lahko sklepamo o dveh mehanizmih prodiranja poškodbe v jeklo.

V bližini priključkov ali na mestih vpetij lahko občasno nastajajo dinamične obremenitve različnega porekla. Nevarno je, če je tako mesto v bližini vara, ali celo na mestu spremembe oblike parovoda. Če vsota notranjih in zunanjih napetosti prekorači trajno dinamično trdnost, nastanejo razpoke, ki pokončno prodirajo v steno cevi v toplotni coni vara. Tako poškodbo prikazuje **slika 14**. Zaškajana površina razpoke v začetku je dokaz, da se je razvila iz klinaste zajede v škaji, katere nastanek smo že



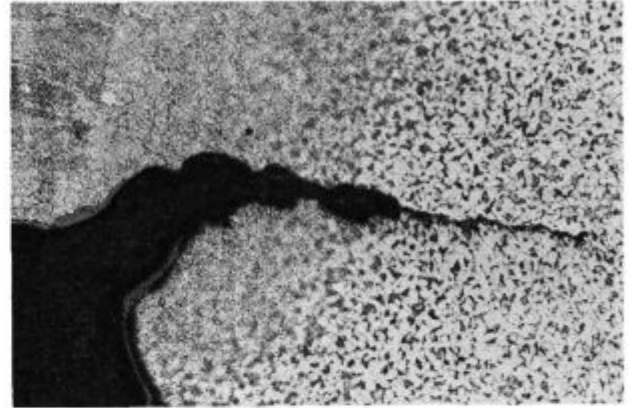
Slika 13

Poškodbe na notranji površini kotlovske cevi zaradi kisikove napetostne korozije, torej zaradi kombiniranih mehansko kemijskih dejavnikov (pov. 50 ×)

Fig. 13

Damages on the internal surface of boiled pipe due to oxygen stress corrosion, i. e. due to combined mechanical and chemical effects (magn. 50 ×)

opisali. Nadaljevanje je transkristalno na ustnicah razpoke pa ni škaje. Včasih najdemo ob ustnicah razpoke deformirano mikrostrukturo. To je dokaz občasnih večjih preobremenitev in otopitve čela razpoke zaradi plastifikacije jekla, kar pomeni, da razpoka raste s propagacijo v pogojih malociklične utrujenosti. Če je stena cevi tanka, se lahko istočasno s razpoko na zunanji strani na **sliki 14** razvije tudi razpoka pod njo na notranji površini.



Slika 14

Razpoka v varu na prehodu med steno cevi in lamelo cevne stene, nastala zaradi prevelikih deformacij (pov. 50 ×)

Fig. 14

Crack in weld on the transition between pipe wall and the tie lamina formed due to too high deformations (magn. 50 ×)

## 5. OCENA PREOSTALE ŽIVLJENJSKE DOBE

Proces ocene preostale življenjske dobe ima naslednje faze (8):

- izračun iztrošenosti po TRD 301/508. Ta je potreben zaradi prve ocene stanja in za pripravo programa preiskav parovoda;
- preiskave materiala na mestih, kjer se na osnovi proračuna in oblike pričakujejo največje napetosti in deformacije jekla, ter ev. tudi vodne poškodbe in
- ocena rezultatov, ukrepi in ev. ponovitev proračuna in preiskav.

V izračunu iztrošenosti je potrebno upoštevati spremembe oblike in dimenzij parovoda, statične in dinamične obremenitve, ki so posledica fluktuacij v režimu eksploatacije, in podatke o lastnostih materiala. Podlaga je seveda proračun parovoda (8). S primerjavo predpostavk v preračunu in v režimu eksploatacije se izboljša objektivnost predpostavk proračuna. Često to pomaga, da se podaljša življenjska doba parovoda kot celote ali pa njegovih sestavnih delov.

Preiskava materiala ima cilj, da se opredeli, ali so na mestih največjih statičnih ali dinamičnih obremenitev nastale kakršne koli vidne poškodbe. Referenca 8 priporoča, da se začnejo kontrolne preiskave na kritičnih mestih, posebno na varih, že po preteku 30 % projektirane življenjske dobe parovoda po metodi plastičnih replik. V momentu, ko so poškodbe tako velike, da se odkrijejo pri vizualnem pregledu, je parovod potreben popravila. Globina pravočasno odkritih razpok ni večja od 3 mm, globlje v steni je jeklo nepoškodovano. Zato se razpoke enostavno odbrusijo, stanje materiala pod njimi pa se preveri z replikami. Če so poškodbe globoke, jih je potrebno oceniti tudi po metodah mehanike loma, upoštevajoč lastnosti materiala pri temperaturi eksploatacije in pri temperaturi ambienta.

## 6. METODE ZA PREISKAVO MATERIALA PAROVODOV

Uporabne so samo metode brez porušitve, ki ne poškodujejo površine parovoda. Prepovedana je uporaba magnetnih preiskav, če iskenje povzroča termošoke. Površinska trdota ne daje nobene indikacije o stanju materiala. Zato se kot metoda za neporušeno oceno stanja mikrostrukture uporablja predvsem metoda plastičnih replik. Rezultati takih preiskav so na primer objavljeni v ref. 1, 8, 10, 12, 13 in 14. V ref. 12 je detajlno opisan proces jemanja replik, ki ima naslednje delovne faze: odstranitev izolacije, brušenje, poliranje, jedkanje, po možnosti kontrola s prenosnim mikroskopom, odtis replike in preiskava replike z optičnim in raster elektronskim mikroskopom (REM). S prenosnim optičnim mikroskopom je mogoče odkriti le razpoke, pore se odkrijejo šele pri opazovanju v REM-u. Avtorji ref. 8 trdijo, da je potrebno nekoliko mesecev vaje, da bi se osvojila priprava kvalitetnih replik in njihova pravilna interpretacija. Informacije, ki jih dobimo z replike, pridobijo vrednost, če se lahko kombinirajo s preiskavo materiala iz dela parovoda, ki je bil izrezan v procesu reparature, ali pa ev. zamenjan zaradi prevelikih poškodb z novim. Pri pripravi replike in jemanju vzorcev materiala iz področja poškodbe, je potrebno paziti, da ne pride do pregretja in hladne deformacije jekla, pa tudi ne do kontaminacije površine razpok. Pregretje in deformacija toliko spremenita mikrostrukturo, da ni več reprezentativna za stanje parovoda. Kontaminacija ustnic razpoke s penetranti lahko tako onesnaži površino razpok, da preiskava v REM-u ne da podatkov, ki so osnova za sklepanje o mehanizmu nastanka in propagacije razpoke.

## ZAKLJUČEK

Večje znaje o obnašanju materiala pri obtežbi pri temperaturah počasne deformacije z lezenjem pri dolgo-

trajnih statičnih obremenitvah in izkušnje pri uporabi omogočajo, da se danes lahko zelo objektivno oceni stanje parovodov, z njim pa tudi preostala življenjska doba. Pogoj za tako oceno je ovrednotenje parametrov eksploatacije in kvalitetne mikrostrukturne preiskave, ki naj povedo, koliko je material ireverzibilno poškodovan. Predvsem je potrebno pri tem pazljivo spremljati stanje na kritičnih delih parovoda, na primer pri spremembah debeline stene, priključkih, varih in kolenih, kjer se obremenitvam zaradi notranjega tlaka pridružujejo momenti zaradi razlik v raztezanju pri spremembah temperature in notranje napetosti zaradi varjenja.

## LITERATURA:

1. H. Jesper, H. Mayer i H. Remmer: VGB Kraftwerkstechnik 65, 1985, 178—186
2. H. J. Shuller, A. Woitscheck i A. Heinz: Unbeheizte dampf-führende Rohrleitungen; Allianz Handbuch der Schaden-verhütung, Allianz AG München, 1979, 195—207
3. G. Kalwa: VGB Kraftwerkstechnik 63, 1983, 356—365
4. H. Fabritius: VGB Kraftwerkstechnik 59, 1979, 799—806
5. B. Walser i A. Rosselet: VGB Kraftwerkstechnik 58, 1978, 361—366
6. W. Benedick i H. Weber: VGB Kraftwerkstechnik 66, 1986, 63—72 in 1700—177
7. V. Detampel: VGB Kraftwerkstechnik 67, 1987, 1097—1105
8. R. P. Skelton: Materials Science and Engineering 35, 1978, 287—298
9. B. Neubauer i F. Arens-Fischer: VGB Kraftwerkstechnik 63, 1983, 637—646
10. A. D. Batte, R. C. Miller i M. C. Murphy: Bruchuntersuchungen und Schadeberklärung, Allianz AG, München, 1979, 173—180
11. R. Rintama, P. Auerkari i J. Salonen: Neue Hutte 33, 1988, 110—114
12. W. Answald, R. Blum, B. Neubauer i K. E. Poulsen: VGB Kraftwerkstechnik 59, 1979, 581—593
13. T. Geiger: Bruchuntersuchungen und Schadenerklärung, Allianz AG, München, 1979, 162—166
14. H. Eiden i E. Mai: VGB Kraftwerkstechnik 62, 1982, 409, 416

## ZUSAMMENFASSUNG

In den Dampfleitungen der Kohlekraftwerke ist der Stahl speziphischen Beanspruchungen unterworfen die eine Folge des Betriebes der Dampfleitung im Temperaturbereich langsamer Änderungen des Mikrogefüges und der Kriechbeständigkeit sind. Einen grossen Einfluss auf die beiden Prozesse hat die thermische Behandlung von Stahl die ein sehr stabiles Anfangsmikrogefüge gewährleisten soll. Die Spannungen in den Dampfleitungen sind eine Folge des Innendruckes, des Eigengewichtes und der Form, der Steifigkeit, der Temperaturänderungen und des Schweißens von Segmenten. Deshalb sind die Spannungen an verschiedenen Teilen der Dampfleitung verschieden. Die Beschädigungen der Dampfleitungen haben mehrere Ursachen und sind amgrössten und amhäufig-

sten dort wo die gesamten statischen und dynamischen Spannungen amgrössten sind. Besonders gefährliche Stellen sind Abzweigstücke, Krümmer und Schweißverbindungen. In der Zeit des Ruhestandes der Dampfleitung kann auch die Korrosion gefährlich sein. Die Schätzung der Lebensdauer basiert an der Berechnung der Abnutzung in der die wichtigsten Parameter: die Formänderungen der Dampfleitung, Materialzustand, so wie genaue Analyse eventueller Beschädigungen an Stellen der grössten statischen und dynamischen Spannungen sind. Eine ziemlich objektive Schätzung von Materialzustand ist möglich aus der Bewertung des Mikrogefüges mit Hilfe plastischer Repliken zu erhalten, an welchen schon Mikrofehler im Material zu erkennen sind.

## SUMMARY

Steel of steam pipelines in thermal power stations is subject to specific loads as the consequence of steam pipeline operation in the temperature range of slow changes of the steel microstructure and of the creep resistance. Both processes are highly influenced by the thermal treatment of steel which must ensure the initial microstructure of steel as stable as possible. Stresses in the steam pipelines are caused by internal pressure, own weight and shape, rigidity, variations of temperature, and welding of segments. Thus the stresses differ in various parts of pipeline. Damages of pipelines have various origins, and they are the most frequent and the greatest in the

areas of the highest overall static and dynamic stresses. The most dangerous areas are the tee joints, bends and welds, in the periods of standstill also corrosion can be dangerous. Estimation of the life is based on the calculation of wear where the most important parameters are the changes of pipeline shape, state of material and exact analysis of eventual damages on the areas of the highest static and dynamic stresses. A relatively objective estimation on the state of material can be obtained by microstructure analysis with plastic replicas on which already microdefects in material can be identified.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В паропроводах теплостанций сталь подвергается специфическим нагрузкам, вследствие работы паропровода в температурном диапазоне медленных изменений микроstructures и устойчивости на ползучесть. На оба процесса сильно влияет термическая обработка стали, которая должна обеспечить как можно более стабильную начальную микроstructure. Напряжение в паропроводах является результатом внутреннего давления, собственного веса и формы, жесткости, температурных изменений и сварки отдельных сегментов. Поэтому напряжения в разных частях паропровода разные. Паропроводы повреждаются по разным причинам — в большинстве случаев в точках самой большой общей статической и динамической нагрузок. Осо-

бенно опасными местами являются точки ответвления, изгибы и сваренные места. В период, когда паропровод не работает, опасно также воздействие коррозии. Определение срока службы основывается на расчете износа, причем самыми важными параметрами являются изменение формы паропровода, состояние материала и точный анализ возможных повреждений на местах самых больших статических и динамических напряжений. Сравнительно объективную оценку о состоянии материала можно установить на основании микроstructure с помощью пластмассовых реплик, на которых можно определить даже микронеправильности в материале.