

## NERAZORNA ISPITIVANJA I NJIHOVA ULOGA U PROCJENI OPREME TIJEKOM EKSPLOATACIJE

## NON-DESTRUCTIVE TESTING AND THEIR ROLE IN EVALUATION OF EQUIPMENT DURING EXPLOITATION

<sup>1</sup>Damir Pinotić, <sup>2</sup>Stjepan Kožuh, <sup>2</sup>Mirko Gojić

1STSI - Integrirani tehnički servisi d.o.o., Sektor održavanja rafinerija - Tehnička kontrola, A.  
Kovačića 1, 44103 Sisak

2Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Aleja narodnih heroja 3, 44103 Sisak

**Ključne riječi:** nerazorna ispitivanja, Ni-slitina, zavareni spoj, tvrdoča, metalografija

**Key words:** non-destructive testing, Ni-alloy, welded joint, hardness, metallography

### Sažetak

U radu je prikazan postupak provođenja nerazornih ispitivanja na tlačnoj opremi koja je izrađena od slitine na bazi nikla UNS SB 409 – UNS NO 8811 (Incoloy 800HT). Cilj istraživanja je bio procijeniti širenje detektiranih nepravilnosti u odnosu na prethodna ispitivanja. Na temelju navedene procjene donijet je zaključak o mogućnosti daljnje upotrebljivosti opreme ili potrebi odgovarajuće sanacije. Za postizanje postavljenog cilja korištene su metode ispitivanja bez razaranja poput vanjske vizualne kontrole materijala plašta i zavarenih spojeva, unutarnje vizualne kontrole endoskopom i kontrole pomoću penetrantom. Također je provedeno mjerjenje tvrdoće te metalografska ispitivanja radi mikrostrukturne karakterizacije. Utvrđeno je da je nužna sanacija i zavarivanje nove „weldolete“. Povišene vrijednosti tvrdoće izmjerene su u zoni utjecaja topline (185-291 HV<sub>10</sub>) i zoni taljenja (238-314 HV<sub>10</sub>).

### Abstract

This paper presents a procedure of the implementation of non-destructive testing on the equipment under pressure which is made from stainless steel UNS SB 409 – UNS NO 8811. The aim of investigation was estimate propagation of detected irregularities in relation to the previous testing. Based on this estimation, it brings a conclusion about a possibility of further application of equipment or need for appropriate repair. To achieve predicted aim methods of non-destructive testing like external visual control of mantle material and welded joints, internal visual control by endoscope and testing using penetrants were used. Also, hardness measuring and metallographic examination for microstructural characterization was performed. It was found that the necessary repairs and welding of new weldolete. Higher hardness values were measured in the heat-affected zone (185-291 HV<sub>10</sub>) and weld metal (238-314 HV<sub>10</sub>).

## 1. UVOD

Metode ispitivanja bez razaranja materijala su neizostavan dio osiguranja kvalitete zavarenih spojeva. Otkrivanjem pogrešaka konstrukcija ili dijelova opreme u vrlo kratkom vremenu sprječavaju se nepredviđeni zastoji i havarije te se smanjuju troškovi i štiti okoliš.

Prijelomi komponenti opreme koja je izložena djelovanju visoke temperature često su povezani s toplinskim naprezanjem i korozionskim procesima [1]. Poznato je da su slitine na bazi nikla kvalitetni materijali koji mogu ispuniti vrlo visoke zahtjeve u pogledu korozionske otpornosti i mehaničkih svojstava tijekom izloženosti povišenim temperaturama. Stoga je primjena slitina na bazi nikla najčešće za izradu komponenti mlaznih motora, raketa, nuklearnih postrojenja, u prehrambenoj i kemijskoj industriji te u pomorstvu [2, 3].

Najvažnije svojstvo elementarnog nikla je otpornost na koroziju, npr. nikal je glavni nositelj otpornosti na koroziju galvanski kromiranih čeličnih proizvoda. Nasuprot njemu, mikroskopski

površinski sloj kroma je prožet risevima i porama što nepovoljno utječe na koroziju zaštitu materijala. Zaštitni sloj nikla je otporan na atmosferske utjecaje, postojan u morskoj vodi, neoksidirajućim hladnim kiselinama, lužnatim otopinama i rastaljenim jakim lužinama.

Tijekom žarenja i zavarivanja nikal može otopiti veće količine kisika i vodika pa se iznad 900°C po granicama zrna može pojaviti oksid NiO, koji znatno otežava hladno oblikovanje deformiranjem. Nasuprot tome, otopljeni vodik utječe na nastanak pora i mjeđurića tijekom hlađenja materijala.

Budući da slitine na bazi nikla posjeduju plošno centriranu kubičnu rešetku (FCC) kod njih snižavanjem temperature ne dolazi do prijelaza iz žilavog u krhki prijelom pa zbog toga takve slitine pripadaju skupini žilavih materijala. Važno svojstvo niklovih slitina je i velika brzina hladnog očvršćivanja, zbog čega se moraju tijekom prerade podvrgnuti postupku odžarivanja. Najpoznatije slitine na bazi nikla su [4]:

- nikal-bakar (tzv. Monel),
- nikal-krom (tzv. Nimonic),
- nikal-molibden-krom (tzv. Hastelloy),
- nikal-krom-željezo ((tzv. Inconel),
- nikal-željezo-krom (tzv. Incoloy),
- nikal-krom+dodaci (npr. Al, Ti, Co, W itd.) (tzv. Superlegure).

Cilj ovog rada bio je procijeniti širenje prethodno detektiranih nepravilnosti metodama nerazornih ispitivanja na zavarenom spoju opreme u eksploataciji izrađene iz slitine na bazi nikla UNS SB 409 – UNS NO 8811. Slitina UNS SB 409 – UNS NO 8811 je poznatija kao slitina Incoloy 800HT te se najčešće koristi za izradu komponenti peći, plašteva za električne grijače elemente te u petrokemijskoj industriji. Na osnovi povoljnih svojstava, poput visoke čvrstoće i korozijske otpornosti, smatra se da slitina Incoloy 800HT predstavlja četvrtu generaciju slitina za primjenu u izgradnji nuklearnih postrojenja [3, 5].

## **2. EKSPERIMENTALNI DIO**

U ovom radu prikazani su rezultati provedenih nerazornih ispitivanja tlačne opreme tijekom primjene te uloga nerazornih ispitivanja u osiguravanju sigurnog rada postrojenja. Ispitivana oprema je bila izrađena iz slitine na bazi nikla oznake UNS SB 409 – UNS NO 8811 (tzv. Incoloy 800HT), tablica 1. Radni medij koji se nalazio u posudi postrojenja predstavlja je smjesu vodik+vodena para, pri tlaku 16 bara i temperaturi 815 °C.

**Tablica 1. Standardni kemijski sastav slitine UNS SB 409 (Incoloy 800HT), mas. % [6]**

Ni	Cr	Fe	C	Mn	Si	Al	Ti	P	S
30,0- 35,0	19,0- 23,0	39,5	0,05- 0,10	1,50	1,0	0,85- 1,20	0,25- 0,60	0,045	0,15

Za procjenu stanja analizirane opreme korištene su slijedeće metode ispitivanja:  
vizualna kontrola izvana i iznutra (iznutra pregled endoskopom),  
ultrazvučno mjerjenje debljine stjenke,  
ultrazvučna kontrola zavarenih spojeva,  
mjerjenje ultrazvučnog prigušenja,  
mjerjenje tvrdoće na kritičnim mjestima,  
penetrantska kontrola zavarenih spojeva,  
metalografska ispitivanja uzimanjem otiska mikrostrukture s vanjske strane u svrhu analize stanja materijala.

Vizualni pregled ispitivanog objekta obavljen je s vanjske strane. S unutarnje strane je vizualna kontrola obavljena endoskopskom metodom pomoću endoskopa Olympus Iplex SA. Pritom je ispitivana unutrašnjost postrojenja s posebnim naglaskom na spoj plašt – košuljica i na područje oko tzv. „weldoleta“ (fazonski uvarni komad s nastavkom za uvarni spoj).

Mjerenje debljine stjenke obavljeno je s vanjske strane objekta na uobičajenim presjecima (nekoliko presjeka podnice, plašta, te svih priključaka).

Penetrantsko ispitivanje provedeno je na zavarenim spojevima plašta i priključaka (svi kutni i sučevani zavareni spojevi) s vanjske strane.

Ultrazvučnim ispitivanjima ispitani su sučevani zavareni spojevi plašta i spojevi plašt-podnica.

Mjerenje ultrazvučnog prigušenja obavljeno je s vanjske strane i to na mjestima osnovnog materijala plašt-a i podnice.

Mjerenje tvrdoće je obavljeno na kritičnim mjestima tj. na liniji OM1-ZUT1-ZONA TALJENJA-ZUT2-OM2 (OM-osnovni materijal, ZUT-zona utjecaja topline), a uzimajući u obzir prethodno provedena ispitivanja. Metalografske replike su uzete s vanjske strane ispitivanog postrojenja.

### 3. REZULTATI I DISKUSIJA

Vizualnom kontrolom vanjske strane materijala plašta i zavarenih spojeva nisu uočene nepravilnosti koje bi utjecale na siguran rad ispitivane opreme. Vizualnom kontrolom unutarnje stjenke pomoću endoskopa uočene su pukotine i oštećenja košuljice. Usporedbom dobivenih rezultata s rezultatima prethodnih ispitivanja uočeno je znatnije širenje nastalih oštećenja. Pritom se može zamjetiti da se pukotina koja je nastala na zavarenom spoju košuljica – plašt (slika 1) proširila po cijelom opsegu. Slično ponašanje se može zamjetiti i kod pukotine oko „weldoleta“ (slika 2) gdje se učestalost i veličina pukotina znatno proširila te se pokazala potreba za sanacijom radi očuvanja sigurnosti postrojenja. Sanacija je provedena tako da je dio plašta sa pukotinama izrezan, te je provedena priprema spoja za zavarivanje (slika 3). Nakon pripreme spoja za zavarivanje provedeno je zavarivanje nove „weldolete“ većeg promjera (slika 4).



Slika 1. Fotosnimak zavarenog spoja košuljica-plašt



Slika 2. Fotosnimak pukotine oko „weldolete“

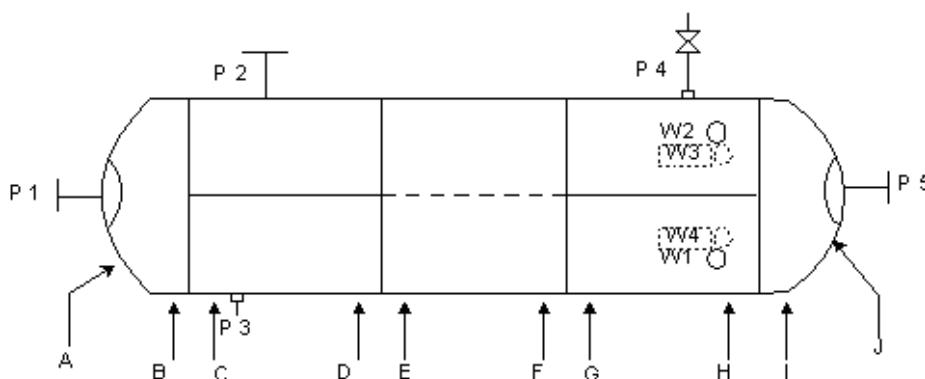


Slika 3. Fotosnimak oštećenog dijela „weldolete“ (a) i priprema za zavarivanje nove „weldolete“ (b)



Slika 4. Fotosnimak nove „weldolete“ nakon zavarivanja

Mjeranjem debljine stjenki ustanovljeno je da nema značajnijih promjena dimenzija (slika 5, tablica 2). Mjeranjem tvrdoće osnovnog materijala (OM), zone utjecaja topline (ZUT) i zone taljenja uočeno je da tvrdoća osnovnog materijala iznosi od 190 do 236 HV<sub>10</sub>. Povišene vrijednosti tvrdoće izmjerene su u ZUT-u (185-291 HV<sub>10</sub>) i zoni taljenja (238-314 HV<sub>10</sub>). Povišene vrijednosti tvrdoće povezane su s promjenom mikrostrukture zbog unosa topline tijekom zavarivanja te taljenja i ponovnog skrućivanja zone zavara.



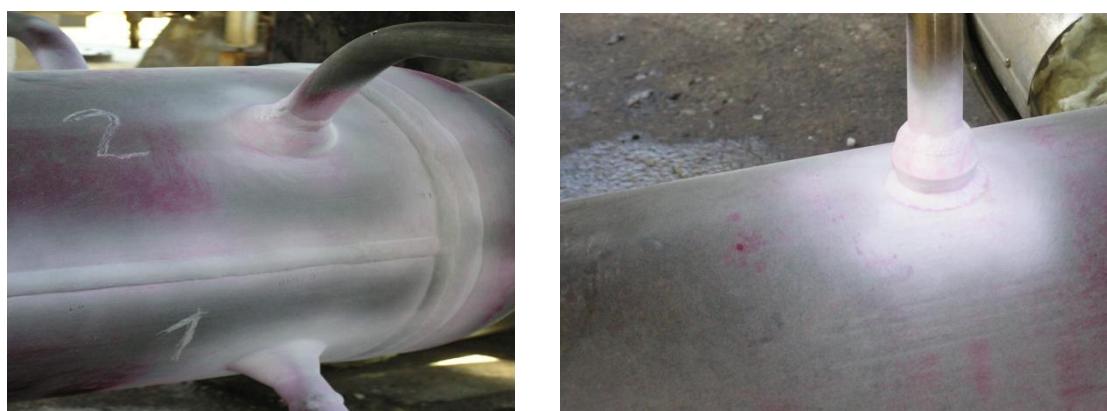
*Slika 5. Shematski prikaz mjernih mesta odabralih za ultrazvučno mjerjenje debljine stjenki*

*Tablica 2. Rezultati mjerena debljina stjenki na mjestima označenim na slici 5, mm*

A	23,8	23,9	23,9	23,6	P1	22,7	22,8	22,6	22,7
B	28,3	28,8	28,5	28,2	P2	10,6	10,3	10,3	10,4
C	26,0	26,2	26,0	26,3	P3	3,8	3,7	3,8	3,6
D	26,2	26,2	26,0	26,4	P4	4,3	4,4	4,4	4,3
E	26,0	25,9	26,4	26,2	P5	10,1	10,2	10,2	10,2
F	26,4	25,7	25,7	26,3	W1	4,2	4,1	3,8*	3,7*
G	26,3	26,1	26,5	26,5	W2	4,3	4,3	3,9*	3,9*
H	25,8	25,7	25,8	25,5	W3	4,2	4,3	3,9*	4,0*
I	28,0	28,0	27,8	28,0	W4	4,3	4,5	3,9*	3,9*
J	25,1	25,0	24,3	24,6					

\* na koljenima cjevovoda iza zavarenog spoja cijev- “weldoleta”

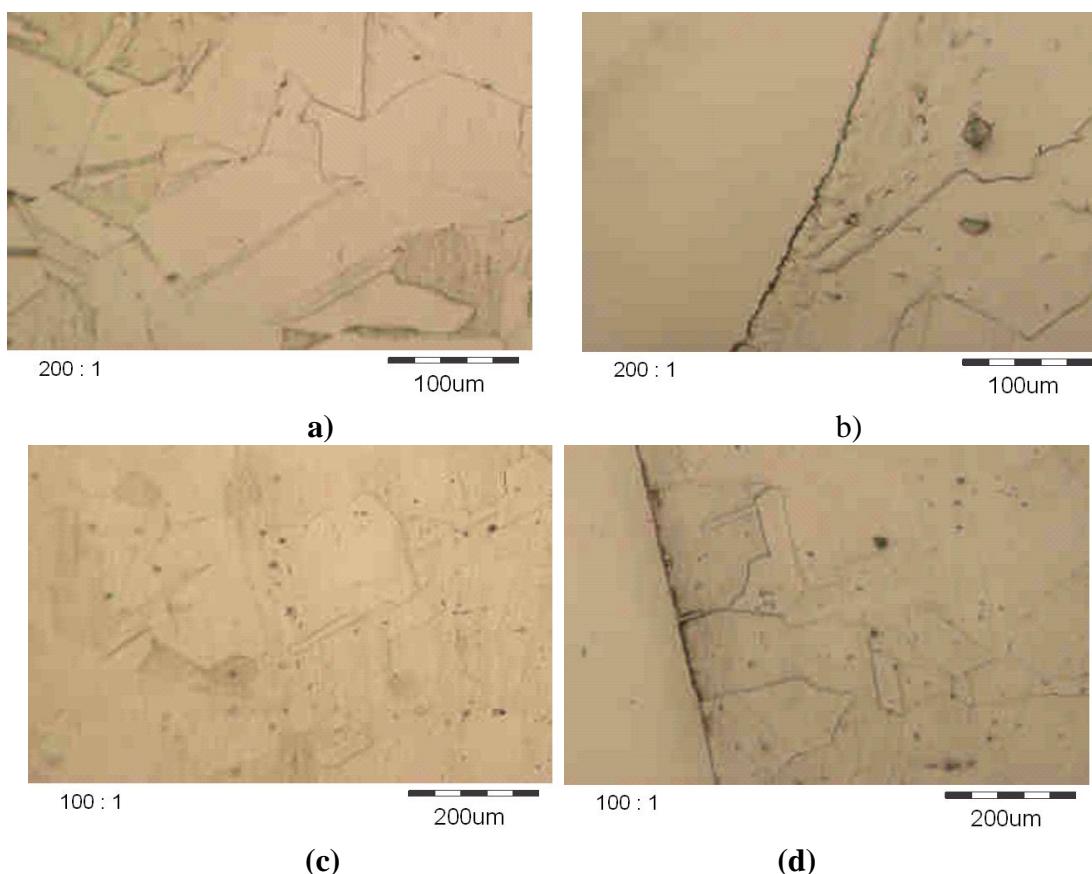
Ultrazvučnim ispitivanjima zavarenih spojeva nisu detektirane nedozvoljene indikacije. Također, ultrazvučnim mjeranjem prigušenja izmjerene vrijednosti su bile unutar prihvatljivih granica. Penetrantskim ispitivanjima s vanjske strane zavarenog spoja nisu uočene nedozvoljene indikacije (slika 6).



*Slika 6. Fotosnimci penetrantskog ispitivanja zavarenog spoja*

Analizom metalografskih replika osnovnog materijala potvrđena je austenitna mikrostruktura s kristalima dvojnicima koja je karakteristična za ispitivani materijal UNS SB 409, slika 7. Također, može se uočiti mjestimično pogrubljenje zrna. U blizini linije staljivanja uočava se sitnije usmjereni zrno u odnosu na osnovni materijal. Pritom materijal zavara ima znatno grublju

dendritnu mikrostrukturu. Na svim analiziranim mjestima prisutne su sitne jamice („pitting“) po granicama i unutar zrna te mjestimični porozitet.



*Slika 7. Optičke mikrografije radikalno zavarenog spoja snimljene na strani podnice (a-osnovni materijal, b-linija staljivanja) i plašta (c-osnovni materijal, d-linija staljivanja)*

#### 4. ZAKLJUČAK

Na temelju provedenih ispitivanja bez razaranja na zavarenoj opremi tijekom eksploatacije može se zaključiti slijedeće:

Vizualnom kontrolom vanjske strane materijala plašta i zavarenih spojeva nisu uočene nepravilnosti koje bi utjecale na siguran rad ispitivanog postrojenja.

Endoskopski su uočene pukotine i oštećenja košuljice.

Pukotine koja su nastale na zavarenom spoju košuljica – plašt i oko „weldolete“ proširile su se od prethodnog ispitivanja po cijelom opsegu.

S obzirom na širenje pukotina bila je nužna sanacija koja je i provedena zavarivanjem nove „weldolete“ većeg promjera.

Tvrdoča osnovnog materijala iznosila je od 190 do 236 HV<sub>10</sub>. Povišene vrijednosti tvrdoče izmjerene su u ZUT-u (185-291 HV<sub>10</sub>) i zoni taljenja (238-314 HV<sub>10</sub>).

Ultrazvučnim i penetrantskim ispitivanjima zavarenih spojeva nisu detektirane nedozvoljene indikacije.

Metalografska analiza je pokazala da je mikrostruktura osnovnog materijala austenitna s mjestimično vidljivim kristalima dvojnicima. Nasuprot tome, zona taljenja je imala znatno grublju dendritnu mikrostrukturu.

Ispitivanja tijekom eksploatacije (“In-service inspection”) od iznimne su važnosti za sigurnost procesnih i energetskih postrojenja.

Nerazorna ispitivanja imaju značajnu ulogu u osiguranju kvalitete, te daju informaciju o stanju opreme. Na osnovi tih informacija moguće je predložiti daljnje aktivnosti u svrhu osiguranja kvalitete ali i postizanje ekonomskih ušteda.

## **5. LITERATURA**

- [1] L.Y. Xu, P. Zhu, H.Y. Jing, K. Guo, S.X. Zhong, Y.D. Han, Failure analysis of Incoloy 800HT pipe at high temperature, *Engineering Failure Analysis* 31 (2013) 375-386.
- [2] H.M. Tawancy, A. Ul-Hamid, A.I. Mohammed, N.M. Abbas, Effect of materials selection and design on the performance of engineering product – An example from petrochemical industry, *Materials and Design* 28 (2007) 686-703.
- [3] L. Tan, K. Sridharan, T.R. Allen, The effect of grain boundary engineering on the oxidation behavior of INCOLOY alloy 800H in supercritical water, *Journal of Nuclear Materials* 348 (2006) 263-271.
- [4] T. Filetin, F. Kovačićek, J. Indof, *Svojstva i primjena materijala*, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.
- [5] M. Fulger, M. Mihalache, D. Ohai, S. Fulger, S.C. Valeca, Analyses of oxide films grown on AISI 304L stainless steel and Incoloy 800HT exposed to supercritical water environment, *Journal of Nuclear Materials* 415 (2011) 147-157.
- [6] ASTM B409 - 06(2011) Standard Specification for Nickel-Iron-Chromium Alloy Plate, Sheet, and Strip (<http://www.astm.org/Standards/B409.htm>)