

# ISPITIVANJE NAVAREN OG SLOJA OD INCONEL LEGURE

## TESTING OF THE OVERLAY WELD OF INCONEL ALLOY

Ivica Kladarić<sup>1</sup>, Marin Plaščak<sup>1</sup>, Slavica Kladarić<sup>2</sup>, Nikolina Berić<sup>1</sup>, Andrijana Milinović<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Sveučilište u Slavanskom Brodu, Strojarski fakultet u Slavanskom Brodu, Trg Ivane Brlić Mažuranić 2, Slavonski Brod

<sup>2</sup>Sveučilište u Slavanskom Brodu, Tehnički odjel, Dr. Mile Budaka 1, Slavonski Brod

**Ključne riječi:** kotlogradnja, kotlovske cijevi, membranski zid, navarivanje, niklove legure

**Key words:** boiler construction, boiler pipes, membrane wall, overlay weld process, nickel alloys

**Sažetak:** U radu je dan sažeti pregled norme HRN EN ISO 15614-7:2019 prema kojoj se provode ispitivanja navarenog sloja. U eksperimentalnom dijelu rada provedena su ispitivanja navarenog sloja od Inconel legure 625 na membranskom zidu kotlovskih cijevi izrađenima od niskolegiranog čelika 16Mo3 prema navedenoj normi. Provedeno je makrografsko ispitivanje, ispitivanje tvrdoće te ispitivanje savijanjem.

**Abstract:** The paper gives a brief overview of the standard HRN EN ISO 15614-7:2019, according to which the tests of the overlay weld are performed. In the experimental part of the work, tests of the overlay weld of Inconel alloy 625 on the membrane wall of boiler pipes produced of the low alloyed steel 16Mo3 were performed according to the stated standard. Macrographic testing, hardness testing and bending testing were performed.

### 1 UVOD

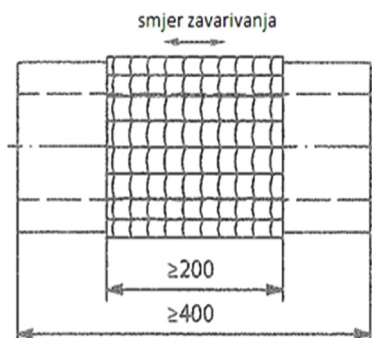
Izgaranjem goriva, poput ugljena i sirove nafte, dolazi do oslobađanja štetnih plinova koji mogu kemijski reagirati s površinom materijala, a to može uzrokovati oštećenja i zastoje u radu. Kod konstruiranja kotla, osim mehaničke postojanosti, vrlo je važna i korozijska postojanost pri visokim temperaturama. Čelici za rad pri povišenim i visokim temperaturama su skupina konstrukcijskih čelika koji zbog svojih dobrih mehaničkih svojstava pri povišenim i visokim radnim temperaturama imaju najširu primjenu u kotlogradnji u odnosu na ostale konstrukcijske materijale [1].

Prilikom izbora čelika za izradu pojedinih dijelova moguće je skupe korozijski postojane čelike zamijeniti jeftinijima na koje se određenim postupcima nanose slojevi odgovarajućih svojstava. Površinska obrada navarivanja jedan je od takvih postupaka kojima se postiže korozijska postojanost površine pri visokim temperaturama [2].

### 2 ANALIZA NORME ISPITIVANJA

Prije primjene postupka navarivanja, potrebno je provesti ispitivanja na proizvodnim uzorcima, kako bi se provjerila sukladnost proizvodnim zahtjevima. Ispitivanja navarenog sloja na proizvodnim uzorcima provode se prema normi HRN EN ISO 15614-7:2019. Primjena postupka navarivanja može započeti tek nakon što su rezultati svih ispitivanja u skladu s kriterijima prihvatljivosti. Navarivanje proizvodnih uzoraka mora biti provedeno u istim tehničkim uvjetima i s istim parametrima kao i navarivanje koje će se provesti u proizvodnji. Bilo kakva značajna promjena parametara navarivanja ili opreme za navarivanje treba se razmotriti kao dovoljan razlog za provođenje dodatnih ispitivanja.

Proizvodni uzorak navarene cijevi mora sadržavati minimalno tri koraka gornjeg navarenog sloja, a ako u proizvodnji postoji srednji navareni sloj, također ga mora imati i proizvodni uzorak. Kod ispitivanja navarivanja membranskih zidova, uzorak mora sadržavati minimalno tri cijevi zavarene s dvije membrane, na čijoj površini je navareni sloj duljine 700 mm [3]. Primjer proizvodnog uzorka navarene cijevi prikazan je na slici 1.



Slika 1. Primjer proizvodnog uzorka navarene cijevi [3]

Ispitivanje navarenog sloja provodi se na ispitnim uzorcima koji su uzeti iz proizvodnih uzoraka.

Prvo se provodi dimenzijska kontrola svakog proizvodnog uzorka koja mora zadovoljiti da bi se nastavilo s daljnjim ispitivanjima. O samoj dimenzijskoj kontroli ne vode se bilješke u izvješću nakon provedenih ispitivanja.

Nakon dimenzijske kontrole provode se nerazorna ispitivanja navarenog sloja na istom proizvodnom uzorku.

Nerazorna ispitivanja navarenog sloja obuhvaćaju:

- detaljnu vizualnu kontrolu,
- kontrolu prskanjem bakrenim sulfatom ili ekvivalentni postupak kako bi se utvrdilo da navareni slojevi nemaju nedostataka ili diskontinuiteta.
- mjerenje debljine navarenog sloja magnetskom metodom, na liniji širine 100 mm (jedan potpuni korak između dvije cijevi) okomito na os cijevi (Mjerenje debljine navarenog sloja provodi se u više točaka, a sve točke mjerenja zapisuju se u ispitnom izvješću.)
- makrografsko ispitivanje za koje je u izvješću potrebno priložiti minimalno jednu fotografiju.

Makrografskim ispitivanjima potrebno je provesti odnosno odrediti:

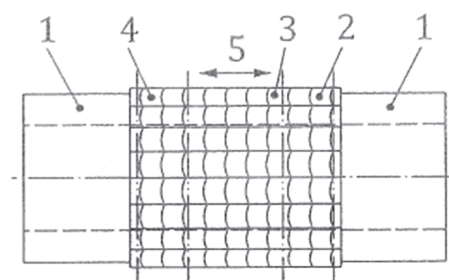
- vizualnu kontrolu navarenog sloja,
- širinu zone utjecaja topline,
- debljinu navarenog sloja,
- sadržaj Fe u površinskom navarenom sloju.

Kod makrografskih ispitivanja navarenog sloja normom su definirani kriteriji prihvatljivosti (Tablica 1.).

Tablica 1. Kriteriji prihvatljivosti makrografskih ispitivanja [3]

Makrografsko ispitivanje	
vizualna kontrola	plinski džepovi veličine iznad 1 mm nisu dopušteni
	nedostatak spajanja između navarenog sloja i cijevi nije dopušten
	mogu se prihvatiti pukotine duljine do 1,5 mm uz uvjet da ne zahvaćaju osnovni materijal
širina ZUT-a	minimalna 0,5 mm
debljina navarenog sloja	debljina u svakoj točki mora biti između 2 mm i 4 mm
	nakon ispitivanja savijanjem, minimalna debljina navarenog sloja mora biti 2 mm
	ne tolerira se nedostatak navarenog sloja u zoni navarivanja (nije dopušten nenavaren osnovni materijal)
sadržaj Fe u navarenom sloju	preostali sadržaj Fe u navarenom sloju iznosi od 2 % do 5 %
	u slučaju kada se navarivanje provodi u dva sloja, minimalni udio Fe od 2 % primjenjiv je samo za prvi sloj, a maksimalni udio Fe od 5 % je primjenjiv samo za drugi sloj
	maksimalni sadržaj Fe od 10 % tolerira se kod postupka ručnog navarivanja

Nakon provedene dimenzijske kontrole i nerazornih ispitivanja te utvrđene prihvatljivosti navarenog sloja prema zadanim kriterijima, nastavlja se ispitivanje razornim metodama. Ispitivanja razornim metodama provode se na ispitnim uzorcima koji se izrezuju iz proizvodnog uzorka prema planu definiranom normom, a na način prikazan na slici 2.



Slika 2. Područja uzimanja ispitnih uzoraka za ispitivanje navarenog sloja [3]

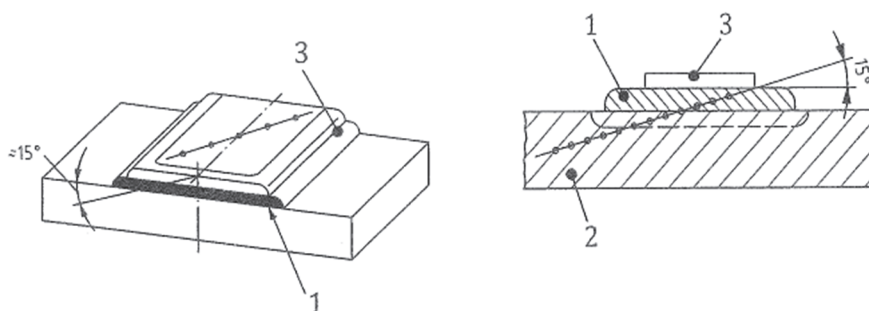
1 - odbacivanje rubnih dijelova navarenog sloja minimalne duljine 25 mm

2 i 4 - područje uzimanja ispitnih uzoraka za savijanje

3 - područje uzimanja ispitnih uzoraka za metalografsko ispitivanje i ispitivanje tvrdoće

5 - smjer navarivanja

Ispitivanje tvrdoće navarenog sloja provodi se Vickersovom metodom HV5 ili HV10. Tvrdoća se mjeri u minimalno pet točaka poprečnog presjeka navarenog uzorka kako bi se izmjerila tvrdoća navarenog sloja, zone utjecaja topline i osnovnog materijala. Na slici 3. prikazan je ispitni uzorak i označena su mjesta mjerenja tvrdoće. Prihvatljivi maksimalni iznosi tvrdoće su između 320 HV5 i 450 HV5 (ili HV10) ovisno o vrsti materijala koji se ispituje.



Slika 3. Mjesta mjerenja tvrdoće [3]  
1 - srednji navareni sloj (ako je potreban)  
2 - osnovni metal  
3 - navareni sloj

Ispitivanje na savijanje je posljednje ispitivanje koje se provodi kod ispitivanja navarenog sloja. Ovo ispitivanje provodi se na četiri ispitna uzorka. U tablici 2. navedene su mjere ispitnih uzoraka i parametri ispitivanja na savijanje.

Tablica 2. Mjere ispitnih uzoraka i parametri ispitivanja na savijanje [3]

Širina ispitnog uzorka ( $L$ )	za $D \leq 51$ mm: $L = E + D/10$ , ( $L \leq 12$ mm) za $D \geq 51$ mm: $L = E + D/20$ , ( $L \leq 12$ mm) gdje je: $E$ - debljina stjenke cijevi $D$ - vanjski promjer cijevi
Promjer trna	4 puta ukupna debljina ispitnog uzorka (debljina stjenke cijevi + debljina navarenog sloja)
Razmak između valjaka	promjer trna + 2,2 puta ukupna debljina ispitnog uzorka

Kriterij prihvatljivosti kod ispitivanja na savijanje je da je prisutnost pukotine duljine manje od 3 mm dopuštena na jednom od četiri uzorka, a ostala tri moraju biti bez pukotina.

### 3 EKSPERIMENTALNI RAD

U radu je provedeno ispitivanje navarenog sloja na membranskom zidu kotlovskih cijevi izrađenom od niskolegiranog Mo čelika 16Mo3. Ovaj čelik pripada skupini niskolegiranih Mo i Mo-Cr čelika koji radi zavarljivosti imaju nizak maseni udio ugljika (do 0,25 %). Ovi se čelici pretežno izrađuju u obliku cijevi i limova, a njihova primjena je vrlo raširena u termoenergetskim postrojenjima. Čelik 16Mo3 koristi se za izradu kotlovskih cjevovoda i za radne temperature od 460 °C do 520 °C. [4]

Za navarivanje je korištena taljiva elektroda od legure na bazi nikla, Inconel 625 čiji sastav je min. 58 %Ni; 20...23 %Cr; 8...10 %Mo; 3,15...4,15 %Nb; max. 5 %Fe uz prisustvo manjih udjela ostalih elemenata (C, Si, Mn, Cu, Ti i Co). Inconel 625 ima visoku otpornost na puzanje, otporan je na visoke temperature i korozijski postojan uključujući otpornost na rupičastu koroziju i koroziju u zazoru [5].

Postupak navarivanja proveden je CMT postupkom na uređaju Fronius CMT Transplus Synergic 5000.

Prema normi HRN EN ISO 15614-7:2019 izrađeni su uzorci za mjerenje tvrdoće (slika 4.) i ispitivanje savijanjem (slika 5.).

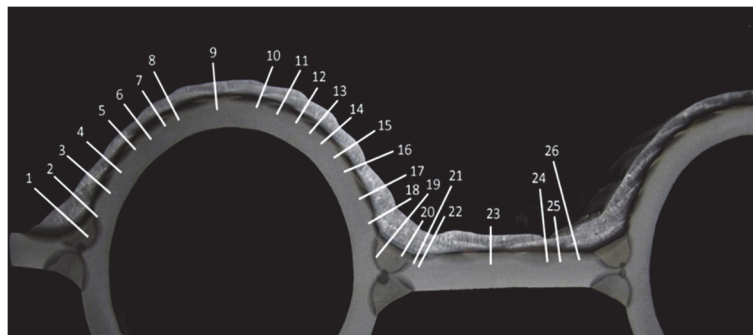


Slika 4. Ispitni uzorak za mjerenje tvrdoće



Slika 5. Ispitni uzorci za ispitivanje savijanjem

Na ispitnim uzorcima provedena je kontrola debljine navarenog sloja i debljine zone utjecaja topline. Makrosnimak ispitnog uzorka s označenim mjestima mjerenja debljine prikazan je na slici 6., a u tablici 3. navedeni su rezultati mjerenja.

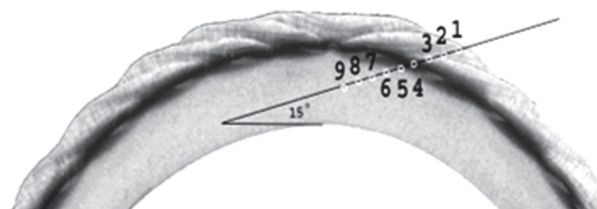


Slika 6. Makrosnimak s označenim mjestima mjerenja debljine navarenog sloja i ZUT-a

Tablica 3. Rezultati mjerenja debljine navarenog sloja i ZUT-a

Mjerno mjesto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Navar, / mm	5,10	4,82	3,78	2,65	2,84	2,26	3,01	2,82	2,86	2,67	3,15	3,00	3,11	2,41	3,03	2,50	3,48	4,58	5,60	4,72	3,97	3,44	3,01	2,32	2,45	3,11
ZUT / mm	1,04	0,86	0,97	1,52	1,02	1,23	1,07	1,12	0,98	0,96	1,10	0,97	1,11	0,99	1,02	0,88	1,03	0,68	1,07	1,20	1,12	1,05	0,96	1,34	0,92	0,87
Zahtijevane vrijednosti:													Debljina navara: min. 2 mm Debljina ZUT-a: min. 0,5 mm													

Ispitivanje tvrdoće provedeno je Vickersovom metodom HV10. U ovom slučaju kriterij prihvatljivosti je da tvrdoća mora biti ispod 380 HV10. Na slici 7. prikazan je ispitni uzorak s označenim mjestima mjerenja tvrdoće, a u tablici 4. navedeni su rezultati mjerenja.



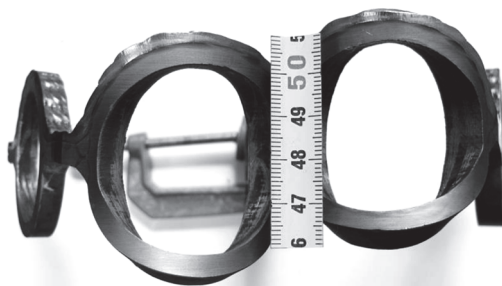
Slika 7. Mjesta mjerenja tvrdoće

Tablica 4. Rezultati mjerenja tvrdoće

Mjesto mjerenja	Navareni sloj			Zona utjecaja topline			Osnovni metal		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
HV10	264	256	265	255	228	234	189	172	181

Ispitivanje na savijanje je posljednje ispitivanje koje se provodi i nakon kojega, ako su kriteriji prihvatljivosti zadovoljeni, može započeti provedba ispitnog postupka navarivanja.

Ispitivanje je provedeno na četiri ispitna uzorka. Na slikama 8. i 9. prikazani su uzorci nakon savijanja, a rezultati ispitivanja navedeni su u tablici 5.



Slika 8. Uzorci nakon savijanja



Slika 9. Uzorci nakon savijanja

Tablica 5. Podaci i rezultati ispitivanja savijanjem

Broj uzorka	Dimenzije ispitnog uzorka / mm	Promjer trna / mm	Razmak između valjaka / mm	Kut savijanja / $\alpha^\circ$	Rezultati ispitivanja
1	10×300	40	55	180	Nema pukotina
2	10×300	40	55	180	Nema pukotina
3	10×300	40	55	180	Nema pukotina
4	10×300	40	55	180	Nema pukotina

#### 4 ZAKLJUČAK

Navarivanjem sloja Ni-legura na pojedine konstrukcijske čelike za rad pri povišenim i visokim temperaturama postiže se visoka korozivna otpornost.

CMT postupkom, koji je modificirana verzija MIG/MAG postupka, povisuje se kvaliteta navara, a ne dolazi do pada produktivnosti. Prije primjene postupka navarivanja potrebno je provesti ispitivanja navarenog sloja na proizvodnim uzorcima prema normi HRN EN ISO 15614-7:2019.

U eksperimentalnom dijelu rada provedena su ispitivanja navarenog sloja na membranskom zidu kotlovskih cijevi prema normi HRN EN ISO 15614-7:2019. Analizom rezultata ispitivanja utvrđeno je da su zadovoljeni svi kriteriji prihvatljivosti te je CMT postupkom moguće provesti navarivanje legure Inconel 625 na membranskom zidu kotlovskih cijevi izrađenima od niskolegirano čelika 16Mo3.

#### 5 LITERATURA

- [1] Filetin, T., Kovačićek, F., Indof, J. (2007). Svojstva i primjena materijala. Fakultet strojarstva i brodogradnje. Zagreb.

- [2] ASM Metals HandBook Volume 6 - Welding, Brazing, and Soldering. ASM International. (1993).
- [3] Norma HRN EN ISO 15614-7:2019, Specifikacija i kvalifikacija postupaka zavarivanja za metalne materijale -- Ispitivanje postupka zavarivanja -- 7. dio: Navarivanje (ISO 15614-7:2016; EN ISO 15614-7:2019). Hrvatski zavod za norme.
- [4] Novosel, M., Krumes, D. (1998). Posebni čelici. Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu.
- [5] ASM Speciality Handbook, Heat-Resistant Materials. ASM International. (1997).