



Resul Hamzić ^{1,a}, Namik Džibrčić ^{1,b}, Sead Avdić ^{1,c}

ISPITIVANJE MIKROSTRUKTURE PAROVODA VISOKOG PRITISKA NAKON 200 000 SATI RADA

EXAMINATION OF THE MICROSTRUCTURE OF HIGH-PRESSURE STEAM PIPES AFTER 200 000 HOURS OF OPERATION

Stručni rad / Professional paper

Rad primljen / Paper received

Septembar 2024.

Rad prihvaćen / Paper accepted

Novembar 2024.

Adresa autora / Author's address

¹ Institut za zavarivanje d.o.o. Tuzla, Bosne Srebrene br.6,
75000 Tuzla, Bosna i Hercegovina

Email / ORCID ID

^a resul.hamzic@jzz-bh.ba / 0009-0008-8864-9205

^b 0009-0006-3742-233X

^c 0009-0003-6992-7509

Ključne reči: mikrostruktura, puzanje, standard VGB-S 517, metalografske replike

Keywords: microstructure, creep, standard VGB-S 517, metallographic replica

Rezime

U ovom radu vršeno je ispitivanje mikrostrukture glavnih parnih cijevi u termoelektrani metodom metalografskih replika. Cilj istraživanja bio je analizirati i ocijeniti stanje parovoda nakon 200 000 sati rada, te ocijeniti preostali vijek trajanja uslijed dugotrajnih opterećenja prema standardu VGB-S 517. Ovaj standard postavlja stroge smjernice za inspekciju i ocjenu mikrostrukturnog stanja i oštećenja materijala otpornog na puzanje za cjevovode visokog pritiska i komponente kotlova i zavarenih spojeva, uzimajući u obzir parametre kao što su materijal, debljina stijenke i konstrukcija. Uz analizu mikrostrukture, poseban naglasak je stavljen na proučavanje vremenske čvrstoće parovoda, posebno u kontekstu puzanja. Puzanje ili deformacija pod stalnim opterećenjem tokom vremena uz visoke temperature i pritiske, ključni je faktor koji utiče na vijek trajanja parovoda. Rezultati provedenog istraživanja pokazat će širu sliku stanja parovoda nakon 200 000 sati rada, identificirati potencijalne defekte ili slabosti u materijalu i omogućiti pravovremeno poduzimanje odgovarajućih mjera za održavanje ili zamjenu, čime se smanjuje rizik od akcidenata i havarija.

Abstract

This study examined the microstructure of the main steam pipes in thermal power plant using the method of metallographic replicas. The aim of the research was to analyze and assess the condition of the pipes after 200 000 hours of operation, as well as to evaluate their remaining service life and endurance under long-term loads according to the VGB-S 517 standard. This standard establishes rigorous guidelines for inspecting and assessing the microstructural composition and damage due to creep in creep-resistant steel for high-pressure piping, boiler components, welded joints, considering the parameters such as material, wall thickness and construction. In addition to microstructure analysis, particular emphasis was placed on studying the time-dependent strength of the steam pipes, especially in the context of creep. Creep or deformation under constant load over time at high temperatures is a key factor influencing the long-term performance of the pipes. The results of the conducted research will provide a broader understanding of the condition of the steam pipes after 200 000 hours of operation, identify potential defects or weaknesses in the material and enable timely implementation of appropriate maintenance or replacement measures, thereby reducing the risk of accidents and failures.

Rad je u originalnom obliku objavljen u Zborniku radova sa 33. Savetovanja sa međunarodnim učešćem „Zavarivanje 2024“ održanog u Vrnjačkoj Banji, Srbija od 2. do 5. oktobra 2024. godine.



1. Uvod

Nakon 200 000 sati u radu, parovodi pod visokim pritiskom u termoelektranama mogu doživjeti značajne promjene u mikrostrukturi koje mogu ugroziti njihov integritet i sigurnost. Tokom tog perioda, materijal od koga su izrađene cijevi parovoda izložen je stalnom opterećenju i visokim temperaturama, što može dovesti do pojave puzanja. Puzanje je proces u kom se materijal postepeno deformiše pod stalnim opterećenjem i visokim temperaturama, što može rezultirati stvaranjem mikropukotina i konačnim otkazom materijala.

Očuvanje integriteta parovoda visokog pritiska je faktor za sigurnost i pouzdanu proizvodnju električne energije. Problematika dugotrajnog rada parovoda leži u činjenici da se mikrostrukturne promjene ne mogu lahko detektovati bez detaljne analize, a ignorisanje ovih promjena može dovesti do ozbiljnih posljedica. Pravovremena identifikacija i analiza stanja parovoda može pomoći u sprečavanju nesreća i produženju vijeka trajanja ovih ključnih komponenti termoelektrane.

Materijali od kojih su izrađene cijevi su visokolegirani i niskolegirani čelici X20CrMoV12-1 [1], 10CrMo9-10 [2] i 16Mo3 [3], otporni na puzanje i namijenjeni za rad na povišenim temperaturama. Koriste se za izradu dijelova kotla, cijevi pregrijača, parnih vodova, dijelova opreme za rad pod pritiskom itd.

Standard VGB-S 517 po kome se vrši ocjena, pruža smjernice za inspekciju i ocjenu stanja čelika otpornog na puzanje, koristeći precizne metode za analizu mikrostrukture i identifikacije oštećenja. Ovaj standard obuhvata procjenu parametara kao što su materijal, debljina stijenke i konstrukcija, te nudi metodologiju za kvantificiranje preostalog vijeka trajanja parovoda. Svrha primjene ovog standarda je omogućiti pravovremeno prepoznavanje potencijalnih problema i sprovođenje odgovarajućih mjera održavanja ili zamjene, čime se smanjuju rizik od akcidenta i posljedica u energetske postrojenjima.

Kontekst i značaj ovog istraživanja leži u osiguranju dugotrajne pouzdanosti i sigurnosti parovoda visokog pritiska, što je ključno za održavanje kontinuirane proizvodnje energije i prevenciju nesreća. Analiza mikrostrukture parovoda nakon 200 000 sati rada omogućava identifikaciju mogućih defekata i slabosti u materijalu, pružajući ključne informacije za planiranje održavanja i zamjene. Upravo zbog toga se došlo do primjene materijala poput P91, P92,

Inconel itd. Ovo istraživanje doprinosi naučnom i tehničkom znanju o dugoročnom ponašanju materijala pod ekstremnim uslovima, što je važno za razvoj novih, poboljšanih materijala i tehnologija.

Cilj ovog istraživanja je analizirati i ocijeniti stanje parovoda nakon 200 000 sati rada, te utvrditi promjene u mikrostrukturi uslijed dugotrajnih opterećenja prema standardu VGB-S 517. Rezultati istraživanja omogućit će pravovremeno poduzimanje odgovarajućih mjera za održavanje ili zamjenu, čime se smanjuje rizik od nezgoda i havarija. Iako je ovo prvo istraživanje na ovom parovodu, očekuje se da će prikupljeni podaci pružiti vrijedan uvid za buduće procjene preostalog vijeka trajanja, osiguravajući sigurniju i pouzdaniju proizvodnju.

S obzirom na to da su parovodi uglavnom projektovani za radni vijek od 200 000h, ovo predstavlja krajnji trenutak za procjenu njihovog stanja i stepena istrošenosti.

2. Postupak ispitivanja parovoda visokog pritiska metalografskim replikama

Ispitivanje mikrostrukture je bilo potrebno provesti na postojećim sistemima parovoda visokog pritiska koji nisu smjeli biti oštećeni, pa je za ispitivanje odabrana metoda metalografskih replika koja se provodila u skladu sa standardom BAS ISO 3057:1998 [4]. Ispitivanje mikrostrukture metalografskim replikama provodi se u nekoliko faza:

- priprema površine materijala (slika 1a),
- nagrizanje pripremljene površine materijala (slika 1b),
- izrada replike (slika 2),
- mikroskopska analiza i
- interpretacija i evaluacija dobivenih rezultata.

Prva faza postupka ispitivanja je priprema površine, što je ključno za osiguranje pouzdanih rezultata. Priprema površine počinje čišćenjem i odmaščivanjem te sušenjem u struji toplog vazduha. Zatim slijedi niz operacija brušenja površine, brusnim papirima različitih granulacija, pri čemu se pri svakom novom brušenju koristi brusni papir finije granulacije. Prilikom operacije brušenja treba voditi računa da ne dođe do pregrijavanja koje može dovesti do promjena u strukturi odnosno u svojstvima. Debljina uklonjenog sloja treba biti max. 0,2 [mm].



Nakon brušenja, ispitna površina se mehanički polira, a rezultat je ogledalna i glatka površina. Po završenom poliranju, ispitna površina se prvo ispira vodom, zatim alkoholom te se suši u struji toplog zraka. Kako bi se otkrile granice zrna, površinu je

nakon poliranja potrebno nagristi nanošenjem odgovarajućeg reagensa, zavisno od materijala koji se ispituje. Nakon nagrizanja, ponovo je potrebno očistiti površinu uzoraka na isti način kao i prije nagrizanja [4,5].



(a)



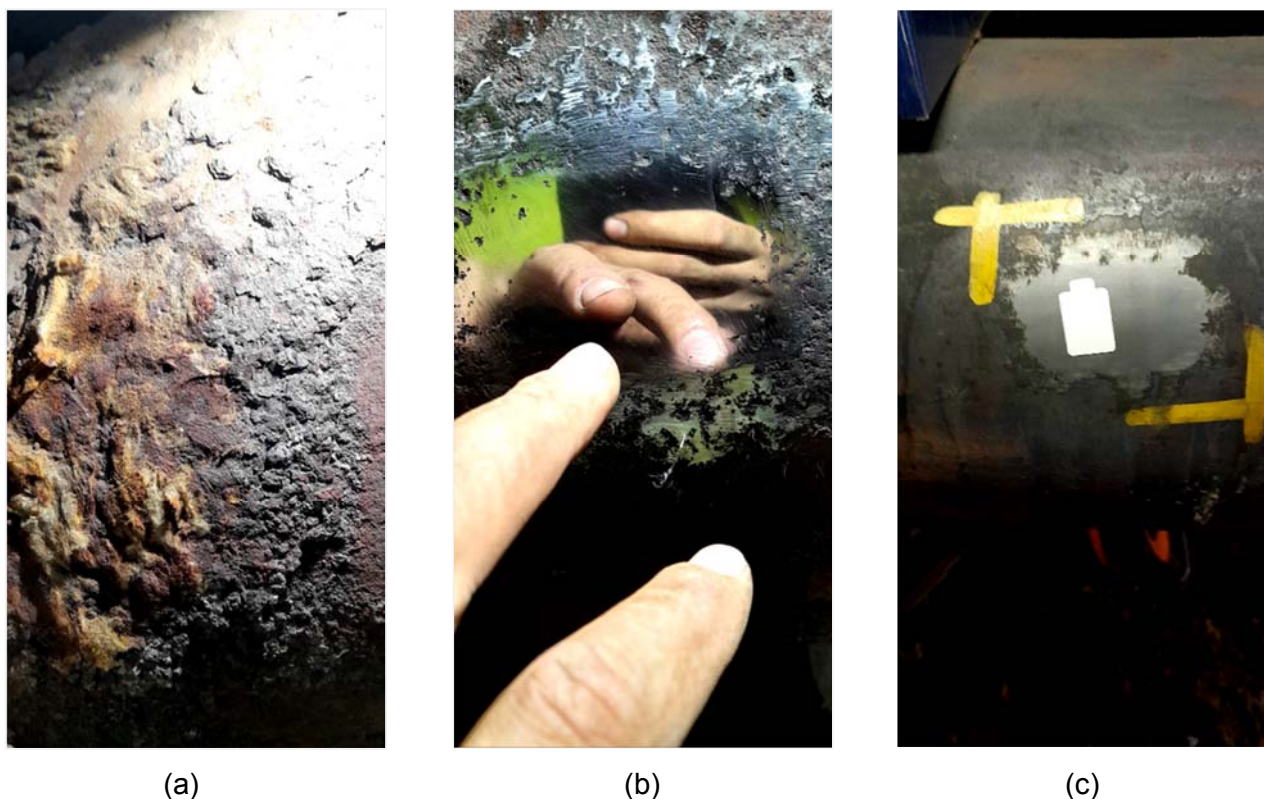
(b)

Slika 1. a) Priprema ispitne površine brušenjem i poliranjem, b) nagrizanje ispitne površine odgovarajućim reagensom

Figure 1. a) Preparation of the test surface by grinding and polishing, b) etching of the test surface with a suitable reagent

Nakon pripreme površine, slijedi nanošenje replika, u našem slučaju kao replikant je korištena folija proizvođača *Struers* (Transcopy Replica Foil). Prije postavljanja folije potrebno je ovlažiti površinu odgovarajućom otopinom te je foliju potrebno postaviti tako da dobro prione na površinu [6]. Nakon što se folija formira na

površini, pažljivo se uklanja, kako bi se dobio kompletan otisak mikrostrukture materijala. Ovaj korak zahtijeva preciznost kako bi se izbjeglo oštećenje replike. Kvalitetno izuzeta replika treba tačno odrediti sve mikrostrukturne karakteristike prisutne na površini koja je replicirana (granice zrna, faze, pukotine, šupljine, itd.).



Slika 2. a) Izgled površine prije operacije brušenja i poliranja, b) izgled površine nakon operacije brušenja i poliranja, c) nanesena folija za repliciranje

Figure 2. a) Appearance of the surface before the grinding and polishing operation, b) appearance of the surface after the grinding and polishing operation, c) applied foil for replicating

3. Rezultati ispitivanja

Ispitivanje je provedeno na cijevima parovoda izrađenih od različitih materijala, uključujući:

- Cijevi svježe pare oznake RA ($\varnothing 258 \times 38$ mm), izrađene od visokolegiranog čelika X20CrMoV12-1 (1.4922). Ovaj čelik odlikuje otpornost na visoku temperaturu i pritisak, što ga čini pogodnim za izradu cijevi parovoda visokog pritiska.
- Cijevi pregrijane pare oznake RB ($\varnothing 648 \times 38$ mm), izrađene od niskolegiranog čelika 10CrMo9-10 (1.7380). Ovaj čelik još poznat po oznaci P22 je legirani čelik sa sadržajem kroma (Cr) i molibdena (Mo), karakterističan po visokoj otpornosti na oksidaciju pri povišenim temperaturama i srednjim pritisacima.
- Cijevi hladne pare oznake RC ($\varnothing 470 \times 15,5$ mm), izrađene od niskolegiranog čelika 16Mo3 (1.5415), kog odlikuju dobre mehaničke osobine, prije svega visoka otpornost na puzanje.

Mikroskopskom analizom utvrđivana je pojava mikropukotina, pojava oksidacije, degradacija svojstava, odnosno pojava puzanja.

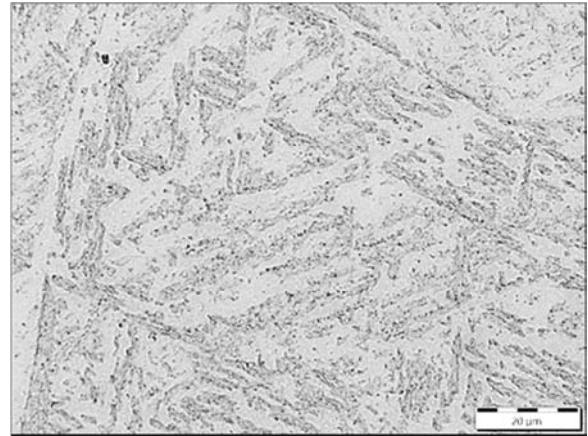
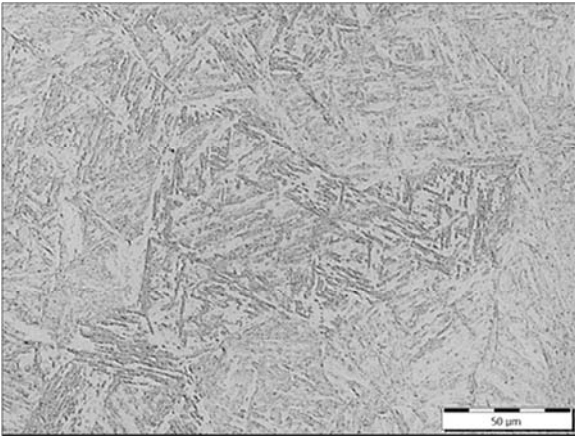
Analiza otiska mikrostrukture provedena je na metalurškom mikroskopu *Olympus GX53*, primjenom norme VGB-S 517 (metodom usporedbe s referentnim slikama). Pored metalografskog ispitivanja provedeno je ispitivanje tvrdoće, uređajem za mobilno mjerenje tvrdoće *BAQ dynaROCK II*. Na svakom ispitnom mjestu provedeno je 7 mjerenja, a rezultati ispitivanja tvrdoće predstavljaju njihovu aritmetičku sredinu.

Mjesta za ispitivanje su vanjski radijusi na koljenima, zone koje su najviše izložene dejstvu radnog medija.

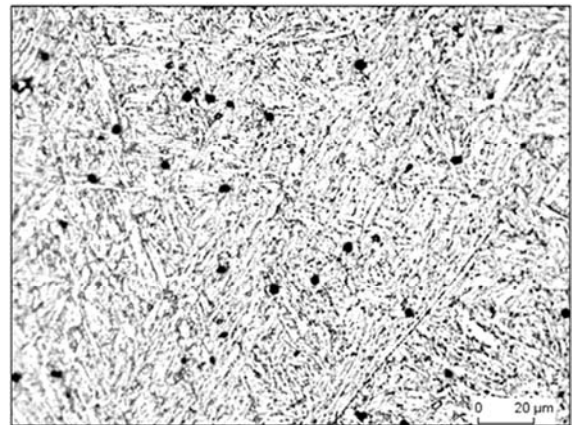
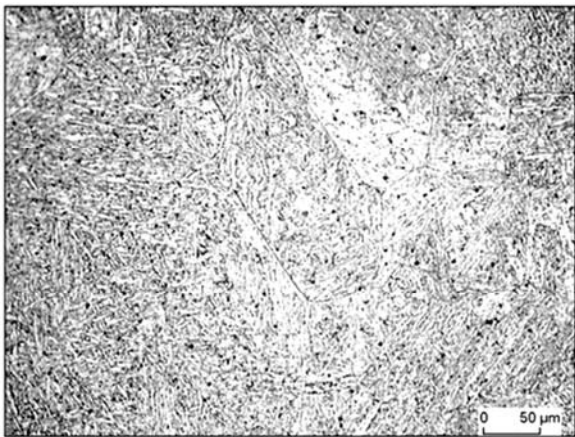
Replika izuzeta sa koljena cijevi svježe pare oznake RA, snimljena pod povećanjem od 200:1 i 500:1 data je slici 3. Na slici je uočljiva mikrostruktura lamelnog žarenog martenzita, sa ustanovljenim prisustvom mikropora u količini većoj od 150 po kvadratnom milimetru.

Mikrostruktura je ocjenjena metodom usporedbe s referentnim slikama u skladu sa klasom ocjene 2b prema standardu VGB-S 517 (slika 4).

Prosječna tvrdoća dobivena kao srednja vrijednost 7 mjerenja iznosi 229 HV.



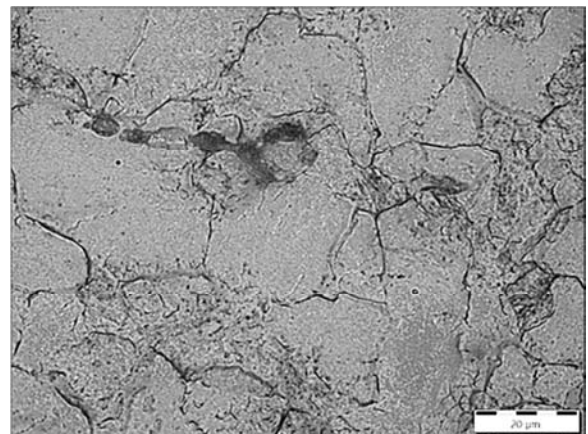
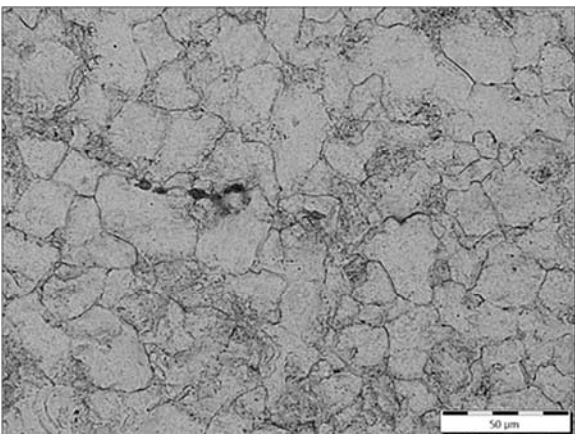
Slika 3. Mikrostruktura replike koljena cijevi od materijala X20CrMoV12-1 povećanje 200:1 i 500:1
Figure 3. Microstructure of the pipe elbow replica made of material X20CrMoV12-1, magnification 200 times and 500 times



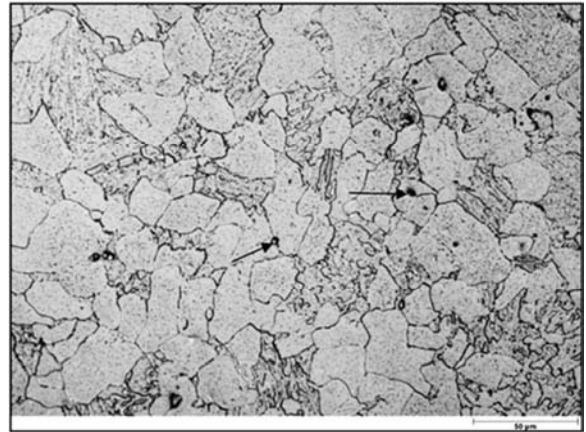
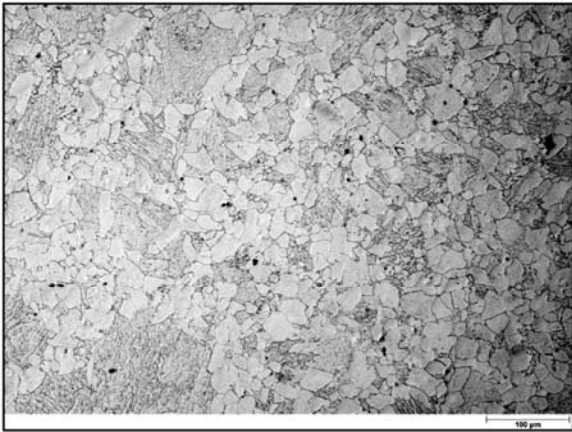
Slika 4. Referentne slike za materijal X20CrMoV12-1 klasa ocjene 2b, prema standardu VGB-S 517 [5]
Figure 4. Reference images for material X20CrMoV12-1 grade 2b, according to standard VGB-S 517 [5]

Na slici 5. prikazana je mikrostruktura izuzeta sa koljena cijevi pregrijane pare oznake RB. Na slikama uvećanja 200:1 i 500:1 dominantna je feritna struktura sa karbidima, odnosno struktura raspadnutog bainita.

Zastupljenost mikropora je veća od 150 po kvadratnom milimetru. Prosječna tvrdoća dobivena kao srednja vrijednost 7 mjerenja je 190 HV. Na slici 6 dat je prikaz referentnih slika za čelik 10CrMo9-10, klasa ocjene 2a (slika 6).



Slika 5. Mikrostruktura replike koljena cijevi od materijala 10CrMo9-10 povećanje 200:1 i 500:1
Figure 5. Microstructure of a replica elbow made of 10CrMo9-10 material, magnification 200 times and 500 times

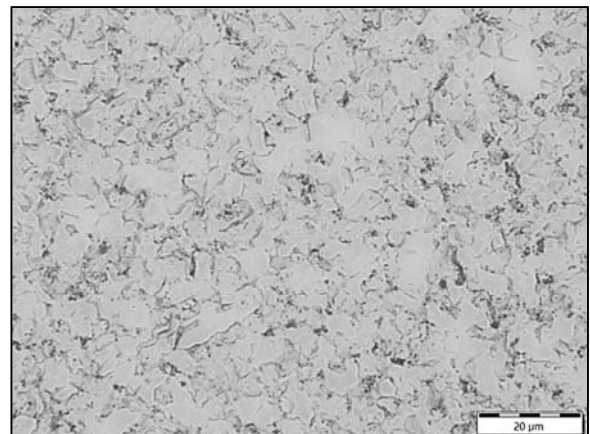
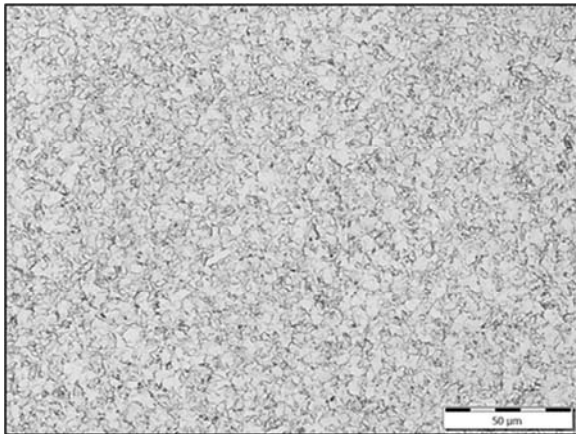


Slika 6. Referentne slike za materijal 10CrMo9-10 klasa ocjene 2a, prema standardu VGB-S 517 [5]

Figure 6. Reference images for material 10CrMo9-10 grade 2a, according to standard VGB-S 517 [5]

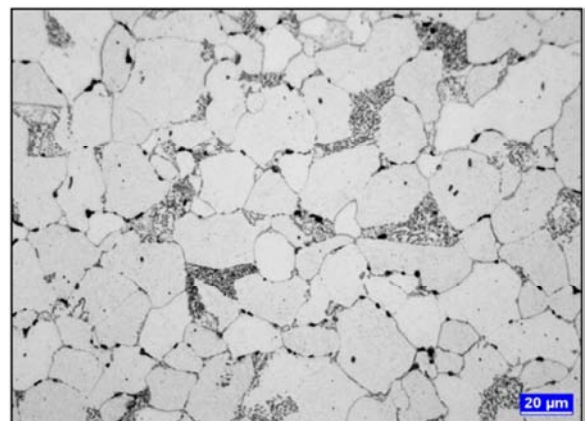
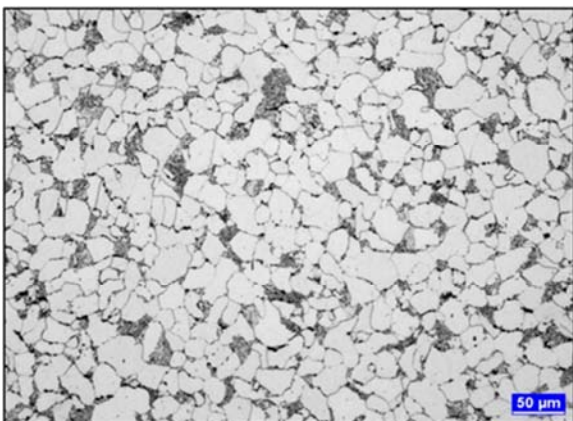
Na slici 7 uočljiva je feritna mikrostruktura izuzeta sa koljena cijevi hladne pare oznake RC, izrađenog od materijala 16Mo3. Iako je dominantnija feritna struktura, može se uočiti i struktura bainita. Zastupljenost mikropora je manja od 150 po milimetru kvadratnom.

Mikrostruktura je ocjenjena u skladu sa klasom ocjene 3a prema standardu VGB-S 517 (slika 8). Prosječna vrijednost tvrdoće 160 HV.



Slika 7. Mikrostruktura replike koljena cijevi od materijala 16Mo3 povećanje 200:1 i 500:1

Figure 7. Microstructure of a replica of a pipe elbow made of 16Mo3 material, magnification 200 times and 500 times



Slika 8. Referentne slike za materijal 16Mo3 klasa ocjene 3a, prema standardu VGB-S 517 [5]

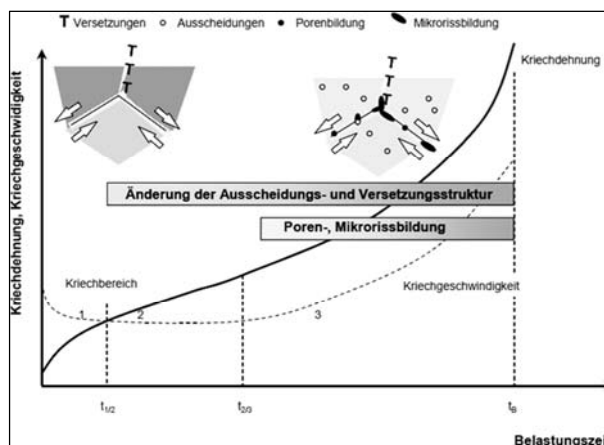
Figure 8. Reference images for material 16Mo3 grade 3a, according to standard VGB-S 517 [5]



Dobijeni rezultati ukazuju na prisustvo puzanja materijala uslijed dugotrajne eksploatacije, pri čemu se stanje materijala nalazi u skladu s projektovanim vijekom. Važno je istaknuti da prema predviđanjima, upravo u ovom periodu može doći do eksponencijalnog povećanja degradacije materijala, što može rezultirati pojavom mikro i makro pukotina.

Mikro pukotine se mogu detektovati primjenom metoda metalografskih replika, dok se makro pukotine identifikuju pomoću površinskih metoda ispitivanja bez razaranja, ali kada dođe do njihove pojave, često je već kasno za preventivne mjere.

Na slici 9 dat je dijagram procesa nastanka puzanja, koji je prikazan u standardu VGB-S 517.



Legende Bild 3.7	Tumačenja oznaka sa slike 3.7
Versetzungen	Dislokacije
Ausscheidungen	Taloženje
Porenbildung	Formiranje pore
Mikrorissbildung	Formiranje mikropukotine
Kriechdehnung	Izduženje uslijed puzanja
Kriechdehnung, Kriechgeschwindigkeit	Napon puzanja, brzina puzanja
Änderung der Ausscheidungs und Versetzungsstruktur	Promjena eliminacijske i prelazne structure
Poren, Mikrorissbildung	Pore, nastanak mikropukotina
Kriechbereich	Nivo propagacije puzanja
Kriechgeschwindigkeit	Nivo puzanja
Belastungszeit	Vrijeme izloženosti naprezanju

Slika 9. Odnos između deformacije uslijed puzanja i vremena naprezanja, razvoj mikrostrukturnih oštećenja [5]

Figure 9. Relationship between creep deformation and stress time, development of microstructural damage [5]

4. Zaključak

U ovom radu provedeno je ispitivanje mikrostrukture i tvrdoće glavnih parovodnih cijevi nakon 200 000 sati rada.

Ispitivanje je provedeno na cijevima parovoda izrađenih od različitih materijala, uključujući:

- Cijevi svježe pare oznake RA (Ø258x38 mm), izrađene od visokolegiranog čelika X20CrMoV12-1 (1.4922). Ovaj čelik odlikuje otpornost na visoku temperaturu i pritisak, što ga čini pogodnim za izradu cijevi parovoda visokog pritiska.

4. Conclusion

In this paper, the microstructure and hardness of the main steam pipes were tested after 200,000 hours of operation.

The test was carried out on steam pipes made of different materials, including:

- Pipes of fresh steam marked RA (Ø258x38 mm), made of high-alloy steel X20CrMoV12-1 (1.4922). This steel is characterized by resistance to high temperature and pressure, which makes it suitable for making high-pressure steam pipes.



- Cijevi pregrijane pare oznake RB (Ø648x38 mm), izrađene od niskolegiranog čelika 10CrMo9-10 (1.7380). Ovaj čelik još poznat po oznaci P22 je legirani čelik sa sadržajem kroma (Cr) i molibdena (Mo), karakterističan po visokoj otpornosti na oksidaciju pri povišenim temperaturama i srednjim pritiscima.
- Cijevi hladne pare oznake RC (Ø470x15,5 mm), izrađene od niskolegiranog čelika 16Mo3 (1.5415), kog odlikuju dobre mehaničke osobine, prije svega visoka otpornost na puzanje.

Ispitivanje mikrostrukture je provedeno i skladu sa standardom BAS ISO 3057:1998, a dobijeni rezultati ocjenjeni u skladu s standardom VGB-S 517, metodom usporedbe referentnim slikama, kao i softverskom analizom količine mikropora.

Provedenim ispitivanjem utvrđeno je da:

- Kod svih ispitanih cijevi došlo je do puzanja materijala uslijed eksploatacije.
- Stanje materijala svih cijevi je u skladu sa projektovanim vijekom.
- Nema pojava mikro pukotina, ali postoje mikro pore u određenom nivou za sva pojedinačna ispitivanja.
- Tvrdće svih pojedinačnih ispitivanja zadovoljavaju projektovane vrijednosti.

Rezultati analize dobivenih rezultata pokazuju da je potrebno u redovnim intervalima pratiti stanje cjevovoda kako bi se adekvatno reagovalo u slučaju pojave struktura opisanih u standardu VGB-S 517 ocjenama 3B i 4, odnosno datih slikom 9. Budući da se radi o opremi koja zahtijeva kontinuirano praćenje i ispitivanje tokom eksploatacije, dobiveni rezultati će poslužiti kao referenca za poređenje sa budućim analizama. S obzirom na to da je parovod nadmašio svoj projektovani vijek, neophodno je učestalije ispitivanje materijala, jer upravo u ovoj fazi materijal se nalazi u procesu ubrzanog rasta dislokacija, mikropora, mikro i makropukotina.

References / Literatura

- [1] BAS EN 10088-1:2015, Institut za standardizaciju Bosne i Hercegovine
- [2] BAS EN 10216-2:2021; Institut za standardizaciju Bosne i Hercegovine
- [3] BAS EN 10216-2:2021; Institut za standardizaciju Bosne i Hercegovine.
- [4] BAS ISO 3057:1998 - Ispitivanje bez razaranja - Metoda ispitivanja površine pomoću metalografskih replika; Institut za standardizaciju Bosne i Hercegovine.

- Tubes of superheated steam marked RB (Ø648x38 mm), made of low-alloy steel 10CrMo9-10 (1.7380). This steel, also known by the designation P22, is an alloy steel with a content of chromium (Cr) and molybdenum (Mo), characterized by high resistance to oxidation at elevated temperatures and medium pressures.
- Cold steam pipes marked RC (Ø470x15.5 mm), made of low-alloy steel 16Mo3 (1.5415), characterized by good mechanical properties, above all, high creep resistance.

The microstructure test was also carried out in accordance with the BAS ISO 3057:1998 standard, and the obtained results were evaluated in accordance with the VGB-S 517 standard by the method of comparison with reference images, as well as software analysis of the amount of micropores.

The conducted investigation established that:

- In all tested pipes, material creep occurred due to exploitation.
- The material condition of all pipes is in accordance with the designed life.
- There are no occurrences of micro-cracks, but there are micro-pores in a certain level for all individual tests.
- The hardness of all individual tests meets the projected values.

The results of the analysis of the obtained results show that it is necessary to monitor the condition of the pipeline at regular intervals in order to adequately react in the event of the appearance of the unsafe structures described in the standard VGB-S 517 grades 3B and 4 that is, given in Figure 9. Since this is equipment that requires continuous monitoring and testing during exploitation, the obtained results will serve as a reference for comparison with future analyses. Given that the steam pipeline has exceeded its designed life, more frequent testing of the material is necessary, because it is precisely at this stage that the material is in the process of accelerated growth of dislocations, micropores, micro- and macrocracks.

- [5] VGB-S 517 - Smjernice za ocjenjivanje mikrostrukturnog sastava i oštećenja od puzanja čelika otpornog na puzanje za cjevovode visokog pritiska i komponente kotlova i njihove zavarene spojeve; VGB PowerTech Service GmbH, Essen, Germany.

- [6] Transcopy Instruction for use; Struers 2016.