

POŠKODBE NA PAROVODIH IZ JEKLA 14 MoV 6 3 DAMAGE TO STEAM PIPES MADE OF 14 MoV 6 3 STEEL

**Dimitrij Kmetič¹, Jelena Vojvodič Tuma¹, Boris Arzenšek¹, Matjaž Dvoršek²,
Jože Lenart²**

¹ Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Lepi pot 11, 1000 Ljubljana, Slovenija

² Termoelektrarna Šoštanj, d. o. o., Lole Ribarja 18, 3325 Šoštanj, Slovenija
mitja.kmetic@imt.si

Prejem rokopisa - received: 2003-03-04; sprejem za objavo - accepted for publication: 2003-03-24

V Termoelektrarni Šoštanj je bila turbina bloka 4 v obratovanju 191 000 ur. V temu času je imela 754 zagonov. Na komponentah turbine smo med remontnimi deli v letu 2002 opravili obsežnejše preiskave. Na parovodih, ki so izdelani iz jekla vrste 14MoV63, smo naredili natančnejše mikrostrukturne preiskave po metodi replik in izmerili trdote. V visoko popuščeni martenzitni mikrostrukturi smo opazili karbidne izločke, ki so med dolgotrajnim obratovanjem pri povišanih temperaturah nastali v kovinski matici, in rast karbidov. Trdota jekla je nizka in ustreza natezni trdnosti na spodnji dopustni meji. Na zvarih smo v toplotno vplivanih področjih opazili poškodbe, ki so nastale zaradi deformacije z lezenjem. Mikropraznine so nastale po mejah prvotnih avstenitnih kristalnih zrn in tudi v njihovi notranjosti. Mikrorazpoke so nastale z združevanjem mikropraznin po kristalnih mejah. Metalografske preiskave smo naredili tudi na vzorcu, izrezanem iz zvara, ki povezuje sito s parovodom. Preiskave so pokazale, da se pri parovodih doba trajanja izteka. Načrtovana je zamenjava parovodov z novimi, izdelanimi iz jekla X10CrMoVNb91 (P91) z boljšo odpornostjo proti deformaciji z lezenjem.

Ključne besede: parovodi, jeklo 14MoV63, neporušitvene preiskave, mikrostruktura, lezenje, poškodbe

The operating time of turbine 4 in the Power plant Šoštanj is of 191 000 hours, with 754 startups. During the maintenance stop in the year 2002 an extensive examination was performed on the turbine components. The steam pipes in the high- and the medium-pressure parts of the turbine are made from 14MoV63 steel. On selected components the microstructure was examined and the hardness was determined. The tempered martensite microstructure change due to the temperature and the deformation. The hardness of the steel is low and corresponds to the minimum tensile strength required in the delivery specifications. In the heat-affected zones of the welds, creep damage occurred. Cavities developed at the boundaries of the austenite grains, and within the grains, too. Microcracks originated due to the coalescence of cavities at the grain boundaries. Metallographic examinations were carried out on specimens cut from the weld connecting the screen with a steam pipe. Since the damage rate increases with the operating time, the replacement of the 14MoV63 steel steam pipes is planned using pipes made from X10CrMoVNb91 (P91) steel with better creep resistance.

Key words: steam pipes, steel 14 MoV 6 3, nondestructive testing, microstructure, creep damage

1 UVOD

Po določenem času obratovanja termoelektrarn se pri preiskavah med remontnimi deli zastavlja vprašanje, kako dolgo bodo lahko še zanesljivo obratovale v ustreznih ekonomskih razmerah in po zahtevah o varstvu okolja. To vprašanje je zlasti pomembno pri termoelektrarnah starejših od 25 let. Za oceno preostale dobe trajanja je pomembno poznavanje tehnične dokumentacije s predvidenimi pogoji obratovanja, podatkov o tekočem obratovanju (temperatura, tlak, število obratovanih ur, število zagonov), rezultatov predhodnih preiskav (neporušitvene, porušitvene) in remontov (stanje komponent, poškodbe, sanacije, zamenjava delov) z upoštevanjem rezultatov znanstvenih raziskav¹.

Obsežnejše preiskave stanja komponent parnih kotlov in turbin potekajo v triletnih obdobjih. Program preiskav je vnaprej pripravljen glede na predvideno dobo trajanja, razmere pri obratovanju in rezultate predhodnih preiskav. Eden od glavnih mehanizmov nastanka poškodb je lezenje, do katerega lahko pride na lokalnih področjih zaradi večje obremenitve (kratkotrajna pregretja, zmanjšanje debeline sten cevi), ali pa zaradi mikrostrukturne degradacije med dolgotrajnim obratovanjem pri povišanih temperaturah, ki je vzrok za

zmanjšanje mehanskih lastnosti jekla, predvsem odpornosti proti deformaciji z lezenjem^{1,6}. Degradacijo mikrostrukture jekel (sferoidizacija karbidov v perlitu, tvorba karbidnih in nitridnih izločkov v feritu, pojav karbidnih zrn po kristalnih mejah, rast karbidnih zrn, nastanek mikropraznin in mikrorazpok) lahko opredelimo s preiskavami mikrostrukture na metalografsko pripravljenih vzorcih ali pa na replikah (odtisih).

Neporušitvene preiskave so bistveni del preiskav za opredelitev preostale dobe trajanja. Mikrostrukturne preiskave po metodi replik pa so ena od standardnih neporušitvenih preiskav komponent, ki obratujejo na področjih, kjer lahko pride do poškodb zaradi deformacije z lezenjem, in se izvajajo v določenih intervalih^{1,4,5,6}. Začetne poškodbe zaradi deformacij z lezenjem nastanejo vedno na zunanji površini parovodov. Poškodbe so mikroskopske in jih z drugimi neporušitvenimi preiskavami ni mogoče odkriti. Kljub sorazmerno majhni površini, ki jo pregledamo, so odtisi reprezentativni, če so vzeti na mestih, kjer so v komponentah največje napetosti in deformacije ter najvišje temperature^{7,8,9}. Zato so pri teh preiskavah zelo pomembne izkušnje. Na osnovi mikrostrukturnih sprememb, tvorbe karbidnih in nitridnih precipitativ, rasti karbidnih zrn, nastajanja

mikropraznin in mikrorazpok s povezovanjem mikropraznin po mejah kristalnih zrn, lahko opredelimo stopnjo degradacije jekla. V tehnično-znanstvenem poročilu *Guideline for the Assessment of Microstructure and Damage Development of Creep Exposed Materials for Pipes and Boiler Components*² so poškodbe razvrščene v pet razredov, od izhodnega stanja jekla (razred 0) do nastanka makrorazpok (razred 5).

Blok 4 v TE Šoštanj je bil v obratovanju 191 000 ur in v temu času je imel 754 zagonov. Med remontnimi deli smo v letu 2002 opravili na komponentah turbine, parovodih in situ obsežnejše mikrostrukturne preiskave po metodi replik in meritve trdote. Komponente visokega tlaka obratujejo pri tlaku pare 180 bar in temperaturi pare 540 °C, komponente srednjega tlaka pa pri tlaku 50 bar in temperaturi 540 °C. Ohišja turbin in hitrozapornih in regulacijskih ventilov so izdelana iz jeklene litine GS17CrMoV511, parovodi z dimenzijo $\Phi = 268 \text{ mm} \times 46 \text{ mm}$ pa so iz jekla 14MoV63. Preiskave smo naredili na zvarih, na zunanjih lokih kolen parovodov in tudi na ravnih delih parovodov.

Sito na srednjetačnem delu turbine je izdelano iz enakega jekla kot parovodi. Sito je bilo predvideno za zamenjavo, zato smo na zvarih, ki povezujejo sito s parovodom, naredili mikrostrukturne preiskave z replikami in preiskave na vzorcih, izrezanih iz zvara na mestu neporušitvenih preiskav.

2 REZULTATI PREISKAV

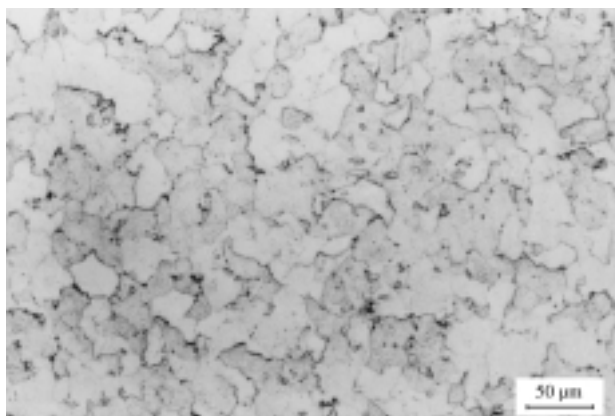
2.1 Parovodi

Na ravnih delih parovodov in na zunajih lokih cevnih kolen smo v mikrostrukturi opazili spremembe, ki so nastale zaradi dolgotrajnega obratovanja pri povišanih temperaturah. Karbidna zrna so zrasla in iz kovinske matice so nastali drobni izločki. Nismo opazili, da bi se karbidi izločali v obliki nizov po kristalnih mejah. Meritve trdote so pokazale, da je jeklo sorazmerno mehko. V standardu podanim vrednostim natezne trd-



Slika 1: Makroposnetek zvara na regulacijskem ventilu s parovodom na turbini visokega tlaka

Figure 1: Weld of the controlling valve with the steam pipe in the high-pressure turbine part

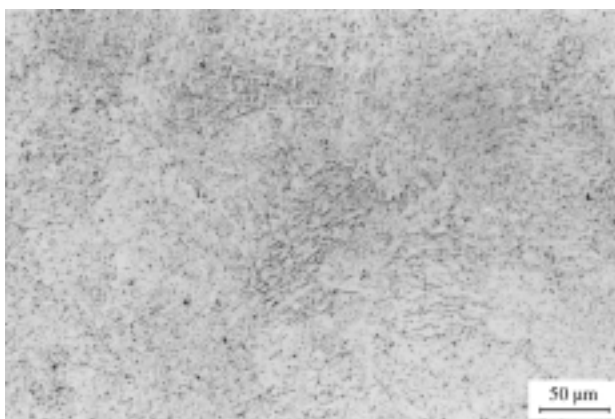


Slika 2: Mikrostruktura osnovnega materiala iz visoko popuščene martenzita

Figure 2: Microstructure from high tempered martensite in the parent metal

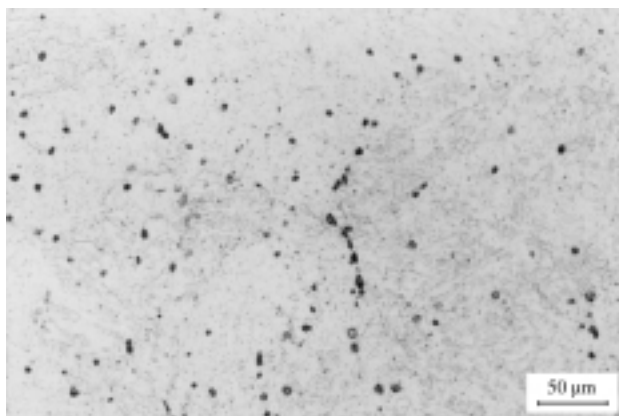
nosti (460-610) N/mm² ustreza trdota (143-190) HV. Izmerjene povprečne vrednosti ravnega dela cevovodov (143 ± 4) HV in kolen (141 ± 5) HV so nizke in ustrezajo spodnjim dopustnim vrednostim trdote oz. natezne trdnosti.

Na zvarih smo pripravili mikrostrukturne odtise na osnovnem materialu, v toplotno vplivanem področju in v varu. Na **sliki 1** je na makroposnetku prikazan preiskovani zvar S5, ki leži pod hitrozapornim ventilom na turbini visokega tlaka. V mikrostrukturi osnovnega materiala in varov nismo opazili nobenih posebnosti, razen rasti karbidov in izločkov (**sliki 2 in 3**). V toplotno vplivanem področju zvarov pa smo v jeklu 14MoV63 opazili tudi poškodbe, ki so nastale zaradi deformacije z lezenjem. V mikrostrukturi so mikropraznine in mikrorazpoke. Mikropraznine so ponekod enakomerno porazdeljene po kovinski matici drugod pa v nizih po mejah avstenitnih kristalnih zrn (**sliki 4 in 5**). Mikrorazpoke so nastale z združevanjem mikropraznin po kristalnih mejah (**slika 6**). Po klasifikaciji VGB smo poškodbe ocenili z razredoma 2 in 3 (2b, 3a, 3b). Večjih nizov in večjih mikrorazpok v jeklu nismo opazili. Z večkratnim

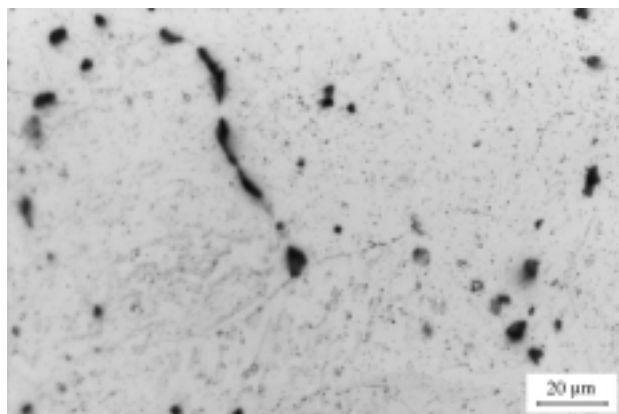


Slika 3: Mikrostruktura vara iz visoko popuščene martenzita

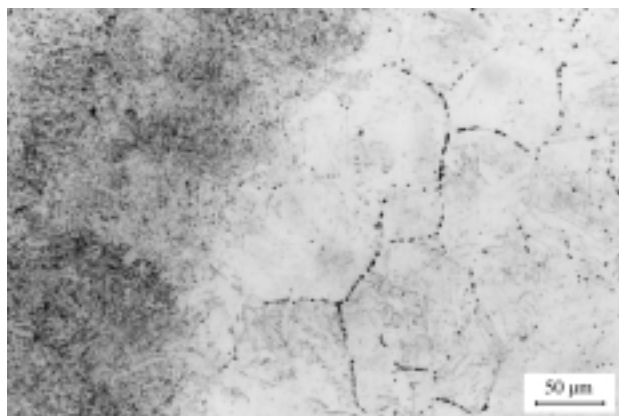
Figure 3: Microstructure from high tempered martensite in the weld metal



Slika 4: Mikropraznine v toplotno vplivanem področju
Figure 4: Microcavities in the heat-affected zone



Slika 5: Mikropraznine po mejah prvotnih austenitnih zrn
Figure 5: Microcavities at the austenite grain boundaries



Slika 6: Mikrorazpoke po mejah austenitnih zrn so nastale z združenjem mikropraznin
Figure 6: Microcracks developed with coalescence of microcavities at the austenite grain boundaries

brušenjem in odvzemom replik smo ugotovili, da so poškodbe plitve. Na parovodih so na globini 0,5 mm posamezne mikropraznine, na globini 1 mm pa nismo opazili nobenih poškodb.

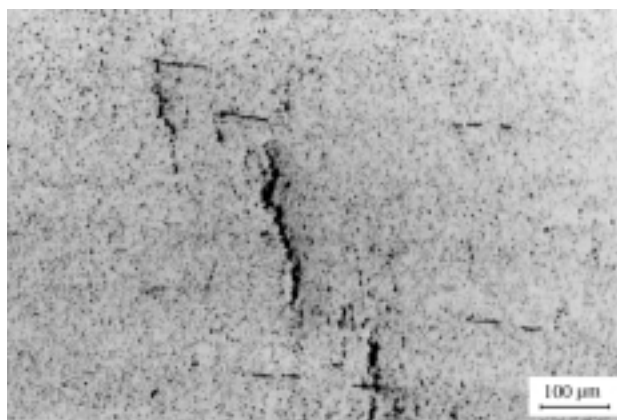


Slika 7: Makrosposnetek zvarov na situ turbine srednjega tlaka
Figure 7: Macro image of the welds on the screen of the medium-pressure part of the turbine

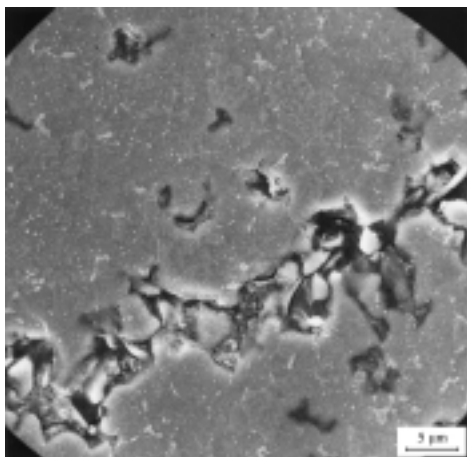
2.2 Sito

Sito turbine srednjega tlaka je prikazano na makrosposnetku na **sliki 7**. V mikrostrukturi osnovnega materiala in vara smo opazili rast karbidnih zrn. Poškodbe, ki so nastale zaradi lezenja, zlasti mikrorazpoke, so izrazitejše kot na zvarih pri drugih delih turbine. Tudi globina, do katere smo v toplotno vplivanem področju še opazili poškodbe, je večja kot na drugih preiskanih mestih. Mikropore smo opazili še na globini 5 mm.

Steni sita in priključnega parovoda sta debeli 30 mm, var pa je pobrušen. Na sredini vara je stena debela 24 mm. V mikrostrukturi vzorcev, izrezanih iz zvara, smo na nekaterih mestih toplotno vplivanega področja na strani parovoda opazili večje nize mikrorazpok (**slika 8**). Poškodbe segajo do globine 4 mm in so po klasifikaciji VGB razreda 4. Z mikrosposnetka je razvidno, da potekajo mikrorazpoke pravokotno na nekovinske vključke manganovega sulfida, ki so razpotegnjeni v smeri podaljšanja cevi pri vročem valjanju. Razpoke so napredovale od zunanje proti notranji površini parovoda. Lega in



Slika 8: Mikropore in niz mikrorazpok, ki potekajo pravokotno na nekovinske vključke manganovega sulfida
Figure 8: Microcavities and string of microcracks originated perpendicular to the inclusions of manganese sulphide

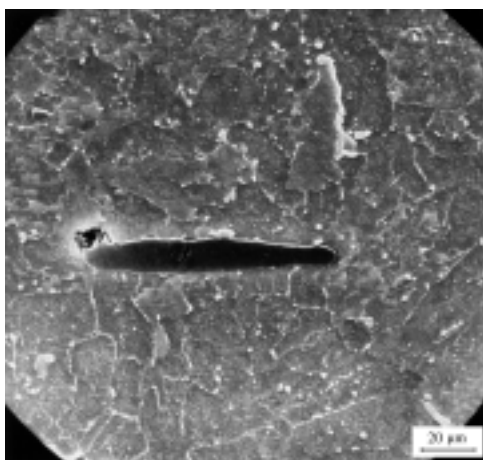


Slika 9: SEM-posnetek mikropor in mikrorazpoke po kristalni meji v toplotno vplivanem področju

Figure 9: SEM micrograph of microcavities and of a microcrack at the grain boundary in the heat-affected zone

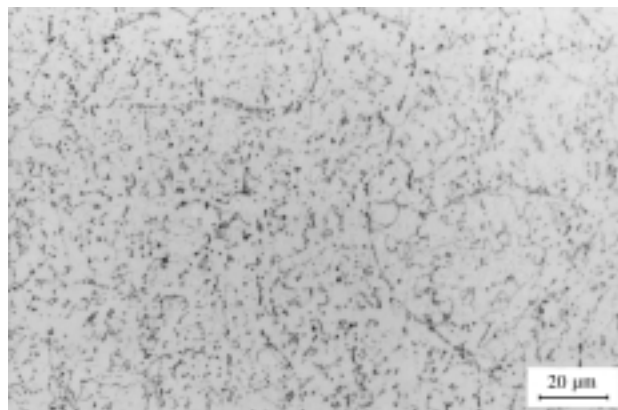
smer napredovanja mikrorazpok kažeta, da je zvar obremenjen temperaturno, s tlakom pare in z dodatnimi mehanskimi napetostimi zaradi upogiba. Napredovanje tako usmerjenih mikrorazpok je hitrejše, kot če bi potekale v vzdolžni smeri.

V optičnem mikroskopu se mikropore in nizi mikropor po mejah kristalnih zrn na vzorcih slabše razločijo kot na replikah. Vzorce smo zato natančneje pregledali v SEM pri večjih povečavah. Na **slikah 9** in **10** so prikazane mikropraznine in mikrorazpoke v toplotno vplivanem področju. Poškodbe so nastale na mejah feritnih zrn, na stikih treh zrn in na nekovinskih vključkih. Karbidna zrna v varu so med dolgotrajnim obratovanjem pri povišanih temperaturah zrasla in ležijo v temenskih varkih tudi po mejah stebrastih kristalnih zrn (**slika 11**). Natančneje preiskave v SEM so pokazale, da so mikropore nastale tudi v varu (**slika 12**).



Slika 10: SEM-posnetek mikropore ob nekovinskem vključku manganova sulfida v toplotno vplivanem področju

Figure 10: SEM micrograph of microcavity in the heat-affected zone at an inclusion of manganese sulphide

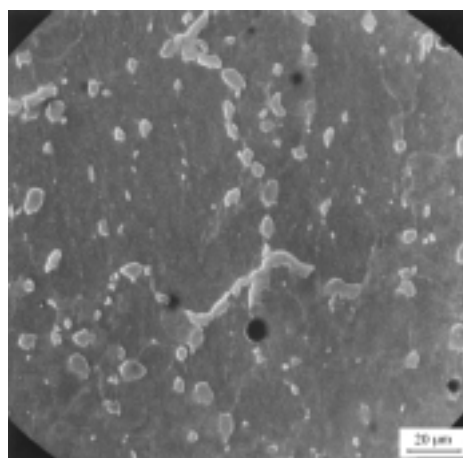


Slika 11: Mikrostruktura temenskega varka s karbidi izločenimi v matici in po mejah kristalnih zrn

Figure 11: Carbide particles in the matrix and at grain boundaries in the microstructure of the final-pass weld

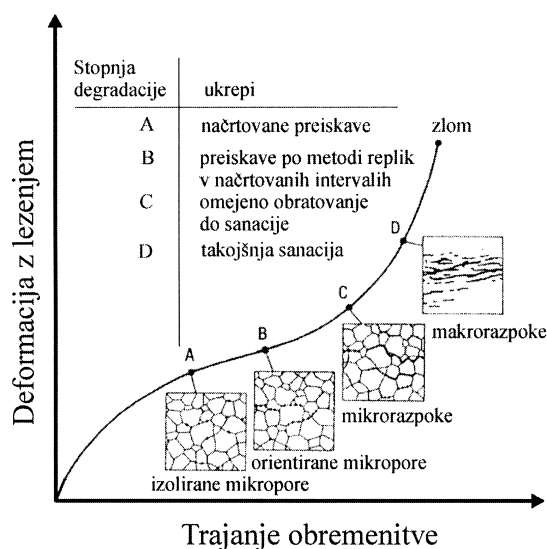
3 DISKUSIJA

Z mikrostrukturnimi preiskavami po metodi replik smo odkrili poškodbe na zvarih ohišij ventilov iz jeklene litine GS17CrMoV511 s parovodi in na zvarih na parovodih iz jekla 14MoV63. Poleg rasti karbidnih zrn smo v mikrostrukturi toplotno vplivanih področij na strani jekla 14MoV63 opazili mikropraznine, nize mikropraznin in kratke mikrorazpoke po mejah avstenitnih kristalnih zrn. Na vzorcih, izrezanih na zvarih sita s parovodom, smo pri natančnejših preiskavah v SEM opazili mikropraznine tudi v varu. Poškodbe so nastale zaradi deformacije z lezenjem na zvarih, ki so pri delovni temperaturi obremenjeni z notranjim pritiskom pare, z napetostimi zaradi varjenja ter še z dodatnimi stabilnimi in spreminjajočimi se napetostimi zaradi obratovanja (nihanje temperature, upogibni momenti, vibracije). Na zunanjih lokih parovodov poškodb nismo opazili.



Slika 12: SEM-posnetek mikropor ob karbidnih zrnih v varu

Figure 12: SEM micrograph of microcavities at carbide particles in the weld metal



Slika 13: Degradacija jekla v odvisnosti od trajanja deformacije z lezenjem¹

Figure 13: Degradation of steel depending on the length of the creep deformation¹

Pri vgradnji ima jeklo 14MoV63 mikrostrukturo iz visoko popuščene martenzita z izločenimi drobnimi karbidi. Jeklo ima predpisane mehanske lastnosti in odpornost proti deformaciji z lezenjem, ki so odvisne od velikosti in porazdelitve karbidov v kovinski matici. Parovodi obratujejo nad tako imenovano kritično temperaturo, ki je definirana kot temperatura, nad katero se jeklo pri statični obremenitvi deformira z lezenjem. Zato so parovodi preračunani na časovno statično trdnost in ne na napetost tečenja pri predvideni temperaturi obratovanja¹⁰. Med dolgotrajnim obratovanjem pri povišanih temperaturah se, kljub sorazmerno počasnim difuzijskim procesom (temperature ne presegajo 550 °C), nadaljujejo procesi popuščanja, ki jih deformacije, čeprav majhne, še pospešujejo. Zaradi rasti karbidnih izločkov se spreminjata njihova porazdelitev in število na enoto prostornine se zmanjšuje, zato se zmanjšuje tudi sposobnost za blokiranje dislokacij. Znižujejo se napetost tečenja, natezna trdnost, trdota jekla in odpornost proti deformaciji z lezenjem.

Mikropraznine in nizi mikropraznin po mejah kristalnih zrn začnejo lahko nastajati pri jeklu 14MoV63 pri dveh tretjinah predvidene dobe trajanja¹¹. Na deformacijski krivulji nastajajo poškodbe, ki smo jih opazili pri preiskavah, v sekundarnem področju lezenja. Nizi usmerjenih mikrorazpok začnejo nastajati na prehodu iz sekundarnega v terciarno območje lezenja (slika 13). V literaturi so podatki za jekla, ki so namenjena za najmočnejše obremenjene komponente termoenergetskih objektov, da imajo jekla s poškodbami na začetku terciarnega lezenja še 20 % preostale dobe trajanja. Priporoča se, da parovodi z mikroporami v mikrostrukturi lahko obratujejo še 3 leta, z nizi mikropor do 1,5 leta, z mikrorazpokami pa do 0,5 leta. Parovode z makrorazpokami pa je treba takoj nadomestiti z novimi⁷.

Podoben razvoj poškodb in predvideni časi zanesljivega obratovanja so navedeni tudi v drugih virih^{1,3,6}.

Na osnovi obširnejših preiskav so v literaturi podani časi napredovanja poškodb tudi za jeklo 14MoV63³. Pri konstantnih razmerah obratovanja poteka napredovanje poškodb od razreda 2 do razreda 3 v osnovnem materialu v času, daljšem od 50 000 ur, v zvarih, ki imajo slabše mehanske lastnosti (raztezek), pa v času, daljšem od 20 000 ur.

Mikropore navadno najdemo na globini, ki ne presega globine 1 mm, mikrorazpoke pa segajo navadno do globine 30 % debeline stene. Poškodbe se lahko izbrusi, vendar pa se po približno 5 000 urah obratovanja iz mikropor, ki so ostale v mikrostrukturi, ponovno razvijejo mikrorazpoke. Upoštevati pa moramo, da se z izbrusenjem zvarjeni spoji oslabijo⁷.

Mikrorazpoke, ki nastanejo iz deformacijskih por, vodijo do makrorazpok in v končni fazi do porušitve. Napredovanje razpok je odvisno od napetosti in orientacije začetnih mikrorazpok (radialne, aksialne). Zato je treba na poškodovanih področjih in izbrusenih mestih s ponovnimi preiskavami v določenih časovnih intervalih spremljati napredovanje poškodb, da je možna pravočasna sanacija.

4 SKLEP

Poškodbe so nastale na komponentah, ki so poleg temperature pare in notranjega pritiska obremenjene še z dodatnimi napetostmi, ki jih je pri računskih metodah težko zajeti. Parovodi so debelostenske cevi in so komplicirani ter sorazmerno togi sistemi, zato je njihovo napetostno stanje zapleteno. Prav tako tudi poškodb, ki smo jih odkrili na zvarih, v izračunih preostale dobe trajanja na osnovi mehanskih preiskav ni mogoče ovrednotiti v taki meri, da bi lahko z veliko natančnostjo napovedali preostalo dobo trajanja komponent^{9,11}. Toplotno vplivana področja zvarov so bila segreta od temperature predgrevanja do temperature tališča, in mikrostrukturne faze, ki so nastale pri ohlajanju in napetostnem žarjenju imajo različno odpornost proti deformaciji z lezenjem⁶. Poškodbe, ki smo jih odkrili z mikrostrukturnimi preiskavami po metodi replik in z meritvami trdote, kažejo, da je jeklo 14MoV63 precej izčrpano. Med prvo zaustavitvijo bloka bomo preverili stanje poškodb na zato predvidenem zvaru S5.1. V letu 2003 bodo parovode zamenjali z novimi iz jekla X10CrMoVNb91 (P91), ki ima boljšo odpornost proti deformaciji z lezenjem.

5 LITERATURA

¹ Ch. Laire, M. Eyckmans: Evaluating the condition and remaining life of older power plants, VGB Power Tech. 10 (2001) 98-102

² Guideline for the assessment of microstructure and damage development of creep exposed materials for pipes and boiler components, Technical-scientific Report, VGB-TW 507, 1992

- ³M. Remke: Component evaluation in existig power plants, RWTUEV, Essen, 1997
- ⁴C. Laenen: Estimation de l'endommagement par fluage des composants âgés de chaudières, un méthode: les répliques, Cete APAVE Normandie, N° 152
- ⁵C. Laenen: Caractérisation des fissures de surfaces par la méthode des répliques sur vernis, Cete APAVE Normandie, N° 141
- ⁶F. Vodopivec: O poškodbah jekla v parovodih in metodah za njihovo opredelitev, Železarski zbornik, 24 (1990) 3, 145-152
- ⁷R. Rintamaa, P. Auerkari, J. Salonen: Anwendung des Abdruckverfahrens zur Bestimmung der restlebensdauer vonb hochtemperaturbelasteten Bauteilen in finnischen Kraftwerken, Neue Hütte, 3 (1988) 110-114
- ⁸B. Neubauer, F. Arens-Fischer: Bestimmung der Restlebensdauer kriebeanspruchter Kraftwerkskomponenten, VGB Kongres, 1982
- ⁹R. Heitmüller, F. J. Adamsky, A. Helmrich, G. Scheffknecht: Austenitic/martensitic welds for boa unit niederaussem K, VGB 6 (2000) 60-67
- ¹⁰J. Žvokelj, D. Kmetič, F. Vodopivec, V. Leskovšek, L. Vehovar: Raziskava degradacije mehanskih lastnosti materialov v termoenergetskih napravah, Technical Scientific Report, Metalurški inštitut, 90-011, Ljubljana 1990
- ¹¹M. Thiele, SIEMENS, Technical Meeting 4, 13. 08. 2002, TE Šoštanj