

REVITALIZACIJA ZUNANJEGA OKROVA VISOKOTLAČNEGA DELA TURBINE 125 MW

REVITALISATION OF THE HIGH-PRESSURE EXTERNAL CASING OF A 125-MW TURBINE

Dimitrij Kmetič¹, Vinko Kurent², Ludvik Matko², Jerzy Dobosiewicz³, Boris Arzenšek¹, Roman Celin¹

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

²Termoelektrarna Trbovlje, Ob železnici 27, 1420, Trbovlje, Slovenija

³PRONOVUM, Ul. Czajek 41, Katowice, Poljska
dimitrij.kmetic@imt.si

Prejem rokopisa - received: 2002-10-17; sprejem za objavo - accepted for publication: 2002-11-11

Turbina 125 MW, izdelana leta 1968, je bila v obratovanju 190 000 ur. Med dolgotrajnim obratovanjem pri povišanih temperaturah so nastale v mikrostrukturi okrova iz jeklene litine spremembe in mehanske lastnosti so se poslabšale. Zaradi cikličnega nihanja napetosti in spreminjajoče se temperature so nastale v okrovu turbine mikrorazpoke. Združevanje mikrorazpok je privedlo do večjih utrujenostnih poškodb. Med remontnimi deli so bile v letu 2001 opravljene obširnejše neporušitvene, metalografske in mehanske preiskave. Na osnovi preiskav je bila izvedena revitalizacija zunanega okrova visokotlačnega dela turbine.

Ključne besede: okrov turbine, mikrostruktura, žilavost, neporušitvene preiskave, degradacija mehanskih lastnosti, revitalizacija

The operation of a 125-MW turbine began in 1968. After 190 000 hours in service an extensive inspection was performed during the shutdown in 2001. After a long time of exploitation changes in the microstructure of the cast steel had occurred and degradation of the mechanical properties was confirmed. As a result of the fluctuating temperature and the dynamic cycling loading, microscopic cracks had developed. Because of the coalescence of these cracks fatigue can occur. The results of nondestructive testing, metallographic examinations and mechanical testing were the basis for the revitalisation of the casing.

Key words: turbine casing, microstructure, toughness, nondestructive testing, degradation of mechanical properties, revitalisation

1 UVOD

V Termoelektrarni Trbovlje smo v letu 2001 med remontom turbine z močjo 125 MW opravili na okrovu visokotlačnega dela obširnejše porušitvene in neporušitvene preiskave. Turbina je bila izdelana v letu 1968 na Poljskem in je bila v obratovanju že 190 000 ur. Remontna dela je vodil ZRE (Zakłady Remontowe Energetyki, Katowice). Revitalizacijo okrova visokotlačnega dela so opravili v ZRE v sodelovanju z inštitutom PRONOVUM (Katowice).

Zunanji okrov visokotlačnega dela turbine je izdelan iz jeklene litine vrste L21HMF (poljske norme) in je bil vgrajen v normaliziranem stanju. Temperatura pare je na vstopu v okrov 535 °C.

Na okrovu visokotlačne dela turbine so bila opravljena naslednja dela:

- na štirih vzorcih, izrezanih iz zgornjega in spodnjega dela okrova v območju vstopa in izstopa pare, smo naredili kemično analizo jeklene litine, preizkuse žilavosti, meritve trdote in mikrostrukturne preiskave
- po peskanju smo okrov pregledali vizualno in po metodi magnetnih delcev ter poškodbe sanirali v ZRE
- revitalizacija ohišja v ZRE in

- preizkusi žilavosti, meritve trdote in mikrostrukturne preiskave vzorcev toplotno obdelanih skupaj z okrovom.

2 PREISKAVA VZORCEV, IZREZANIH IZ OKROVA

Kemično analizo, preizkuse žilavosti Charpy ISO-V pri temperaturi 20 °C, meritve trdote in mikrostrukturne preiskave smo naredili pri štirih vzorcih, izrezanih iz spodnje in zgornje polovice okrova, izdelanega iz jeklene litine. Vzorci so bili izrezani ob notranji površini v območju vstopa pare, kjer je temperaturna obremenitev okrova najvišja, in na področju izstopa pare, kjer je temperatura pare nižja. Vzorci imajo naslednje oznake:

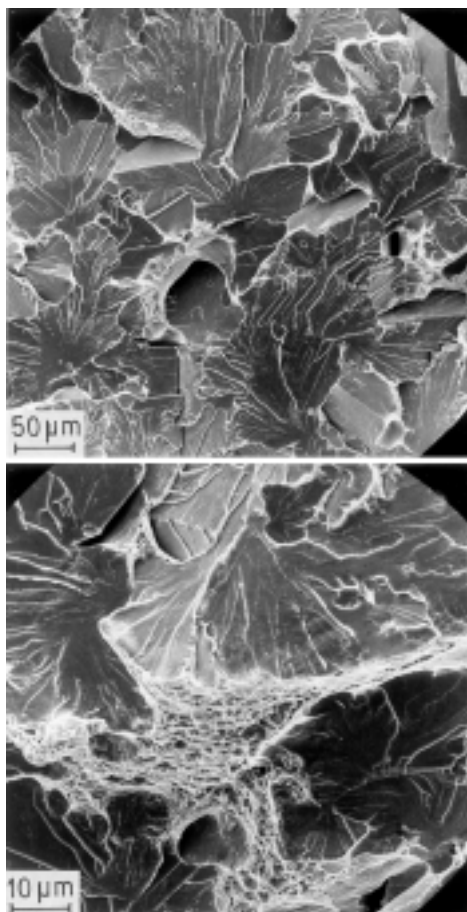
- vzorec 1 - zgornji okrov, vstop pare
- vzorec 2 - zgornji okrov, izstop pare
- vzorec 3 - spodnji okrov, izstop pare
- vzorec 4 - spodnji okrov, vstop pare.

Kemična analiza jeklene litine je za vse štiri preiskovane vzorce v **tabeli 1**, kjer je tudi analiza, navedena v standardu. Kemična sestava ustreza jekleni litini vrste L21HMF. Iz vsebnosti silicija, fosforja, žvepla in niklja je razvidno, da zgornja in spodnja polovica okrova nista izdelani iz iste taline.

Tabela 1: Kemična sestava vzorcev v masnih odstotkih**Table 1:** Chemical composition of specimen (weight %)

Vzorec	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V
1	0,22	0,28	0,62	0,023	0,021	1,08	0,59	0,047	0,23
2	0,23	0,28	0,62	0,021	0,020	1,08	0,59	0,045	0,24
3	0,23	0,38	0,59	0,017	0,027	1,10	0,60	0,058	0,23
4	0,23	0,39	0,60	0,018	0,024	1,10	0,61	0,058	0,25
Standard PN 83157	0,18-0,25	0,17-0,37	0,40-0,70	< 0,030	< 0,030	0,90-1,20	0,50-0,70	< 0,30	0,20-0,35

Preizkuse žilavost Charpy ISO-V smo naredili pri temperaturi 20 °C. Trdoto smo izmerili po Vickersu. V tabeli 2 so podani rezultati meritev žilavosti, trdote HV in trdoti ustrezne natezne trdnosti. Iz rezultatov meritev je razvidno, da je žilavost ustrezna le pri enem vzorcu. Žilavost ostalih treh vzorcev je bistveno nižja od (v standardu) predpisane vrednosti 27 J pri temperaturi 20 °C. Prelomne površine so krhke cepilne, duktilni z jamicami pa so le posamezni grebeni (slika 1).



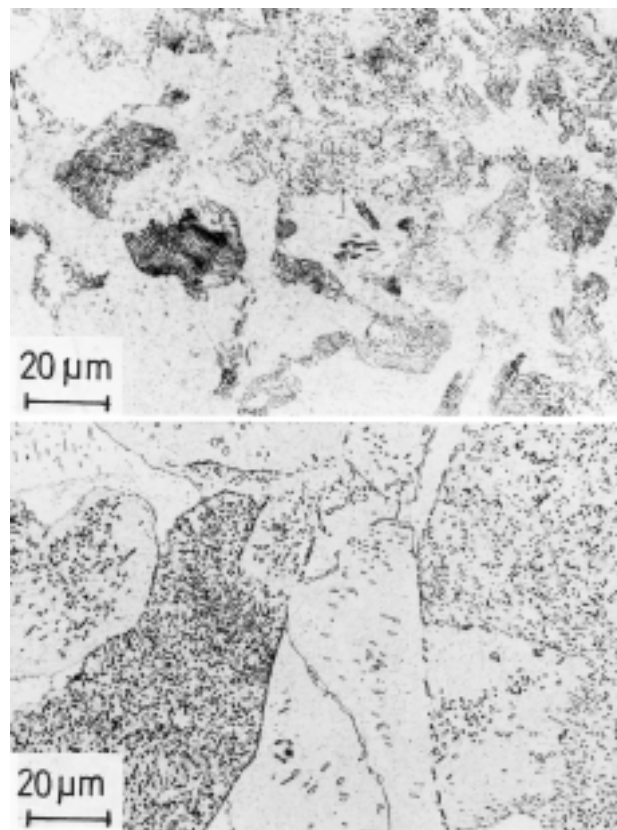
Slika 1: Prelomna površina žilavostnega preizkušanca; krhki prelom s cepljenjem (zgoraj) in krhki prelom s cepljenjem ter jamičasti duktilni prelom (spodaj) - vzorec 2

Figure 1: Fracture surface of Charpy V notch specimen; cleavage rupture (upper micrograph) and cleavage rupture and ductile rupture with dimples (lower micrograph) - sample 2

Tabela 2: Mehanske lastnosti vzorcev jeklene litine**Table 2:** Mechanical properties of the cast steel

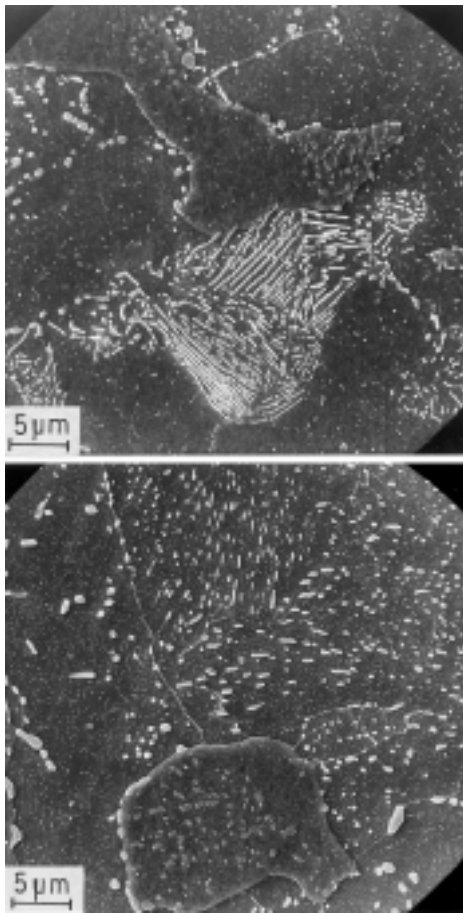
Vzorec	Žilavost ISO-V (J, 20 °C)	Trdota HV 5	R _m (N/mm ²)
1	32	167	570
2	10	150	520
3	8	154	530
4	8	153	530

Jeklena litina zgornje polovice okrova ima mikrostrukturo iz ferita, perlita in bainita. Med dolgotrajnim obratovanjem je nastala delna sferoidizacija cementita v perlitu in bainitu, v feritu pa smo opazili precipitate. Jeklena litina spodnje polovice okrova ima podobno



Slika 2: Mikrostruktura jeklene litine zgornje in spodnje polovice okrova; delna (zgoraj) in popolna (spodaj) sferoidizacija karbidov

Figure 2: Microstructure of cast steel on upper and lower part of external casing; partial (upper micrograph) and complete spheroidized carbides (lower micrograph)



Slika 3: SEM posnetka delno (zgoraj) in popolnoma (spodaj) sferoidizirane mikrostrukture jeklene litine zgornje in spodnje polovice okrova

Figure 3: SEM image of partial (upper micrograph) and complete spheroidized carbides (lower micrograph) of cast steel on upper and lower part of external casing

mikrostrukturo, le delež bainita v mikrostrukturi je bistveni večji in sferoidizirani karbidi so enakomerneje porazdeljeni po matici. Ulitka, zlasti spodnja polovica okrova, nista bila ustrezno normalizirana. Pri transformaciji se je manjši delež avstenita transformiral v ferit in perlit, večina avstenita pa se je transformirala v bainit (sliki 2 in 3). Mikrostruktura obeh polovic okrovov ni homogena, saj so posamezna zrna lahko zelo velika. Po klasifikaciji ASTM (ASTM E 112) je velikost kristalnih zrn litine zgornjega okrova 4 - 7, spodnjega pa 4 - 6. Karbidov, izločenih po kristalnih mejah, nismo opazili.

3 NEPORUŠITVENE PREISKAVE

Okrov turbine smo po peskanju pregledali vizualno in po metodi magnetnih delcev. Vse poškodbe so bile po velikosti in legi dokumentirane. Na sliki 4 se na makroposnetku notranje površine spodnjega okrova vidijo označena mesta poškodb. Poškodb je veliko, na kritičnih mestih, kot so področja priključkov (vstop in izstop pare, ventili, izvrtine za pritrilne vijake), ni bilo. Po



Slika 4: Makroposnetek notranje površine spodnje polovice okrova z označenimi poškodbami

Figure 4: Macro image of internal surface of lower part casing with marked failures

morfoloških značilnostih so poškodbe razpoke, ki so nastale zaradi termomehanskih obremenitev (termična utrujenost), zlepljena mesta na reparaturnih zvarih in napake, ki so nastale že pri litju ohišja (manjši lunckerji in porozna mesta) in pri pregledu po izdelavi okrova niso bila odkrita. Poškodb je več in so večje na spodnjem delu ohišja, predvsem na notranji površini. Najgloblja poškodba je bila po izbrušenju razpoke globoka 35 mm.

Geometrijske meritve so pokazale, da je ohišje deformirano v taki meri, da je potrebna toplotna obdelava ob ustrezni mehanski obremenitvi, da se zagotovi zahtevana geometrija in dimenzijske tolerance ohišja za mehansko obdelavo.

4 SANACIJA OKROVA

Stena ohišja je debela od 70 do 120 mm. Praviloma se reparaturno zavarijo izbrušena mesta, če so poškodbe globoke več kot 20 % debeline stene. Na makroposnetku je na sliki 5 prikazano izbrušeno področje večje utrujenostne razpoke. Ker je bila zaradi degradacije mehanskih lastnosti zaradi mikrostrukturnih sprememb in zaradi dimenzijskih sprememb nujna revitalizacija, smo se odločili, da se zavarijo vsa izbrušena področja, katerih globina je bila večja od 10 % debeline stene.

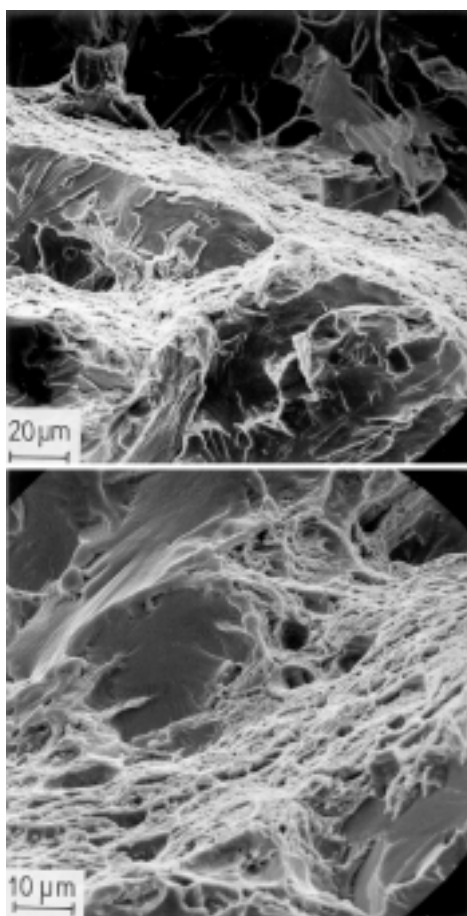
Reparaturno varjenje je poslovna tajnost ZRE, zato podatki o pogojih varjenja v prispevku niso podani. Prav tako je poslovna tajnost tudi toplotna obdelava ohišja za revitalizacijo.



Slika 5: Makroposnetek področja izbrušene večje razpoke
Figure 5: Macro image of ground area at larger failure

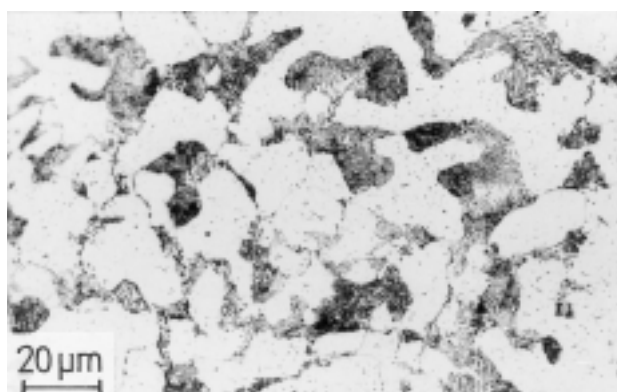
5 PREISKAVE VZORCEV, TOPLOTNO OBDELANIH Z OKROVOM

Po en vzorec, toplotno obdelan skupno z zgornjo polovico okrova (vzorec 21), in en vzorec, toplotno obdelan s spodnjo polovico (vzorec 22), smo preiskali na



Slika 6: Pretežno duktilni prelom z jamicami žilavostnega preizkušanca toplotno obdelanega z okrovom

Figure 6: Ductile fracture surface of Charpy V notch specimen heat treated with casing



Slika 7: Mikrostruktura jeklene litine po toplotni obdelavi iz lamelnega perlita in ferita s karbidnimi precipitati

Figure 7: Microstructure of cast steel after heat treatment consists of lamellar pearlite and ferrite with carbide precipitates

našem inštitutu. Kot na vzorcih, izrezanih iz ohišja po eksploataciji, smo tudi pri teh naredili kemično analizo, preizkuse žilavosti pri temperaturi 20 °C, meritve trdote in mikrostrukturne preiskave.

Vsebnosti analiziranih elementov so praktično enake tistim, ki so podane v **tabeli 1**, za vzorce izrezane iz okrova po eksploataciji. Odstopanja so v mejah merilne napake.

Rezultati preizkusov žilavosti Charpy ISO-V pri temperaturi 20 °C in meritev trdote po Vickersu HV so podani v **tabeli 3**. Vzorca imata po toplotni obdelavi bistveno boljšo žilavost kot tisti, izrezani iz ohišja po eksploataciji. Jeklena litina ima višjo žilavost od zahtevane v standardu. Tudi izmerjene trdote so večje v primerjavi z izmerjenimi po eksploataciji.

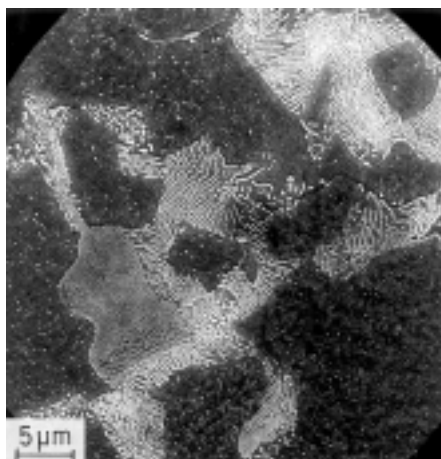
Tabela 3: Žilavost in povprečna trdota toplotno obdelanih vzorcev

Table 3: Toughness and average hardness of the heat-treated specimens

Vzorec	Žilavost ISO-V (J, 20 °C)	Trdota HV 5
21 (zg. okrov)	45	160
22 (sp. okrov)	32	167

Prelomne površine žilavostnih preizkušancev smo pregledali v SEM. Prelom obeh vzorcev je podoben, prelomne površine so deloma cepilne krhke in deloma žilave (**slika 6**). Žilavih površin je več kot na vzorcih, izrezanih iz ohišja po eksploataciji, zato je tudi žilavost toplotno obdelane jeklene litine večja.

Mikrostruktura obeh vzorcev je drobnozrnata feritno perlitna z enakomerno velikostjo kristalnih zrn. Velikost kristalnih zrn je po ASTM - klasifikaciji 7. V perlitu se opazi, da so cementitne lamele sorazmerno grobe, v feritu pa se opazijo drobni precipitati. Karbidov, izločenih po kristalnih mejah, nismo opazili (**sliki 7 in 8**). Vse te značilnosti izhajajo iz toplotne obdelave in so ustrezne za normalizacijo velikih debelostenskih ulitkov.



Slika 8: SEM posnetek mikrostruktura jeklene litine po toplotni obdelavi iz lamelnega perlita in ferita s karbidnimi precipitati

Figure 8: SEM image of lamellar pearlite and ferrite with carbide precipitates of cast steel after heat treatment

6 SKLEP

IMT je sodeloval pri remontnih delih turbine 125 MW, ki jih je vodil ZRE, in pri revitalizaciji okrova, ki je bila izvedena v sodelovanju z inštitutom PRONOVUM. V sklopu preiskav smo na našem inštitutu na vzorcih, izrezanih iz zunanjšega okrova visokotlačnega dela turbine, opravili preizkuse žilavosti, mikrostrukturne preiskave, meritve trdote in kemično analizo jeklene litine L21HMF. Preiskave smo naredili pri vzorcih, izrezanih iz okrova po eksploataciji in pri vzorcih po revitalizaciji, ki so bili toplotno obdelani

skupaj z okrovom. Prisotni smo bili pri neporušitvenih preiskavah po metodi magnetnih delcev, izbrúšenju poškodb in reparaturnem varjenju ter pri razgovorih o revitalizaciji okrova.

Zaradi grobe feritno perlitno bainitne mikrostrukture, v kateri je med dolgotrajnim obratovanjem prišlo do sferoidizacije cementita in izločanja karbidnih precipitátov, je imela jeklena litina neustrezno žilavost. Razlik med vzorci, izrezanimi s področja vstopa in izstopa pare, nismo opazili. Z neporušitvenimi preiskavami po metodi magnetnih delcev smo v ZRE odkrili številne utrujenostne razpoke, zlepljena mesta na reparaturnih zvarih in porozna področja. Poškodbe so bile po izbrúšenju zavarjene in okrov napetostno odžarjen.

Zaradi degradacije materiala, ki se kaže v zmanjšanju mehanskih lastnosti, predvsem žilavosti, in številnih poškodb ter zagotovitve ustreznih dimenzijskih toleranc, so v ZRE okrov toplotno obdelali. Po revitalizaciji je imela jeklena litina drobnozrnato feritno perlitno mikrostrukturo in ustrezno žilavost.

7 LITERATURA

- ¹ Wykonanie prac w zakresie rewitalizacji kadłuba zewnętrznego WP dla Elektrowni Trbovlje, PRONOVUM, Katowice, 21. 02. 2001
- ² David N. French: Metallurgical Failures in Fossil Fired Boilers, Wiley-Interscience publication, New York, 1992
- ³ Plan ubytkow korpusow zewnętrzných WP turbiny TK 120 z El. Trbovlje, ZRE, Katowice, 08. 07. 2001
- ⁴ Measurement of TK120 turbine HP external casing, ZRE, Katowice, 2001
- ⁵ D. Kmetič, B. Arzenšek: Preiskava in revitalizacija zunanjšega ohišja visokotlačnega dela turbine TK 120, Poročilo IMT, Ljubljana, 2001