

NERAZORNA ISPITIVANJA ZAVARENOG DUPELKS NEHRĐAJUĆEG ČELIKA 2205

NON-DESTRUCTIVE TESTING OF WELDED DUPLEX STAINLESS STEEL 2205

Damir PINOTIĆ¹⁾, Stjepan KOŽUH²⁾, Mirko GOJIĆ²⁾

Ključne riječi: zavarivanje, dupleks nehrđajući čelik, nerazorna ispitivanja, ferit

Key words: welding, duplex stainless steel, non-destructive testing, ferrit

Sažetak: U radu su prikazani rezultati analize kvalitete zavarenog spoja nehrđajućeg dupleks čelika X2CrNiMoN22-5-3. Cilj je bio utvrditi greške zavarenog spoja nastale tijekom zavarivanja. Zavarivanje je provedeno na limu dimenzija 300 × 300 × 16 mm koji je pripremljen u obliku sučeljenog V-spoja. Zavarivanje korijena V-spoja provedeno je netaljivom elektrodom pod zaštitom plina (TIG postupak), a popuna ručnim elektrodučnim postupkom (REL postupak). Zavarivanje korijena je ostvareno žicom Böhler CN 22/9 N-IG, a popuna elektrodom Böhler FOX CN 22/9 N-B. Za utvrđivanje nastalih grešaka zavarenog spoja korištene su metode ispitivanja bez razaranja (ultrazvučna tehnika TOFD – Time of Flight Diffraction i radiografija). Ispitivanjem bez razaranja nisu utvrđene nepravilnosti i greške nastale zavarivanjem te dobiveni zavareni spoj zadovoljava sve zahtijevane kriterije kvalitete. Sadržaj ferita u osnovnom materijalu i zoni taljenja izmjeren je pomoću feritoscopa. Utvrđeno je da osnovni materijal sadrži oko 31,5 %, a zona taljenja 36-61 % ferita. Najviši sadržaj ferita (48-61 %) izmjeren je u korijenu zone taljenja.

Abstract: The paper presents the results of the analysis of welded joint quality for duplex stainless steel X2CrNiMoN22-5-3. The aim of this work was to identify weld defects incurred during the welding. The welding was performed on a sheet of dimensions 300 × 300 × 16 mm, which was prepared in the form of butt V-joint. Welding of root of V-joint was carried out with nonconsumable electrode under protection gas (TIG), and filled with manual arc welding (SMAW process). Welding of the root was realized by wire Böhler CN 22/9 N-IG, and filled with electrode Böhler FOX CN 22/9 NB. For determine of weld defects were used methods of nondestructive testing (ultrasonic testing technique TOFD - Time of Flight Diffraction and radiographic testing). Nondestructive testing not shown of irregularities and defects which can be caused by welding, and weld has all the required acceptance criteria. The content of ferrite in the base metal and weld metal was measured with ferritoscope. It was found that the base metal contains about 31,5 %, and weld metal 36-61 % of ferrite. The highest content of ferrite (48-61 %) was measured in the root of weld metal.

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

²⁾ Metalurški fakultet Sisak, Aleja narodnih heroja 3, 44103 Sisak



1. UVOD

Dupleks nehrđajući čelici pripadaju skupini korozijski postojanih čelika zajedno s austenitnim, feritnim, martenzitnim i precipitacijski očvrnutim čelicima. Dupleks nehrđajući čelici su posebni po tome što, za razliku od ostalih, nemaju monofaznu već bifaznu strukturu sastavljenu od ferita (bcc) i austenita (fcc) u podjednakim količinama. Stručnoj javnosti su poznati još od tridesetih godina prošlog stoljeća, ali u širu uporabu ulaze posljednjih desetak godina. Njihovo glavno obilježje jest izvanredno dobra otpornost prema interkristalnoj, napetostnoj (SCC) i rupičastoj koroziji u kombinaciji s visokom vlačnom čvrstoćom, visokom granicom razvlačenja i dobrom žilavošću [1].

Zavarivanje dupleks nehrđajućih čelika je dugo vremena predstavljalo dosta velik problem. Dupleks nehrđajući čelici prve generacije s niskim udjelom ili potpuno bez dušika, redovito su imali prevelik udio ferita u zoni taljenja i zoni utjecaja topline. Zbog toga je zavareni spoj imao nisku korozijsku postojanost i nisku žilavost. Da bi se postigla zadovoljavajuća svojstva zona taljenja mora imati između 25 i 60 % ferita. Povećanjem udjela nikla u dodatnom materijalu, riješen je problem prevelike feritizacije i loših svojstava u zoni taljenja, ali je i dalje ostao prisutan u zoni utjecaja topline. Daljnjim razvojem dupleks nehrđajućih čelika i uvođenjem dušika kao obveznog legirajućeg elementa, omogućeno je smanjenje feritizacije i poboljšanje mehaničkih i korozijskih svojstava i u ZUT-u.

Danas se suvremeni dupleks nehrđajući čelici zavaruju bez poteškoća zahvaljujući boljem razumijevanju utjecaja različitih parametara na kvalitetu zavara.

Za zavarivanje dupleks nehrđajućih čelika mogu se primijeniti različiti zavarivački postupci. Dominantni postupci zavarivanja dupleks čelika su zavarivanje netaljivom elektrodom pod zaštitom plina (TIG postupak) i ručni elektrolučni postupak (REL postupak), ali i zavarivanje taljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina (MIG postupak) se koristi sve češće.

TIG postupak zavarivanja daje vrlo kvalitetan zavar s malom količinom uključaka i visokim iznosima žilavosti. Slaba točka ovog postupka je niska produktivnost. Kao zaštitni plin kod TIG postupka zavarivanja koriste se čisti Ar ili Ar + 5 % N₂.

Jako je važno da se prilikom zavarivanja obrati pozornost na količinu unesene topline. Za materijal 2205 preporučeni unos topline je 0,5 kJ/mm, te međuslojna temperatura maksimalno 250 °C [2].

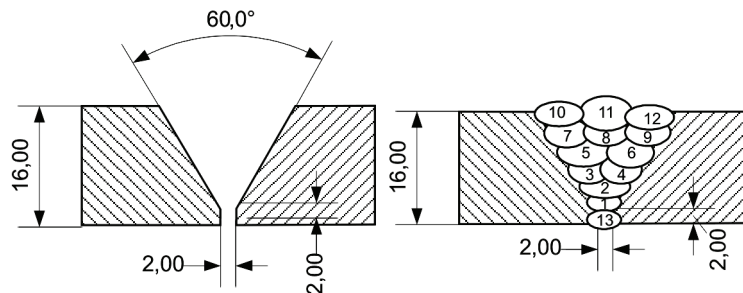
Prilikom nerazornih ispitivanja zavarenih spojeva dupleks čelika koriste se konvencionalne metode ispitivanja (vizualna kontrola, kontrola penetrantima, radiografska kontrola te ultrazvučna kontrola). Kontrola zavarivanja neke konstrukcije često zahtijeva određivanje feritnog broja (FN). Feritni broj (FN) označava sadržaj delta-ferita u zoni taljenja nehrđajućeg čelika. Feritni broj se često koristi kao indikator otpornosti zone taljenja na vruće pukotine. Ovaj aspekt i druge inženjerske karakteristike u svezi su sa FN vrijednošću metala zavara daju vrijednosti FN za austenitno/feritni metal zavara 30-70.

2. EKSPERIMENTALNI DIO

Istraživanje je provedeno na limu debljine 16 mm iz dupleks čelika (AISI/ASTM 2205, W.Nr. 1.4462, EN X2CrNiMoN22-5-3) TIG+REL postupkom.

Priprema za zavarivanje i redoslijed zavarivanja prikazani su na slici 1.

Kao dodatni materijal za TIG postupak zavarivanja odabrana je žica BÖHLER CN 22/9 N-IG, tablica 1. Kao dodatni materijal za REL postupak zavarivanja odabrana je elektroda BÖHLER FOX CN 22/9 N-B. Parametri postupaka zavarivanja istraživanog dupleks čelika 2205 navedeni su u tablici 3.



Slika 1. Priprema spoja za zavarivanje, te redosljed zavarivanja

Tablica 1. Kemijski sastav žice za zavarivanje TIG postupkom, mas. % [3]

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	N
0,015	0,4	1,70	22,5	8,80	3,20	0,15

Tablica 2. Kemijski sastav elektrode za REL zavarivanje, mas. % [3]

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	N
0,03	0,3	1,10	22,6	8,80	3,10	0,16

Tablica 3. Parametri zavarivanja dupleks nehrđajućeg čelika 2205

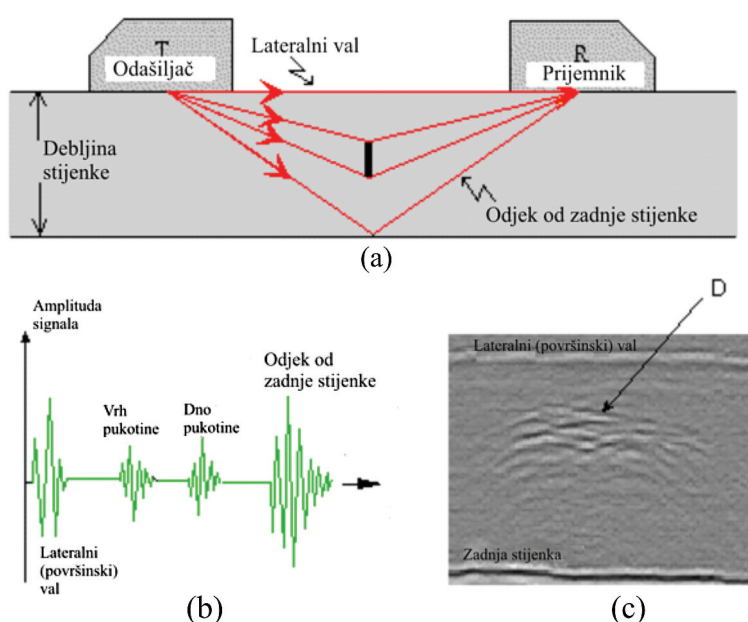
Welding parameters Parametri zavarivanja						
Pass No. Prolaz br.	Process Postupak	Size of filler Promjer DM (mm)	Current Jakost struje (A)	Voltage Napon (V)	Type/polarity Vrsta/polaritet	Gas flow rate Protok plina (l/min)
1	141	2	95	11,5-12,5	(-)	9
2	141	2	130	13,5-14,5	(-)	9
3	111	3,2	100	23-28	(+)	
4-12	111	3,2	110	25-30	(+)	
13	141	2	130	13,5-14,5	(-)	9

Filler metal Dodatni materijal		Postweld heat treatment Toplinska obrada poslije zavarivanja	Ne
Designation and manufacturer Naziv i proizvođač	BOHLER CN 22/9 N-IG + BOHLER FOX CN 22/9 N-B	Preheat temperature Temperatura predgrijavanja	Ne
Classification Klasifikacija	EN 12072:1999: W 22 9 3 NL AWS A5.9-93: ER2209 + EN 1600:1997: E 22 9 3 N L B 2 2 AWS A5.4-92: E2209-15	Interpass temperature Medjuslojna temperatura	Max. 150°C
Coat type / Tip obloge	bazična	Max. layer width Max. širina-njihanje	TIG 4 promjera elektrode REL povlačenjem
Flux composition Sastav praša		Initial and interpass cleaning Početno i međuslojno čišćenje	Četkanje
Size and type W-electrode Promjer i vrsta W elektrode	1,6 mm (1% Th)	Other/Ostalo	
Shielding gas/Backing gas Zaštitni plin/Zaštita korijena	Argon Ar (99,999%) 8-12 l/min		

Nakon zavarivanja provedeno je ispitivanje zavarenog spoja metodama bez razaranja (radiografija, ultrazvuk, penetranti). Radiografsko ispitivanje je provedeno tehnikom "jednostruka stjenka-jednostruka slika", a kao izvor prozračivanja je korišten izotop Ir 192 dimenzija $2 \times 2,5$ mm.

Ultrazvučno ispitivanje je provedeno TOFD tehnikom pomoću uređaja OMNISCAN MX uz primjenu ultrazvučne sonde 2,25 MHz i klin 60° , razmak između sonde bio je 40 mm. Duljina "scana" je 270 mm

Kod TOFD tehnike kada longitudinalni ultrazvučni valovi odašlani sa odašiljačke sonde (T) naiđu na neku nepravilnost npr. pukotinu na krajevima pukotine će se pojaviti sferni valovi koji se šire u svim smjerovima i koje će sonda prijemnik (R) detektirati i pretvoriti u signal vidljiv na "A" prikazu, slika 2. Također će na biti vidljivi i lateralni val i signal od zadnje stjenke.



Slika 2. Princip rada TOFD ispitivanja (a), "A" prikaz (b) i "B" prikaz (c)

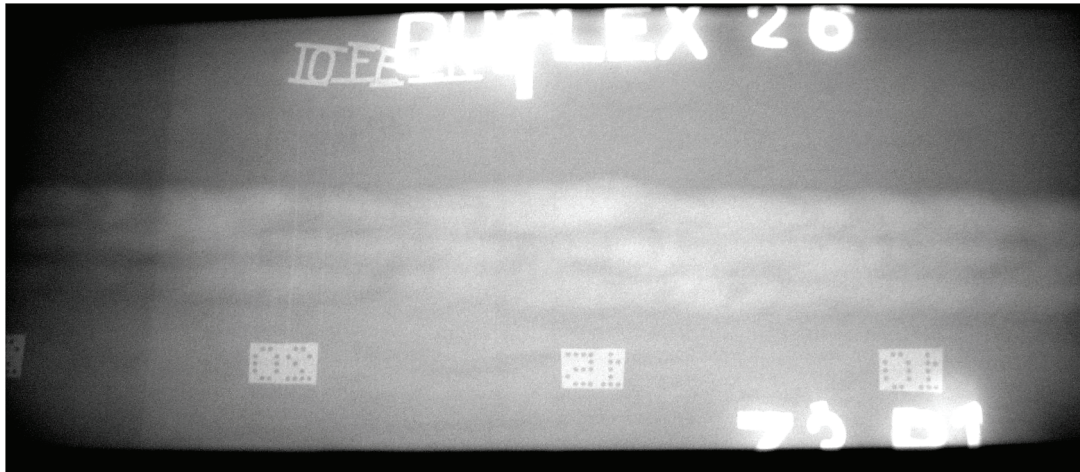
Ispitivanje pomoću penetranta provedeno je penetrantskim sustavom HRN EN 571-1-IIIAC-2 proizvođača MR Chemie GmbH sa strane lica i korijena zavarenog spoja. Pritom je za odmašćivanje korišten čistač MR-79, a za penetraciju penetrant MR-68C. Nakon 15 minuta djelovanja penetrant je uklonjen vodom. Vrijeme razvijanja (razvijač MR 70) je iznosilo 30 minuta.

Nakon zavarivanja obavljeno je i mjerenje sadržaja ferita na licu i u korijenskom dijelu zavarenog spoja. Mjerenje je izvršeno uređajem FERITOSCOPE MP30E, sondom EGAB1.3-FE, dok je kalibracija obavljena na kompletu kalibracijskih uzoraka N-3024 (%Fe – WRC 1,5/30).

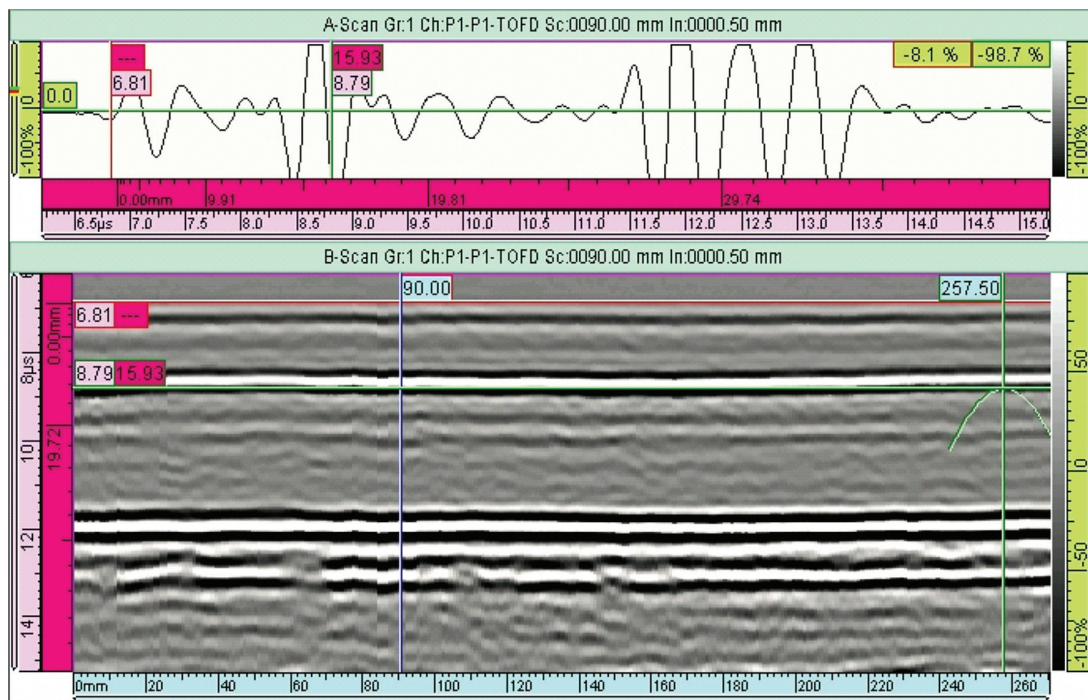
3. REZULTATI I DISKUSIJA

Ocjenom snimke radiograma (slika 3) nisu uočene greške unutar zone taljenja. TOFD analizom zavarenog spoja nisu detektirane indikacije, slika 4. Uz svu prednost ispitivanja koju pruža TOFD tehnika ispitivanja (velika brzina ispitivanja, ponovljivost ispitivanja i određivanje veličine nepravilnosti, te neosjetljivost na usmjerenost nepravilnosti) mora se napomenuti i imati na umu ograničenja TOFD tehnike ispitivanja. Ova tehnika ima takozvanu "mrtvu zonu"

tj. dio materijala koji nije moguće ispitati (površinski i podpovršinski dio). Relativno slaba osjetljivost na pronalaženje malih nepravilnosti koje se nalaze u blizini zadnje stjenke te osjetljivost na materijale koji imaju relativno grubu strukturu te je teško razaznati "šum" od stvarne indikacije.



Slika 3. Radiografski snimak zavarenog spoja dupleks čelika 2205



Slika 4. TOFD prikaz skeniranog zavarenog spoja

Mjerenje delta ferita obavljeno je na atestnoj ploči u tri presjeka A, B i C (A=50 mm, B=150 mm i C= 250 mm od ruba zavarenog spoja). Mjerenje je vršeno na licu zavarenog spoja i na korijenskom dijelu zavarenog spoja. Rezultati mjerenja prikazani su u tablici 4.

Uočena je razlika u izmjenjenim vrijednostima sadržaja delta ferita na licu zavarenog spoja i korijenskog dijela zvara. Razlog je u korištenom dodatnom materijalu i količini unesene topline.

Tablica 4. Izmjerene vrijednosti delta ferita u zoni taljenja

	A				B				C			
	1	2	3	Sr.vrij.	1	2	3	Sr.vrij.	1	2	3	Sr.vrij.
Lice	44,80	45,40	32,20	40,80	32,30	36,10	39,90	36,10	32,70	41,70	43,50	39,30
Korijen	57,10	58,50	61,30	58,97	51,90	55,40	55,90	54,40	55,80	61,20	66,10	61,03

4. ZAKLJUČAK

Na temelju provedenih ispitivanja bez razaranja dupleks nehrđajućeg čelika 2205 zavarenog kombinacijom postupaka TIG+REL zaključeno je sljedeće:

- Pravilnim odabirom dodatnog materijala, kontrolom parametara zavarivanja, uvježbanošću zavarivača dobivena je izuzetna kvaliteta zavarenog spoja.
- Nerazornim metodama (radiografskim, penetrantskim i ultrazvučnim) ispitivanjima zavarenog spoja nisu utvrđene greške unutar zone taljenja.
- Mjerenjem sadržaja delta ferita u metalu zavara dobivene su vrijednosti koje zadovoljavaju zadani kriterij prihvatljivosti. Uočena je razlika u količini delta ferita na strani lica zone taljenja u odnosu na korijenski dio zavarenog spoja. To se može objasniti time što su korišteni različiti dodatni materijali, postupci zavarivanja i količina unešene topline u zavareni spoj lica u odnosu na korijen zone taljenja.
- S obzirom na ograničenja koja TOFD ima sigurno nije moguće da zamijeni radiografsko ispitivanje. Međutim ne treba se TOFD potpuno odbaciti već ga je potrebno koristiti u kombinaciji s ultrazvučnom puls eho tehnikom (višepretvornička ultrazvučna tehnika poznata kao "Phase Array"), koja s određenim stupnjem automatizacije i softverskom podrškom može zamijeniti radiografiju. Međutim ono gdje TOFD zasigurno može naći svoju primjenu je ispitivanje u eksploataciji, i to za praćenje određenih indikacija u materijalu zavara poznavajući početno stanje objekta za ispitivanje. Prednost takvog ispitivanja je relativno velika ponovljivost i brzina ispitivanja bez da se vrši obustava postrojenja što je velika ušteda za proizvodnju.

5. LITERATURA

- [1] Gojić M., "Tehnike spajanja i razdvajanja", Metalurški fakultet Sisak, 2003.
- [2] Welding practice for the Sandvik dupleks stainless steels SAF 2304, SAF 2205 and SAF 2507.
- [3] BÖHLER WELDING - WELDING GUIDE - Edition 09/2006.
- [4] Ferrite Measurement in Austenitic and Duplex Stainless Steel Castings; Materials Joining Research Group Department of Materials Science and Engineering the University of Tennessee, Knoxville, August 1999.