

VPLIV TERMOMEHANSKIH OBREMENITEV PRI DOLGOTRAJNEM OBRATOVANJU NA LASTNOSTI MATERIALA 15NiCuMoNb5

INFLUENCE OF THE THERMOMECHANICAL LOAD ON THE PROPERTIES OF 15NiCuMoNb5

Boštjan Godec, Viktor Grdun

Inštitut za metalne konstrukcije, Mencingerjeva 7, 1000 Ljubljana, Slovenija
bostjan.godec@imk.si

Prejem rokopisa - received: 2001-02-10; sprejem za objavo - accepted for publication: 2001-03-10

Jeklo 15NiCuMoNb5 (Wb36) je namenjeno za obratovanje pri povišanih temperaturah v energetskih objektih. Material ima feritno-bainitno mikrostrukturo z izločenimi karbidi in povečane mehanske lastnosti zaradi legiranja z nikljem, molibdenom, niobijem in bakrom. V različnih termoeenergetskih objektih so se pri tem jeklu pojavile poškodbe, v obliki razpok in lomov, ki pa so bile večinoma povezane z neugodnimi obratovalnimi razmerami. Da bi ugotovili v kakšnem stanju je material parovoda po 170.000 urah obratovanja pri 350 °C in 220 bar smo opravili na izrezanem delu cevi mehanske, lomnomehanske in metalografske preiskave ter preiskave časovne trajne trdnosti.

Ključne besede: 15NiCuMoNb5, Wb36, izločevalno utrjevanje, udarna zarezna žilavost, časovna trajna trdnost

The 15NiCuMoNb5 (Wb36) steel is used for the elevated temperatures and pressures that are typical of the working conditions in power plants. The microstructure of the steel is ferrite and bainite with carbide precipitate. The enhanced mechanical properties occur due to nickel, molybdenum, niobium and copper alloys. In past years a lot of damage occurred in connection with this material in power plants in the form of cracks and fractures, mainly due to unfavourable working conditions. The piece of tube was cut to determine the condition of the pipe material after 170.000 operating hours at 350 °C and 220 bar. Mechanical, fracture mechanical, metallographic and short-time creep rupture tests were performed to estimate the material changes.

Keywords: 15NiCuMoNb5, Wb36, particle strengthening, notch-bar impact energy, accelerated creep rupture test

1 UVOD

Material WB 36 - 5NiCuMoNb5 (št. mat. 1.6368) spada v skupino mikrolegiranih jekel za povišane temperature s sorazmerno nizkim ogljikom. Zaradi legiranja z nikljem, molibdenom, niobijem in bakrom dobimo pri relativno nizkih ohlajevalnih hitrostih mikrostrukturo s povečanimi mehanskimi lastnostmi in z značilno feritno bainitno mikrostrukturo z izločenimi karbidi^{1,2,4,5}.

Njegovo široko področje uporabe omogoča izboljšana napetost tečenja pri povišanih temperaturah¹. Uporablja se kot material za cevovode in posode v termoeenergetskih objektih in nuklearnih elektrarnah, tako v vrelovodnih (BWR) in tlačno vodnih reaktorjih (PWR). Pri klasičnih termoelektrarnah ga uporabljamo do temperatur 450 °C, pri nuklearnih pa navadno do 300 °C in manj pogosto pri tlačnih posodah do 340 °C.

Pri nekaterih objektih, kjer je bilo vgrajeno jeklo WB 36, so po večjem številu obratovalnih ur 90.000-160.000 v zadnjih dveh desetletjih opazili nekatere poškodbe v cevni sistemih in tlačnih posodah. V vseh opisanih primerih je bila temperatura obratovanja med 320 in 350 °C ali višje. Čeprav avtorji^{1,3,4,5} navajajo različne vzroke poškodb, pa je pri vseh bilo opaziti utrjevanje materiala, povezano s padcem žilavosti, kar je v glavnem povezano s premikom temperature prehoda v krhko stanje pri

udarni zarezni žilavosti k višjim temperaturam. Na to temo je bilo narejenih v zadnjih letih veliko raziskav^{1,3,4,5,6}. Čeprav še veliko stvari ni popolnoma razjasnjenih pa ugotovitve kažejo, da do tega pride zaradi precipitacije bakra, ki se odvija med dolgotrajnim obratovanjem pri temperaturah nad 320 °C^{1,3}.

2 EKSPERIMENTALNI DEL

Izvedene so bile preiskave materiala WB36-U, odvzetega iz cevovoda NB 53 (φ 191 mm x 11 mm) na bloku 5 TEŠ po 170.000 urah obratovanja pri delovnih razmerah 350 °C in tlaku 220 bar, in primerjalno z materialom WB36-N (φ 192 mm x 14 mm), ki ni bil izpostavljen obratovalnim razmeram. Namen raziskave je podati oceno stanja materiala in pri tem upoštevati literaturne podatke glede nenadnih poškodb v svetu, ki so se v nekaterih primerih v preteklosti pojavljale pri teh materialih.

Baker, nikelj in niobij, kakor tudi povišane vsebnosti molibdena skupaj z znižanim kromom so značilne za WB36 (**tabela 1**).

Mehanske lastnosti uporabljenega materiala in novega se razlikujejo (**tabela 2, slika 2**). V celotnem temperaturnem območju do 500 °C velja, da ima uporabljen material višje vrednosti napetosti tečenja in trdnosti ter nižje vrednosti raztezkov v primerjavi z

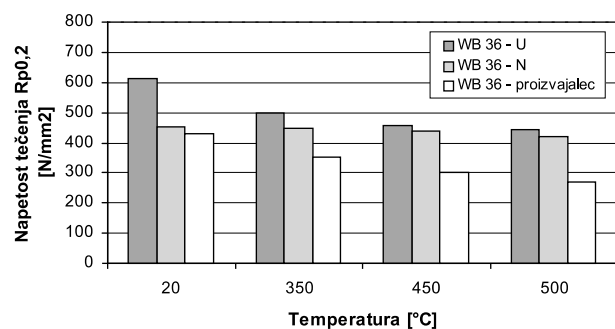
Tabela 1: Kemična analiza**Table 1:** Chemical analysis

Material	Kemična sestava [%]					
	C	Si	Mn	P	S	Cr
WB 36 - U	0,12	0,28	1,04	0,008	0,014	0,28
WB 36 - N	0,14	0,34	1,02	0,015	0,003	0,17
WB 36 - proizvajalec	≤0,17	0,25-0,50	0,80-1,20	≤0,035	≤0,035	-
	Mo	Ni	Cu	Nb	Al	N
WB 36 - U	0,35	1,16	0,62	0,035	0,005	0,011
WB 36 - N	0,38	1,32	0,58	0,025	0,042	0,014
WB 36 - proizvajalec	0,25-0,50	1,00-1,30	0,50-0,80	≈ 0,02	0,015-0,050	≤0,020

Tabela 2: Natezni preskusi pri različnih temperaturah**Table 2:** Tensile tests at different temperatures

Material	Napetost tečenja $R_{p0,2}$ (R_{eH}) [N/mm ²]	Natezna trdnost R_m [N/mm ²]	Raztezek A [%]	Kontrakcija Z [%]	Temperatura preskusa [°C]
WB 36 - U	611*	708	17,0	50	20
	511	644	16,5	55	350
	486	633	20,7	55	
	448	590	15,0	55	450
	456	605	19,3	60	
WB 36 - N	439	516	22,0	70	500
	445	580	18,7	60	
	454	677	21,2	67	20
	450	644	24,0	58	350
	442	603	21,0	64	
WB 36 - proizvajalec	474	578	19,0	66	450
	441	533	19,3	72	
	401	507	17,3	73	500
	439	519	20,7	70	
	≥430	610-760	≥16,0	-	20
15Mo3 - proizvajalec	≥175	430-520	≥19,0	-	350
13CrMo44 - proizvajalec	≥215	430-550	≥18,0	-	350

novim. Z višanjem temperature nateznega preskusa se ta razlika zmanjšuje in pri 500 °C imata že zelo podobne lastnosti. Če te rezultate primerjamo s podatki proizvajalca jekla Manessmanna, ugotovimo, da ima material, ki je bil v uporabi še vedno ustrezne mehanske lastnosti (**tabela 2, slika 1**).

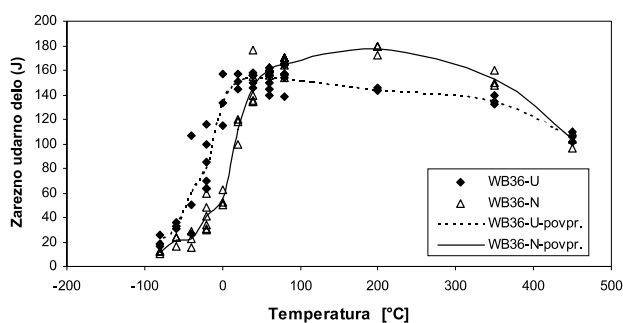
**Slika 1:** Primerjava napetosti tečenja $R_{p0,2}$ v odvisnosti od temperature**Figure 1:** Comparison of yield point $R_{p0,2}$ and dependence on temperature

Če primerjamo dobljene rezultate z navadnimi materiali, ki se uporabljajo v teh razmerah ugotovimo, da je napetost tečenja pri materialu WB36 pri 350 °C skoraj dvakrat višja, kar daje jeklu široko uporabo v tem srednjem temperaturnem območju.

Meritve trdot po Brinelu (trdota HBS 2,5/187,5) so bile narejene na preseku cevi v X in Y smeri in so pokazale, da ima material WB36-U v povprečju 228 HB in WB36-N v povprečju 212 HB.

Udarne žilavostni preskusi so bili narejeni po Charpy-ju z V zarezo v območju temperatur od -80 do +450 °C (**slika 2**). Material, ki je bil izpostavljen obratovanju WB-36-U ima prehod v krhko stanje pri nižji temperaturi ($T_{pr} = -60$ °C) v primerjavi z novim WB36-N ($T_{pr} = -20$ °C). Pri 50 °C se krivulji križata in v temperaturnem območju 350 °C, kjer material obratuje, je žilavost za oba materiala visoka, vendar ima material WB36-N nekoliko višje vrednosti.

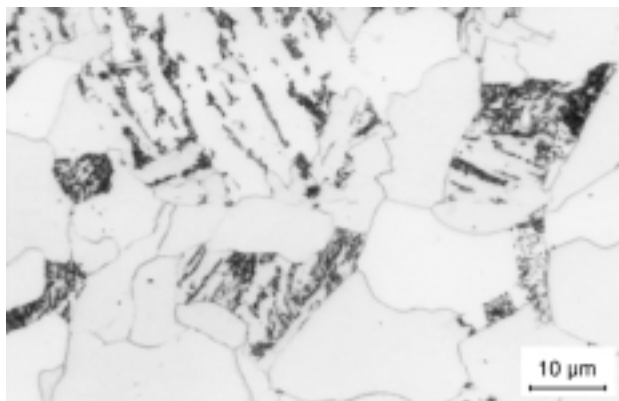
Metaloografska preiskava nam je potrdila domnevo, da je material WB36-N popuščan na višji temperaturi. V drobnostni mikrostrukturi je ferit in bainit (**slika 4, 6**).



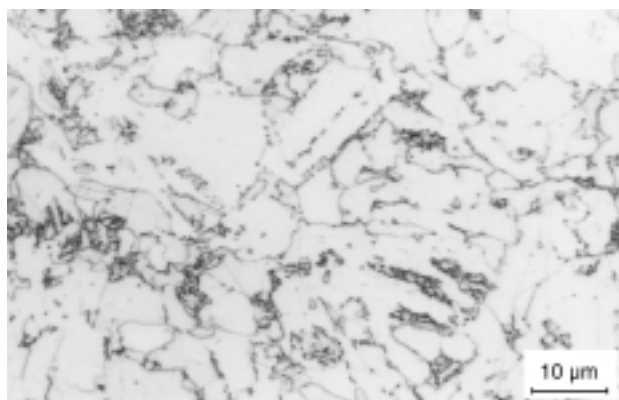
Slika 2: Krivulji žilavosti za WB36-U in WB36-N
 Figure 2: Toughness curves for WB36-U and WB36-N

Izločeni karbidi po mejah zrn in v feritnih zrnih so drobni, vendar v primerjavi z WB36-U nekoliko večji. Slednji ima drobnozrnato mikrostrukturo iz ferita in bainita (slika 3, 5).

Pri odvzetih vzorcih cevovoda iz materiala WB36-U in WB36-N smo izvedli preiskavo časovne trajne trdnosti (slika 7). Narejene so bile serije epruvel ϕ 3,0 mm in merilne dolžine 15 mm, ki so bile na koncih odebeljene in opremljene z navoji za vpetje v vpenjalne glave. Preskušanci so bili izpostavljeni temperaturam 400, 450, 500 in 550 in statičnim obremenitvam, ki so bile izbrane tako, da je do preloma prišlo v času od 50 do



Slika 3: WB 36 - U
 Figure 3: WB 36 - U



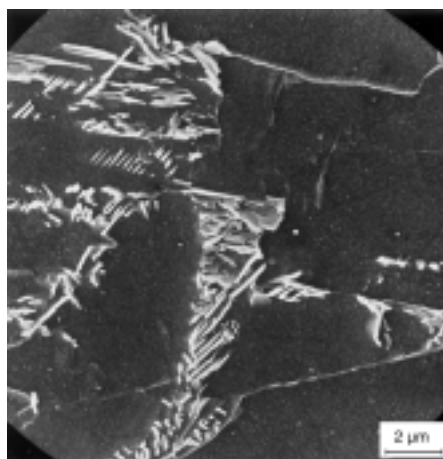
Slika 4: WB36 - N
 Figure 4: WB36 - N

3.000 ur. Pri teh preiskavih uporabimo temperature, ki so višje kot pri dejanskem obratovanju, s čimer pospešimo čas do preloma. Prostorsko odvisnost med napetostjo σ , temperaturo preizkušanja T in časom do porušitve t_B izpeljemo s parametrom P v dvodimenzijsko odvisnost (σ - P). Parameter P , ki je odvisen od temperature T in časa do porušitve t_B , smo prevzeli po Mansonu in Haferdu in ima naslednjo obliko¹²:

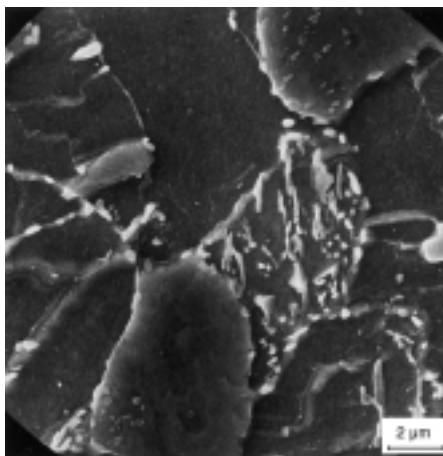
$$P = \frac{\log t_B - A}{T - B}$$

kjer sta A in B konstanti materiala, T temperatura preskušanja v K in t_B čas do porušitve v urah. Konstanti A in B smo ugotovili iz podatkov o najmanjši časovni trdnosti materiala, tako da parameter P ustreza za časovne trdnosti pri 100.000 urah in pri 10.000 urah obremenitve parovoda (podatki proizvajalca cevi Mannesmann²). Za izpolnitev navedenega pogoja dobimo parameter P v obliki:

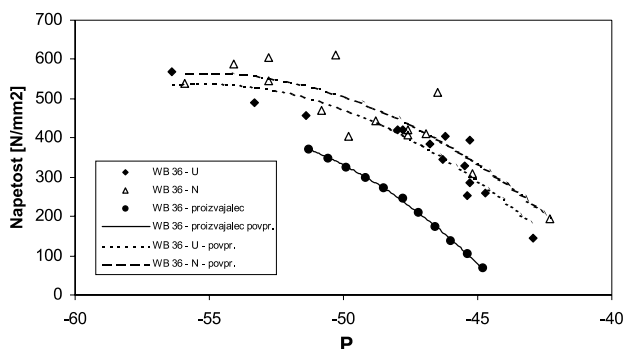
$$P = 1000 \frac{\log t_B - 39,28}{T + 14,42}$$



Slika 5: WB 36 - U
 Figure 5: WB 36 - U



Slika 6: WB36 - N
 Figure 6: WB36 - N



Slika 7: Odvisnost med napetostjo σ in parametrom P (čas do porušitve t_B , temperatura preskusa T) za cevovod iz materiala WB36-U po 170.000 urah obratovanja in neuporabljenega materiala WB36-N

Figure 7: Correlation between stress σ and parameter P (time to rupture t_B , test temperature T) for tube from materials WB36-U after 170.000 hours of working, and new material WB36-N

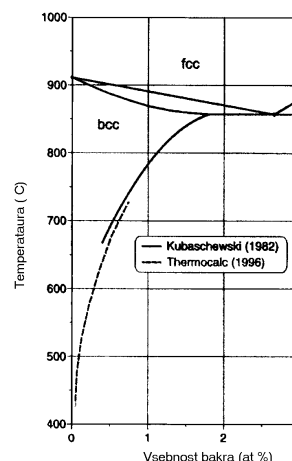
Krivulja časovne trajne trdnosti za dejansko stanje materiala leži vsepovsod nad vrednostjo, zahtevano za material WB36².

3 DISKUSIJA

Direktna primerjava rezultatov raziskave cevi, ki je bila v uporabi in novi ni možna, saj so preskusi pokazali, da imata jekli različno izhodno stanje zaradi različne toplotne obdelave. Glede na opravljene preiskave ugotavljamo, da pri materialu stare cevi ni prišlo zaradi obratovanja do sprememb v mikrostrukturi v takšnem obsegu, ki bi lahko znatno vplivale na poslabšanje njegovih lastnosti. Vse preiskave kažejo na to, da je material kljub relativno dolgemu času obratovanja zadržal večji del lastnosti izhodnega stanja.

V preteklih letih so bile na teh materialih po nekaterih spektakularnih poškodbah izvedene obsežne preiskave. Pojavljajo se dve vrsti poškodb: tvorba razpok in krhki prelomi pri tlačnih preskusih. Poškodbe v obliki razpok naj bi bile povezane s pojavom deformacijsko inducirane napetostne korozije in je v povezavi z vsebnostjo kisika v vodi. Krhki prelomi pa naj bi bili v povezavi z znižanjem žilavosti materiala pri dolgotrajnem obratovanju. Premaknitev prehodnega področja žilavosti k višjim temperaturam kažejo podobno tudi nekatera druga toplotno obstojna jekla, vendar pa pri njih ne prihaja do poviševanja napetosti tečenja.

Razlago za spremembe, ki nastanejo pri materialu WB36 pri obratovanju so avtorji¹ izpeljali iz faznega diagrama železo - baker, prikazanega na **sliki 8**. Topnost bakra v jeklu pri temperaturah pod približno 650 °C ni bila poznana do leta 1980. Privzeto je bilo, da jeklo, ki ga toplotno obdelamo pri temperaturah med 650 in 550 °C, ne bo vsebovalo raztopljenega bakra. Danes pa je znano, da jeklo WB36, žarjeno v tem temperaturnem področju, še vedno vsebuje delež bakra (40 %) v trdni raztopini¹. Zaželen porast trdnosti pri tem materialu



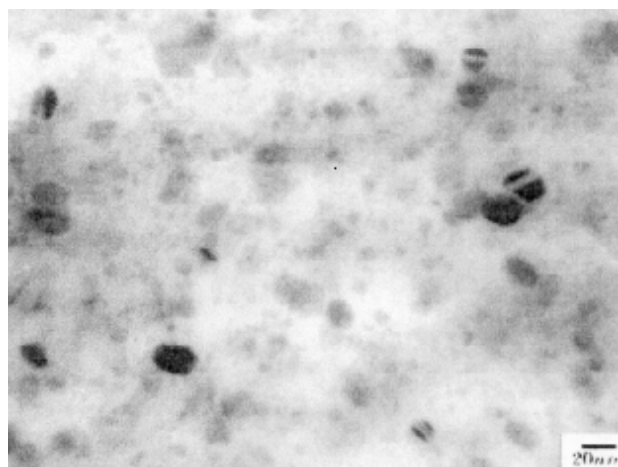
Slika 8: Fazni diagram železo - baker¹

Figure 8: Phase diagram iron-copper¹

povzroči le en del legiranega bakra, drugi del, ki je v trdni raztopini, pa počasi precipitira med dolgotrajno izpostavitvijo temperaturi nad 320 °C in lahko vodi do porasta trdote in padca žilavosti.

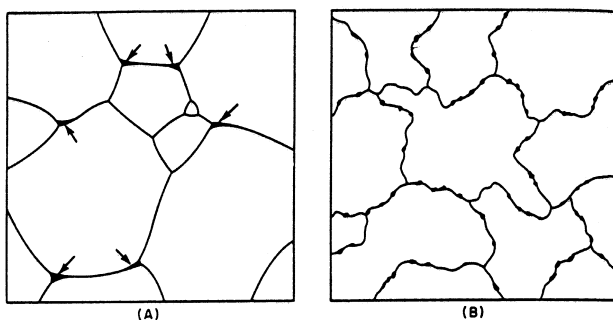
Material lahko utrdimo z oviranjem gibanja dislokacij z geometrijskimi ovirami, kot so izločki. Takšno izločevalno utrjevanje povečuje napetost tečenja. V nasprotju z navadnimi ovirami v jeklu, kot so karbidi, so bakrovi izločki mehkejši od železovega matriksa. Dislokacija ni popolnoma blokirana, kot je to v Orowanovem modelu, temveč disociira v izločke in izbjega. Gibanje dislokacij je ovirano ni pa onemogočeno. Ta odpor skupaj z razdaljami izločkov tvori osnovo za enačbo, podano po Russelu in Brownu⁸, ki razloži povečanje napetosti tečenja zaradi rezanja izločkov, ki so mehkejši od osnove.

$$\Delta\tau = \frac{Gb}{D} \left(1 - \frac{P^2}{E^2} \right)^{\frac{3}{4}}$$



Slika 9: Bakrovi precipitati narejeni s transmisijsko elektronsko mikroskopijo¹

Figure 9: Copper precipitates detected by transmission electron microscopy¹

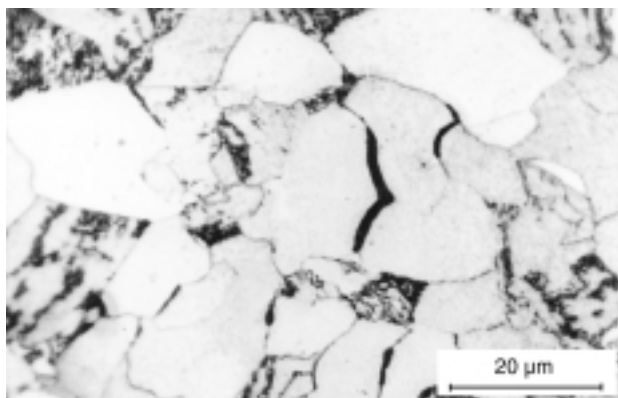


Slika 10: Dva načina začetka interkristalnega loma pri jeklih za povišane temperature

Figure 10: Two modes of start for the intercrystalline fracture of steels at elevated temperature

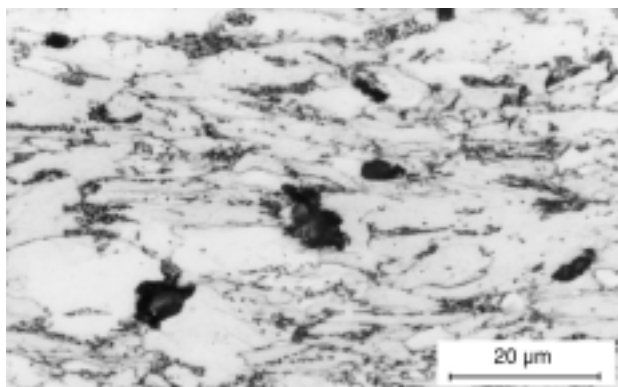
kjer je G strižni modul matriksa, b je Burgersov vektor dislokacije, D razdalja med izločki; E^8 , P^8 energija na dolžino dislokacije v neskončnem matriksu in energija izločka. Povečanje napetosti tečenja po staranju, ki so ga izračunali iz te enačbe, da vrednost približno 220 N/mm^2 .

Pri navadnih jeklih za povišane temperature s časom obratovanja prihaja pri večini jekel do zniževanja trdnostnih lastnosti in slabšanja žilavostnih lastnosti⁷. Pri



Slika 11: WB 36 - U po izpostavi 500 °C 390 N/mm^2 , čas 270 ur

Figure 11: WB 36 - U after exposed to 500 °C 390 N/mm^2 , time 270 hours

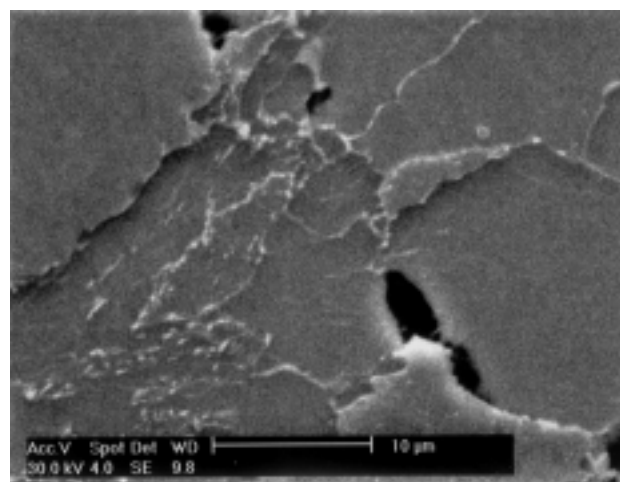


Slika 12: WB36 - N po izpostavi 500 °C 390 N/mm^2 , čas 220 ur

Figure 12: WB36 - N after exposed to 500 °C 390 N/mm^2 , time 220 hours

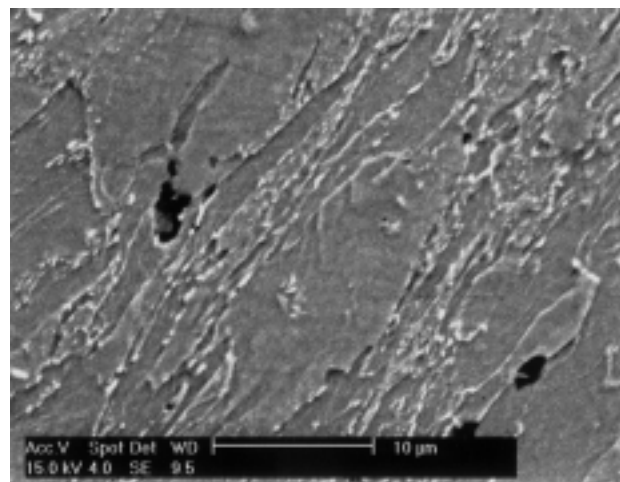
jeklu WB36 pa prihaja do utrjevanja jekla in istočasno do zniževanja žilavostnih lastnosti. S povečevanjem temperature izpostavitve postajajo pri jeklih za povišane temperature meje zrn manj trdne. Prihaja do pojava odpiranja po tromejah zrn in nastanka ovalnih por po mejah zrn (**slika 10**), ki nastajajo zaradi drsenja mej zrn, ki ga povzročajo strižne sile. S časom prihaja do povečevanja teh napak in združevanja, kar vodi do interkristalnih lomov¹².

Primerjava metalografskih posnetkov na vzorcih, ki so bili izpostavljeni približno enakim razmeram pri preskusu časovne trajne trdnosti nam pokaže, da v bližini preloma izkazuje material WB36-U (**slika 11, 13**) nekoliko drugačne poškodbe kot WB36-N (**slika 12, 14**). Pri prvem opažamo manj deformirano zrno in večino mikrorazpok med feritnimi zrni, pri WB36-N pa deformirano zrno in poškodbe v obliki jamic. Pri jeklu WB36-U je samo zrno pri teh temperaturah trdnjše in ne pride do deformacije, zaradi strižnih sil na mejah zrn



Slika 13: WB 36 - U po izpostavi 500 °C 390 N/mm^2 , čas 270 ur

Figure 13: WB 36 - U after exposed to 500 °C 390 N/mm^2 , time 270 hours



Slika 14: WB36 - N po izpostavi 500 °C 390 N/mm^2 , čas 220 ur

Figure 14: WB36 - N after exposed to 500 °C 390 N/mm^2 , time 220 hours

pa pride do odpiranja mej zrn. Pri združevanju teh poškodb pride do preloma.

4 SKLEP

Na osnovi opravljenih preiskav ugotavljamo, da po 170.000 urah obratovanja pri temperaturi 350 °C in tlaku 220 bar pri materialu parovoda ni prišlo do sprememb lastnosti materiala WB36 v takšni meri, da bi to negativno vplivalo na mehanske lastnosti. Material je zadržal trdnostne in duktilne lastnosti, predpisane za izhodno stanje. Razlika med materialom, ki je bil izpostavljen termomehanskim obremenitvam WB36-U in tistem v izhodnem stanju WB36-N, obstaja, vendar z izvedenimi preiskavami ne moremo trditi, da te razlike nastopajo zaradi precipitacije bakra med obratovanjem parovoda, saj se materiala razlikujeta v izhodni mikrostrukturi, ki je pri slednjem tudi močnejše popuščena.

Še vedno obstaja vprašanje glede vzroka pojavljanja poškodb pri tem materialu pri različnih objektih, vendar vse kaže, da so poškodbe skoraj vedno povezane z zunanji vplivi, ki pospešijo nekatere procese v materialu. Na ta material negativno vplivajo mediji, ki lahko pospešijo pojav napetostne korozije, prav tako pa tudi termošoki, ki skupaj z zmanjšanimi duktilnimi lastnostmi lahko prispevajo k poškodbam.

5 LITERATURA

- ¹ I. Alpteter et al., Copper precipitates in 15NiCuMoNb5 (Wb36) steel: material properties and microstructure, atomistic simulation, and micromagnetic NDE techniques, *Nuclear Engineering and Design* 206 (2001) 337-350
- ² Warmfeste und hochwarmfeste und hochwarmfeste Stähle, Mannesmannröhren-werke, Düsseldorf, 1975
- ³ F. J. Adamsky, H. Teichmann, E. Tolksdorf, Betriebserfahrungen mit dem warmfesten Werkstoff 15NiCuMoNb5 in konventionellen Kraftwerksanlagen, *VGB Kraftwerkstechnik* 77 (1997) 8, 667-675
- ⁴ G. Kalwa, Entwicklungstendenzen der warmfesten Stähle für nahtlose Rohre im Kraftwerksbau, *VGB Kraftwerkstechnik* 63 (1983) 4, 356-365
- ⁵ M. Shick et al., Beitrag zur Beurteilung der Zähigkeit und schweißtechnischen Verarbeitungssicherheit des Stahles 15NiCuMoNb5, *VGB Kraftwerkstechnik* 67 (1987) 9, 901-916
- ⁶ P. Kizler, D. Uhlmann, S. Dchmauder, Linking nanoscale and macroscale: calculation of the change in crack growth resistance of steels with different states of Cu precipitation using a modification of stress-strain curves owing to dislocation theory, *Nuclear Engineering and Design* 196 (2000), 175-183
- ⁷ F. Vodopivec, *Železarski zbornik* 24 (1990) 3, 145-162
- ⁸ Particle strengthening of metals and alloys, John Wiley & Sons, Inc., 1997
- ⁹ C. H. A. Townley, High temperature design procedures - developments in Europe since 1986, *CREP: Characterization, Damage and Life Assessment*, 1992, 7
- ¹⁰ ASTM Mechanical Testing, vol. 8, 1985, 333-335
- ¹¹ K. Sonoya et al., The use of miniature specimen for assessment of residual life by temperature-accelerated creep test, *CREP: Characterization, Damage and Life Assessment*, 1992, 75
- ¹² R. E. Reed-Hill, *Physical metallurgy principles*, 1973, 827-887