

**MIKROSTRUKTURNO PRAĆENJE KVALITETA ČELIKA ČSN 15 223  
TOKOM RADA NA POVIŠENIM TEMPERATURAMA METODOM  
REPLIKA**

**MICROSTRUCTURE QUALITY MONITORING IN ČSN 15 223 STEEL  
IN EXPLOATATION AT ELEVATED TEMPERATURES BY REPLICA  
METHOD**

**Zorica Kovačević, spec.maš.inž.  
Institut za ispitivanje materijala IMS  
Beograd**

**Mr Zoran Karastojković, viši predavač  
Visoka tehnička škola strukovnih studija  
Beograd**

**REZIME**

*Ispitivanje bez razaranja je od posebnog interesa, naročito u slučaju utvrđivanja kvaliteta mikrostrukture. Metoda replike nudi prednost jer ispitivana komponenta ne mora da bude izvađena iz originalne konstrukcije. Ovo je od velike važnosti za kotlovske cevi, bubanj kotla i slične komponente iz termoelektrana.*

*Primenom metode replika prikazano je praćenje različitih strukturnih promena radi kontrole. Metodom replika ovde su otkriveni i opisani brojni degradacioni procesi u materijalu toplopostojanog čelika, počev od razugljeničenja, grafitizacije, rasta kristalnog zrna, pojave pora, puzanja, kao i pojave prslina. Promene su praćene kako na osnovnom tako i na zavarenom metalu. Analiza uzetih replika je obavljena u laboratoriji..*

**Ključne riječi:** kvalitet, toplopostojani čelik, metoda replike, strukturne promene

**SUMMARY**

*Non-destructive testing is of particular interest when the evaluation of the microstructure quality is possible, especially in field applications. Method of replicating the surface state by using a thin foil offers an advantage: the testing component should not be taken off from the original position of structure assembly. This fact is of a great importance for boiler tubes, from piping system in thermo-power generators or similar equipment. After replicating the surface, than foils could be carefully analyzed in the laboratory at every desired time.*

*By using the replica method the different processes are available to control: many types of corrosion attack, decarburization, graphitization, grain growth, pores, fine changes in micro-structures as a result of creep process, and also a crack(s) appearance. Those changes in quality of tested material could not be successfully controlled by other testing methods, as like gamma-radiography, x-ray testing, ultra-sound, magnetic particles, or similar. The structure changes monitored by replica's method are available in testing either of parent or weld metal.*

**Keywords:** quality , steels for elevated temperatures, replica method, structure changes

## 1. UVOD

Ispitivanja bez razaranja su vrlo zahvalna, pogotovu kada ispitivani deo ili konstrukciju ne treba posebno demontirati samo radi ispitivanja. Uobičajena ispitivanja strukture materijala podrazumevaju uzimanje (sečenje) uzorka, i to je onda metoda ispitivanja sa razaranjem. Ispitivanje strukture primenom replika je praktično metoda ispitivanja bez razaranja.

Mnogi mašinski elementi ili delovi konstrukcija u radu trpe znatne promene strukture. Praćenje promene u strukturi, npr. čelika, nije uvek jednostavno iako su razvijene brojne metode ispitivanja bez razaranja. Pokazalo se da je metoda replika vrlo pouzdana metoda za ispitivanje površine, odnosno podpovršinskog sloja (nakon uklanjanja npr. korozionog sloja) i svih strukturnih promena koje se događaju u tom sloju[1].

Od brojnih važnih primera ovde će se obraditi slučajevi interesantni za termoelektrane. Nema sumnje da živimo u civilizaciji koja prosto „ne funkcioniše“ bez električne energije, tako da razne elektrane (na uglj, vodu, vetar i sl.) rade svakodnevno u tzv. režimu „0-24 h“. U termoelektranama postoje izvesni konstrukcioni elementi i sklopovi, kao što su kotlovske cevi i td., koji su neprekidno izloženi dejstvu povišenih ili visokih temperatura. U termoelektranama na uglj najveći deo cevi je izložen dejstvu povišenih temperatura, a to znači u rasponu od 100 do 550<sup>0</sup>C.

Isecanje uzorka, za bilo kakva ispitivanja, skoro je nezamislivo (iako je tehnički lako izvodljivo) jer to najčešće znači zaustavljanje rada celog postrojenja. Troškovi takvog rada, sa zaustavljanjem, bili bi enormno veliki. Posmatranje kvaliteta ispitivanog materijala korišćenjem replika radi praćenja promena u mikrostrukturi ovde će biti urađeno registrovanjem karakterističnih pojava, koje pak odražavaju neke procese koje se odigravaju u materijalu pod dejstvom povišenih temperatura ili pak pod delovanjem okružujuće atmosfere. Takve pojave su: razugljeničenje, grafitizacija, rast kristalnog zrna, pojave pora, puzanja ali i prslina. Praćenje opisanih elemenata kvaliteta stanja materijala izvodljivo je, prilično brzo i pouzdano, primenom replika. Tokom dugotrajnog rada u ovim čelicima, i pod opisanim uslovima, nastaju nepovratne promene, koje proističu iz dobro poznatih termodinamičkih zakona.

### 1.1. Čelici za rad na povišenim temperaturama

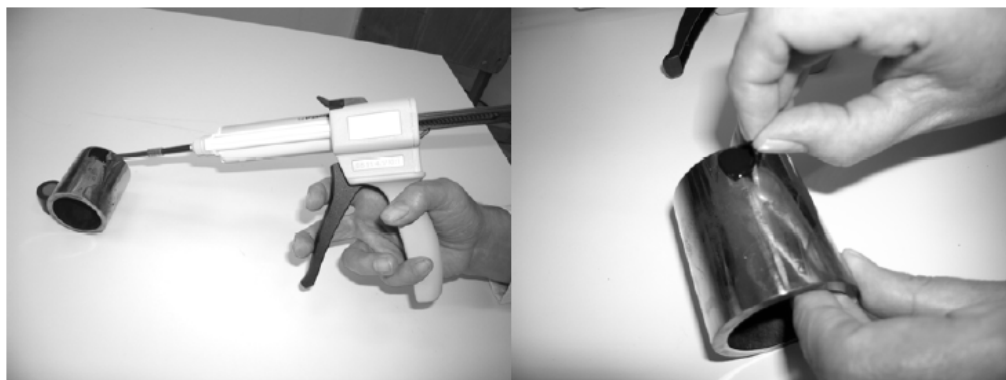
Toplopostojani čelici traba dugotrajno da izdrže temperature do oko 550<sup>0</sup>C. Da bi se to ostvarilo, pristupa se višestrukom legiranju[2-4]. U izradi konstrukcionih delova termoenergetskih postrojenja koriste se niskougljenični čelici dopunski legirani sa hromom, molibdenom, volframom, ređe sa niklom ili vanadijum. Različito iskustvo proizvođača dovelo je do ponude čelika za ove namene raznovrsnih sastava, ovde su izdvojene tri vrste čelika, tabela 1.

Tabela 1. Hemijski sastav nekih toplopostojanih čelika, tež. %

| Element        | 13CrMo910 po DIN-u | 14MoV 6 3 po DIN-u | ČSN 15 223           |
|----------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| Ugljenik       | 0.10~0.18          | 0.10~0.18          | 0,17 - 0,23          |
| Silicijum      | 0.10~0.35          | 0.10~0.35          | 0,15 - 0,40          |
| Mangan         | 0.40~0.70          | 0.40~0.70          | 1,20 - 1,60          |
| Fosfor         | 0.035Max           | 0.035Max           | ≤ 0,040              |
| Sumpor         | 0.035Max           | 0.035Max           | ≤ 0,040              |
| Hrom           | 0.70~1.10          | 0.30~0.60          | ≤ 0,20               |
| Molibden       | 0.45~0.65          | 0.50~0.70          | 0,30 - 0,50          |
| Vanadijum      | /                  | /                  | /                    |
| Nikl ili bakar | /                  | /                  | Ni ≤ 0,25; Cu ≤ 0,30 |

## 1.2. Položaji uzimanja replika na jednom parovodu

Replike su vrlo pogodne za uzimanje: moguće je uzeti ih praktično sa bilo koje konstrukcije, bez obzira da li je njihova površina ravna ili zakrivljena (ispupčena, udubljena i sl.). Replike se u termoelektranama uzimaju sa različitih mesta, a najčešće sa kritičnih mesta toplovoda, npr. lukova i sl. Koliko da su cevovodi jednostavne konstrukcije, takav sistem je, ipak, složen, slika 1. Položaji uzimanja replika treba strogo da se beleže a rezultati čuvaju radi poređenja za sva kasnija ispitivanja i što je još važnije za davanje ocene o (ne)upotrebljivosti ispitivanog dela, odnosno konstrukcije.

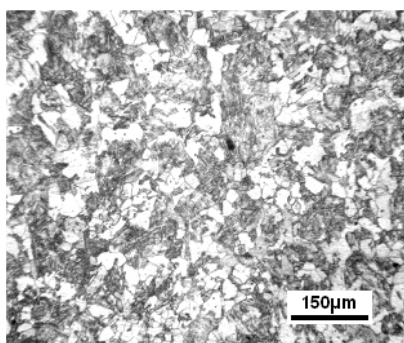


*Slika 1. Postupak uzimanja replike sa površine cevi i uklanjanje replika iz površine [5]*

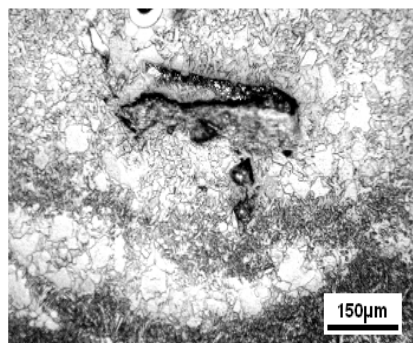
## 2. REZULTATI MIKROSTRUKTURNOG PRAĆENJA PROMENE KVALITETA ČELIKA

Za analiziranje nastalih promena, neizostavno se moraju primeniti i mikrostrukturalna ispitivanja [6-15], što je već praksa u celom svetu pa i kod nas. U odgovarajućoj literaturi mogu se naći delimični podaci o promenama, zbog čega se eksperimentalnim podacima svake vrste mora pokloniti dužna pažnja. Ovde je za praćenje eventualnih promena strukture korišćena metoda replika.

Razugljeničenje je jedna od promena u kvalitetu materijala koja se prvo otkrije. Interesantno je da razugljeničenje može da nastane kako u oksidacionoj tako i u redukcionoj atmosferi. Bilo kako da je nastalo, razugljeničenje se sastoji u smanjenju koncentracije ugljenika u površinskom sloju. Ovakva promena izaziva smanjenje mehaničkih osobina materijala, i to je razlog da se ova pojava mora stalno pratiti. Na slici 2a) je prikazana polazna mikrostruktura a na slici 2b) primer razugljeničenja čelika [16].



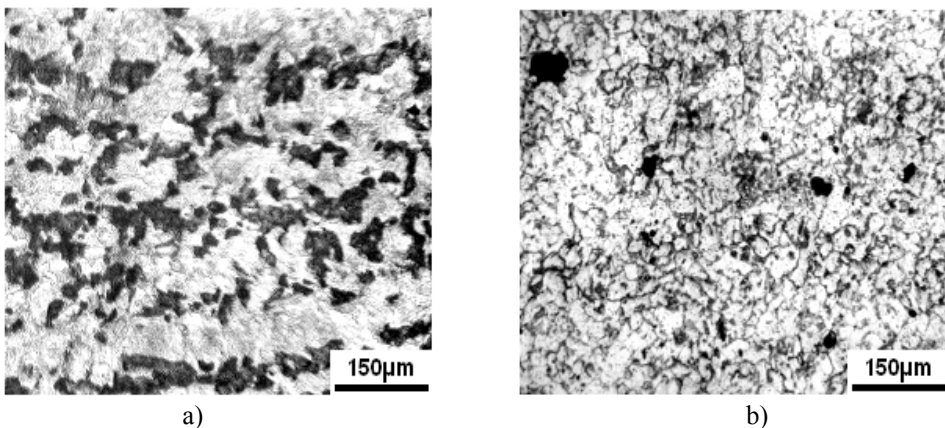
a)



b)

*Slika 2. Mikrostruktura polaznog materijala a) i pojava razugljeničenja b)*

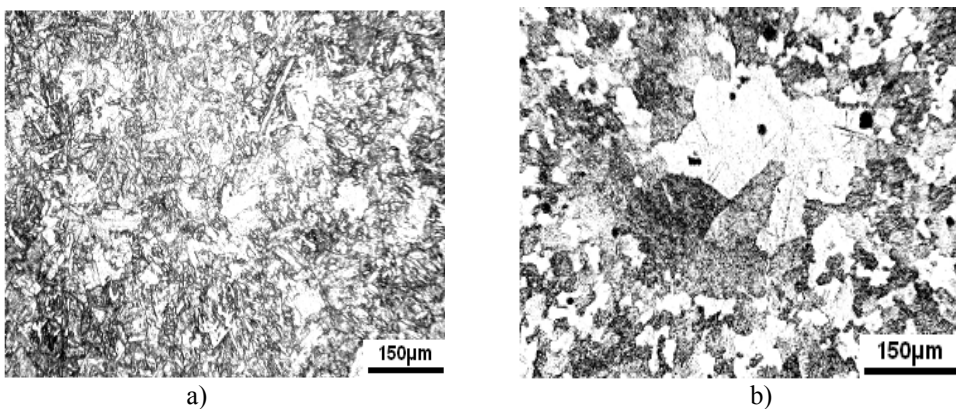
Grafitizacija je sledeći lako uočljiv degradacioni proces u čeliku kotlovskih cevi (redosled predstavljanja degradacionih procesa ovde je slučajan). Iz polazne feritno-perlitne strukture izdvaja se čist grafit, slika 3a).



a) b)  
*Slika 3. Grafitizacija u: a) trakastoj feritno-perlitnoj strukturi i b) stvaranjem kolonija grafitu (crna polja na obema slikama)*

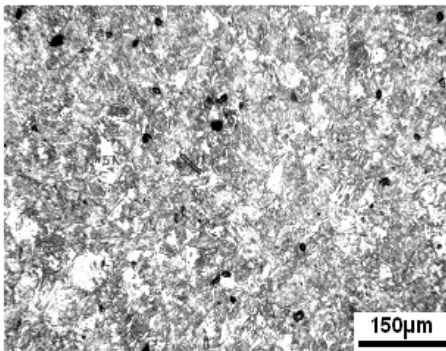
Izdvojen grafit je mek ali ono što je najnepovoljnije to je izuzetno velika krtost ne samo grafita već i samog materijala. Za ovakvo drastično smanjenje žilavosti se ne može reći da nema promene u kvalitetu ispitivanog materijala.

Sledeća promena u materijalu, koja treba da se prati, predstavlja ukрупnjavanje polaznog kristalnog zrna. Ukрупnjavanje kristalnog zrna obično dovodi do smanjenja eksploatacionih osobina, i to je razlog više za ocenu opšteg stanja i kvaliteta ispitivanog materijala. Tehnika replike i u ovom slučaju daje vrlo zadovoljavajuće rezultate. Par primera promene veličine kristalnog zrna ilustrovano je slikom 4[17].

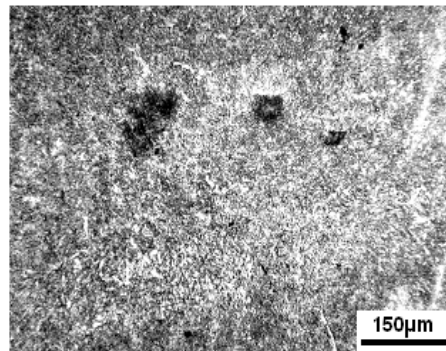


a) b)  
*Slika 4. Metalografski efekti rasta kristalnog zrna*

Ukoliko je okružujuća atmosfera reagibilna sa metalom, često dolazi do izdvajanja gasovitih proizvoda, a na tim mestima moraju da ostanu pore, manje ili više vidljive, slika 5.



a)



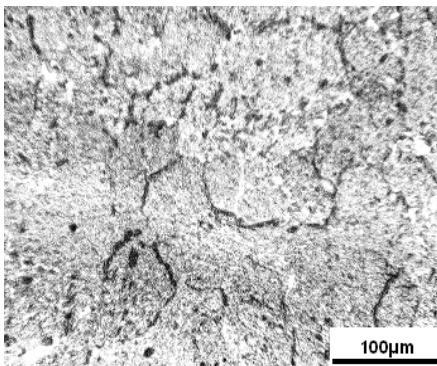
b)

Slika 5. Manje a) ili više b) izražene pore u čeliku ČSN 15 223

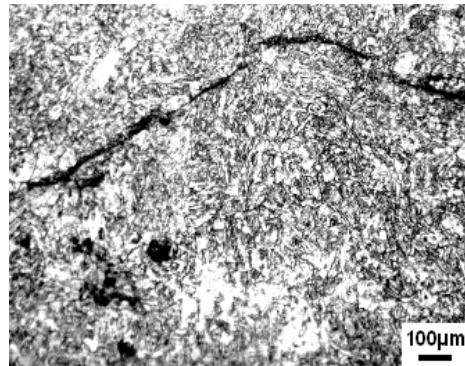
Pore direktno smanjuju čvrstoću, čime projektovana nosivost postaje ugrožena. Ugroženost se odnosi na dotični deo ali se to prenosi na celo postrojenje, kao i na ceo sistem termoelektrane. Iz ovog je još jednom jasno zašto je potrebno periodično praćenje kvaliteta korišćenjem replika, u cilju određivanja opšteg stanja čelika, naravno i poređenje sa prethodnim stanjem (takođe registrovanog putem replika).

Puzanje je specifična pojava i ona je naročito od interesa kada određena mašinska komponenta dugotrajno radi na povišenim temperaturama. U sprezi sa velikim radnim opterećenjima efekti puzanja se strogo moraju pratiti. Par promena mikrostrukture usled pojave puzanja materijala prikazano je slikom 6a).

Prslina su, izvesno, najnepovoljniji slučaj oštećenja materijala, time i celog postrojenja, odnosno sistema. Postojanje vrlo sitnih prslina često nije moguće otkriti npr. radiografski ili ultrazvukom, ako je prslina tanka (ispod 0,2 mm) ali je izvodljivo primenom replika, pokazano u ovom slučaju slikom 6b) [18].



a)



b)

Slika 6. a) Promene u mikrostrukuri čelika čelika ČSN 15 223 usled puzanja;

b) Registrovanje prslina u površini materijala primenom replika

### 3. ZAKLJUČAK

Uobičajeno je da se kvalitet materijala/proizvoda analizira pre bilo kakve ugradnje. Međutim, nakon više godina rada, pogotovu u ekstremnim uslovima rada, kao što je rad na povišenim temperaturama, nastupaju brojne degradacione promene u materijalu, koje je nemoguće primetiti u bilo kojoj početnoj analizi.

Jedna od vrlo pouzdanih metoda ocene kvaliteta toplopostojanih čelika nakon dugogodišnjeg neprekidnog rada, a izvodi se praktično bez razaranja, je metoda replika.

Metodom replika ovde su otkriveni i opisani brojni degeneracioni procesi u materijalu toplopostojanog čelika, počev od razugljeničenja, grafitizacije, porasta kristalnog zrna, pojave pora, puzanja i prslina. Pojava prslina je, nesumnjivo, najkritičnija pojava u svakoj konstrukciji, tako i u razmatranom slučaju kotlovske postrojenja.

#### 4. LITERATURA

- [1] Robert, C. McMaster: Nondestructive testing handbook, Production The Roland Press Company, New York, Vol. 1, 1963, pp. 12-29.
- [2] A.N. Podgornij, V.V. Bortovoj, P.P. Gontarovskij, i dr: Polzučest elementov mašino- stroiteljnih konstrukcij, Naukova dumka, Kiev 1984, pp. 171-179.
- [3] S.Z. Bokštejn: Stroenie i svojstva metalličeskikh splavov, Moskva 1971, Metallurgija, pp.379-398.
- [4] S.Tajra, R. Otani: Teorija visokotemperaturnoj pročnosti materialov, prevod s japanskog, Moskva 1986, Metallurgija, pp. 50-91.
- [5] Struers distributor, RepliSet Instruction Manual Cat. No: 50900044, Date of Release 20.11.2003.
- [6] H. Thielsch: Defects and Failures in Pressure Vessels and Piping, New York 1965, Reinhold Publ. Corp, pp. 333-367.
- [7] H. Šuman: Metalografija, Beograd1968, Zavod za izdavanje udžbenika Srbije, str.272-286.
- [8] R. Smallman: Modern Physical Metallurgy, London 1970, Butterworths, pp. 482-493.
- [9] R.W.K. Honeycombe: The Plastic Deformation of Metals, London 1985, Edward Arnold, pp. 356-397.
- [10] A.M. Arharov, S.I. Isaev, I.A. Kožinov, i dr.: Teplotehnika, Moskva 1986, Mašinstroenie, pp. 149-167.
- [11] R.E. Reed-Hill: Physical Metallurgy Principles, New York 1973
- [12] A.P. Guljajev: Metallovedenie, Moskva 1986, Metallurgija, pp. 211-252.
- [13] Guideline for the Assessment of Microstructure and Damage Development of Creep Exposed Materials for Pipes and Boiler Components, Essen 1992, 8-88.
- [14] T.L. de Silveira, I. Le May: The Arabian J. Sci. and Eng., 31/2006/2C, pp. 99-118.
- [15] R.V. Hercberg: Deformacija i mehanika razrušenija konstrukcionih materialov, prevod sa engleskog, Moskva 1989, Metallurgija, pp. 112-134.
- [16] Kovačević Z., Karastojković Z., Janjušević Z.: Characteristic changes in microstructure of steel ČSN 15223.9 from boiler drum at power station monitored by replica method, 41st International October Conference on Mining and Metallurgy, Kladovo, Serbia, October 2009, pp. 629-636.
- [17] Karastojković Z., Kovačević Z.: Specific shapes of ferrite lamellae in steel ČSN 15223.9 in boiler drum after servicing at elevated temperatures, 41st International October Conference on Mining and Metallurgy, Kladovo, Serbia, October 2009, pp. 659-666.
- [18] Kovačević Z., Karastojković Z., Odanović Z., Popović R.: Assessment of residual life boiler drum in view of microstructure welded joints, in serbian, Zavarivanje 2010, Tara, 2-4 jun 2010, CD issue, No 59.