

ZAVARIVANJE LEGURA MANAURIT 900 i INCOLOY 800H

WELDING ALLOYS MANAURIT 900 AND INCOLOY 800H

Dragutin LUŠIČIĆ¹⁾, Branko MATEŠA¹⁾, Ivan SAMARDŽIĆ²⁾

Ključne riječi: Katalitička cijev, sabirna cijev (Riser)

Key words: Catalytic tube, collective tube

Sažetak: Najznačajniju ulogu pri proizvodnji umjetnih gnojiva u tvornici umjetnih gnojiva Petrokemija d.d. Kutina, ima postrojenje za proizvodnju amonijaka. Iz tog razloga je vrlo važno omogućiti njegov nesmetani rad. U ovom radu opisan je kriterij i izbor materijala za zahtjevne uvjete rada 520 cijevi smještenih unutar peći primarnog reformera postrojenja amonijaka koje rade 24 sata na ekstremnim uvjetima visoke temperature koja se kreće u granicama 850 °C ... 950 °C. Također je opisan kriterij i izbor materijala za sabirnu cijev tzv. 'riser' koja radi pod istim uvjetima, a iz navedenih cijevi preuzima plinove i vodi ih dalje u proces sinteze amonijaka. U radu je također opisan i način zavarivanja sabirne cijevi tzv. 'risera' i nastavka, koji smjesu plinova od 68,18 % vodika (H) i 10,51 % metana (CH₄) odvodi u sekundarni reformer. Naime uslijed djelovanja visoke temperature šamotna obloga u nastavku 'risera' gubi svojstva i dolazi do pregrijavanja nastavka, a svaka daljnja eksploracija sa obzirom na karakter plinova imala bi katastrofalne posljedice. Iz tog je razloga služba Mehaničke radionice Petrokemije d.d. Kutina usvojila i ovladala tehnikom i tehnologijom zavarivanja ovakvih spojeva koji zasigurno spadaju u sam vrh zavarivačkih zahvata.

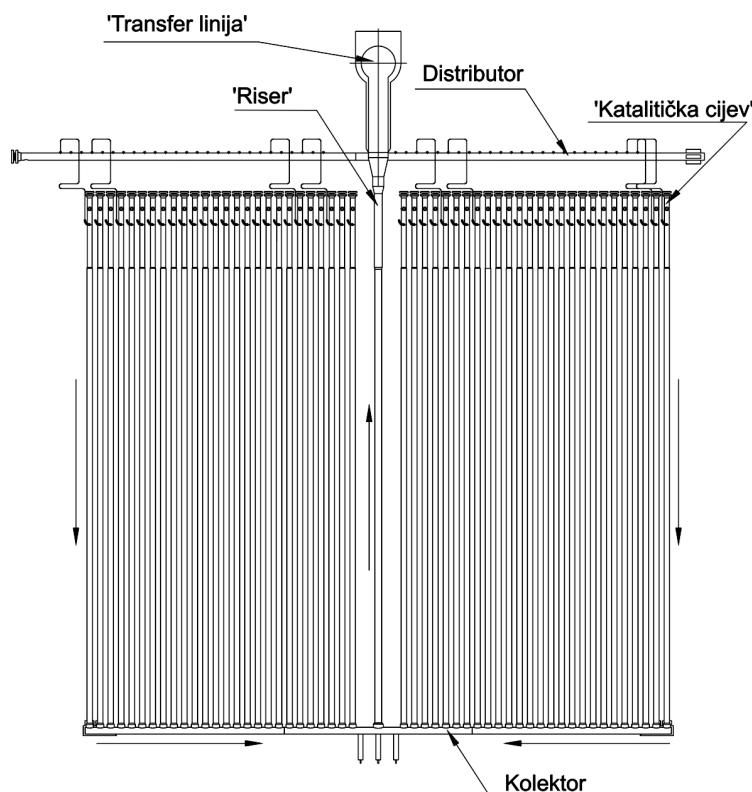
Abstract: The most important part in fertilizer manufacturing at the fertilizer factory Petrokemija d.d. in Kutina plays the plant for ammoniac production. Because of that it is really important to enable it to work unhindered. In this topic we have described the criteria and the adoption of materials for required working condition of 520 tubes located inside the primary reformer of the plant for ammoniac production, which work at extreme conditions 24 hours a day at temperatures between 850 °C ... 950 °C. We have also described the criteria and the adoption of materials for collective tube 'riser', which work at the same conditions and which collects gases from the above mentioned tubes and leads them further in to the ammoniac synthesis process. In this topic we have illustrated the welding process of the collective tube 'riser' and extension tubes, which leads a gas mixture made out of 68,18 % hydrogen (H) and 10,51 % methane (CH₄) to the secondary reformer. Due to the high temperatures the refractory bricks losses its characteristics and the extension tube is overheated, so that further usage in regard to the character of the gases would have catastrophical consequences. Therefore did the mechanical workshop Petrokemija d.d. Kutina adopt and master the technique and technology of welding this kind of joints certainly belongs to top quality of welding performances.

¹⁾ Dragutin Lušićić, ing. stroj., EWT; Dr.sc. Branko Mateša; Petrokemija d.d., P.C Održavanje, Aleja Vukovara 4, 44320 Kutina

²⁾ Prof. dr. sc Ivan Samardžić, EWE; Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Trg I. Brič-Mažuranić 2, 35000 Slavonski Brod

1. UVOD

U pripremu sirovog sinteznog plina osim kompresije prirodnog plina i zraka te odsumporavanja prirodnog plina spada također primarni i sekundarni reforming metana s vodenom parom. Za primarnu reformaciju potrebna je povišena temperatura, tako da se proces reformiranja odnosno preobrazbe odvija u peći volumena cca 4500 m^3 , gdje su na bočnim stranicama i svodu peći smješteni grijači koji razvijaju temperaturu procesnog plina od 820°C . U peći je ukupno smješteno 520 cijevi (tzv. 'katalitičke cijevi') raspoređenih u 10 redova a svaki red sadrži po 52 cijevi dimenzija $\varnothing 110 / \varnothing 85 \text{ mm}$ kako je prikazano na slici 1.



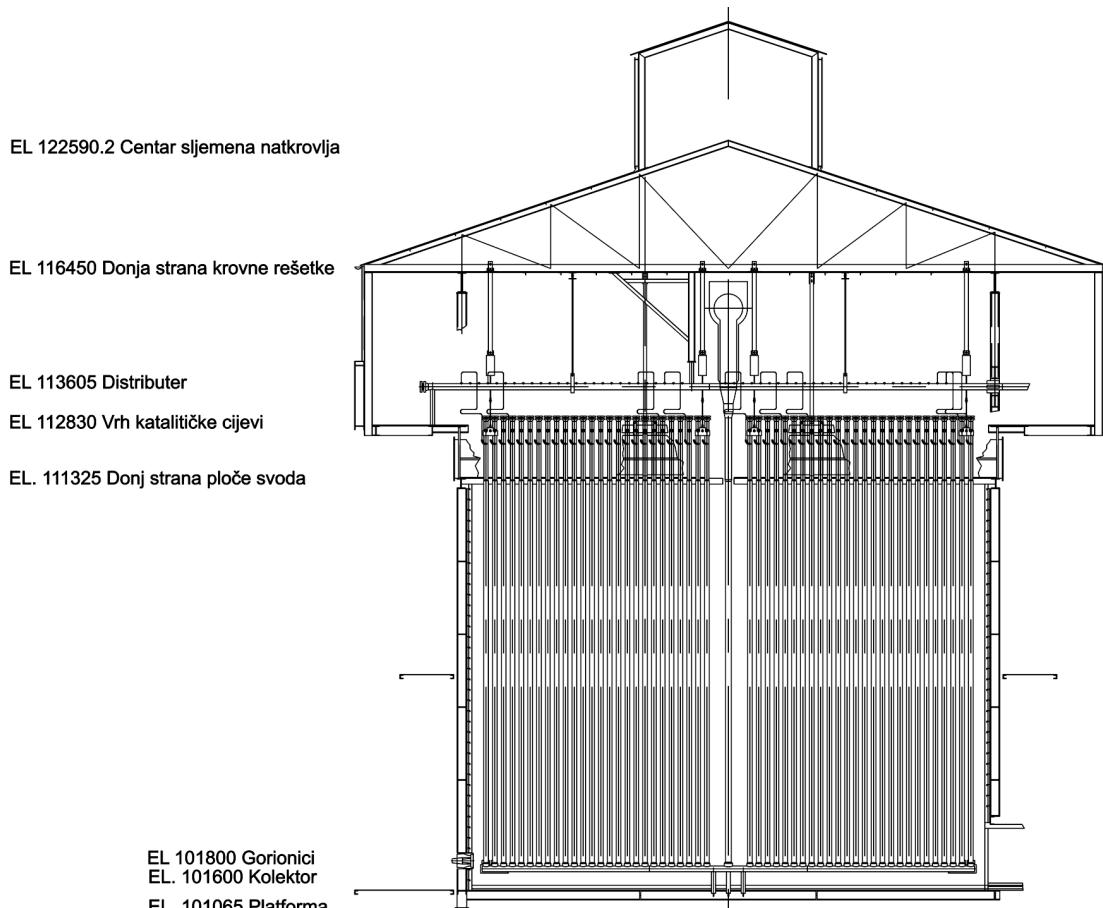
Slika 1. Registr sa 52 cijevi (strelice prikazuju smjer strujanja plina)

Pritisak na izlasku iz cijevi je 33,44 bara. Katalizator je projektiran da reformira prirodni plin dobijajući na izlazu smjesu plinova od 68,18 % vodika (H) i 10,51 % metana.[1]

Izlaznom plinu se također povisuje temperatura u srednjim cijevima dimenzija $\varnothing 141,8 / \varnothing 104,1 \text{ mm}$ tzv. 'riserima' (sabirne cijevi kroz koje plin prolazi odozdo prema gore). Vrh sabirne cijevi ili 'risera' spojen je s kolektorskim cijevi ili tzv. 'transfer linijom', gdje plin napušta radiacionu zonu, a temperatura mu se povisuje na 950°C .

Materijali upotrebljeni kod takovih radnih uvjeta svrstavaju se u grupu specijalnih materijala odnosno u ovom konkretnom slučaju radi se o vatrootpornim legurama čelika. Radni uvjeti u primarnom reformeru, ekstremno su visoki što znači da su i zahtjevi za kvalitetom materijala posebno istaknuti, te se njihovo zadovoljenje očituje u specifičnosti kemijskog sastava toga materijala i načina izrade cijevi.

Kvaliteta i istovrsna mikro- i makrostruktura čitavom dužinom cijevi su neki od kriterija za udovoljavanje maksimalnog radnog vijeka cijevi. Pouzdanost je bazirana na čistoći materijala, izostajanju plinskih uključaka te nemetalnih uključaka pri proizvodnji cijevi.



Slika 2. Bočni presjek peći sa elevacijama

U slučaju primarnog reformera ugrađene su cijevi francuskog proizvođača MANIOR INDUSTRIES oznake Manaurit 900 (MAN 900) sabirna cijev ('riser') odnosno Manaurit XM (MAN XM) 'katalitičke cijevi'. Cijevi su proizvedene centrifugalnim ljevom, a pojedini djelovi segmenata cijevi međusobno su zavarivani EBW postupkom (Electron Beam Welding) odnosno elektronskim mlazom. Navedene legure moraju zadovoljiti sljedeće uvjete :

- ne smiju biti osjetljivi na temperaturne promjene
- moraju biti otporni na okolnu atmosferu (kemijska otpornost)
- moraju imati dobra mehanička svojstva (čvrstoću, žilavost, elastičnost)
- moraju biti zavarivi i obradivi
- moraju imati što manju sklonost krtosti (puzavosti).

2. ZAHTJEVI ZA KVALITETU I POUZDANOST

Vatrootpornost legura se u principu zasniva na visokom sadržaju kroma (Cr) - iznad 20 % - koji uzrokuje stvaranje nepropusnog zaštitnog sloja, a dodatak nikla (Ni) ima poseban značaj u stvaranju i stabilizaciji austenitne strukture, tako da ove legure mogu sadržavati i do 80% nikla. Za vatrootporne legure čelika je karakteristično da sadrže između 0,45 ... 0,80 % ugljika (C); uslijed ovakog postotka sadržaja ugljika uobičajena metoda oblikovanja je statičko ili centrifugalno lijevanje legura. Niobij (Nb), titan (Ti), volfram (W) i molibden (Mo) osiguravaju postojanost čvrstoće puzanja svojim karbidima i ograničavaju brzinu ukrupnjavanja kromovih karbida za vrijeme rada na visokoj temperaturi. Silicij (Si), max 1,5 %, održava obradivost i

utječe na vatrootpornost, a mangan (Mn), do 1,5 %, povećava čvrstoću i smanjuje nepovoljno djelovanje sumpora tvoreći MnS te potiče i stabilizira stvaranje austenita. [2] Navedeni podaci u tablici 1. prikazuju mehanička svojstva, a tablica 2. prikazuje kemijsku analizu legure Manaurit 900. Upotreba legure: Sabirna cijev 'riser' i kolektor.

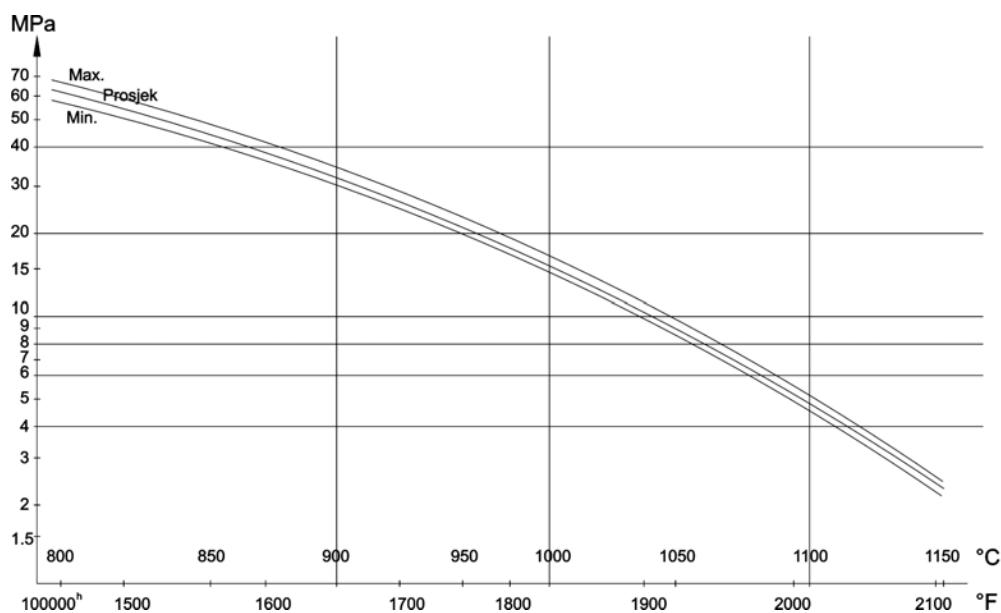
Tablica 1. Granica razvlačenja i istezljivost legure MAN 900 [3]

Veličina	Vrijednost	Dimenzija
Granica razvlačenja	>= 186	MPa
Istezljivost	>= 30	%

Tablica 2. Kemijski sastav legure MAN 900 [3]

Element	Minimum	Maximum
C	0.01	0.18
Mn	-	1.50
Si	0.05	1.25
P	-	0.03
S	-	0.03
Ni	30.0	35.0
Cr	19.0	23.0
Mo	-	0.50
Nb	0.80	1.20
Cu	-	0.25
Sn	-	0.01
Pb	-	0.01

Kao što je navedeno ovakve legure moraju imati što manju sklonost puzanju. Puzanje je svojstvo materijala da se pod dugotrajnim utjecajem naprezanja na povišenim temperaturama $T > 0,4xT_t$ (T_t temperatura taljenja) neprekidno plastično deformira. Rezultat puzanja kod cijevi je povećanje promjera što za sobom povlači stanjenje debljine stjenke uz mikrostrukturalne promjene koje zasigurno dovode do loma. Naprezanja uslijed puzanja materijala cijevi proizvode oštećenja u trenutku kada se čvrstoća puzanja legure više ne može oduprijeti opterećenju uslijed puzanja.



Slika 3. dijagram lomne čvrstoće puzanja u 100 000 sati rada za MAN XM [3]

Uobičajena pojava kod primjene vatrootpornih legura koje se koriste u okruženju povišenih temperatura. Istovremeno nauglijčavanje i oksidacija konstrukcija rezultiraju pojmom tzv. 'zelenog truljenja', ovaj oblik oštećenja materijala rezultira iz participacije kroma u obliku kromovih karbida i oksidacije (ispražnjavajem kroma iz matice prvenstveno stvarajući kromove karbide). Ova dva procesa zajedno uzrokuju neuobičajene promjene volumena koji rezultiraju vrlo visokim unutarnjim naprezanjima, a što se superponira gubitkom metala uslijed korozije – erozije, odnosno sa krhkošću zbog primanja ugljika i stvaranje karbida. Korozija – erozija rezultiraju smanjenjem nosive debljine stjenke, dok stvaranje karbida rezultira padom istezljivosti i sklonošću krtom lomu. Visoko nauglijčavanje može onemogućiti popravak zavarivanjem. Toplinska naprezanja izazvana karbonizacijom mogu se razviti i u metalu zavara i evidentirati kao pukotine uslijed puzanja u karboniziranom metalu zavara protežući se sve do nekarboniziranog osnovnog materijala.[2]

Upotreba Incoloy legura nastavak sabirne cijevi ili 'risera'. Legura koja nosi oznaku Incoloy 800H upotrebljava se:

- za kemijsku i petrokemijsku procesnu opremu
- za toplinske procesne instalacije
- za energetska postrojenja
- za proizvodnju čelika.

Incoloy 800H upotrebljava se temperature iznad 590 °C odnosno gdje se zahtjeva otpornost na puzanje i čvrstoća pri povišenim temperaturama.[4]

Tablica 3. Tipični kemijski sastav Incoloy legura.[4]

	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Ti	Al	Ti+Al	Cu
Incoloy 800H	0,08	1,00	0,02	0,01	0,35	21,0	32,0	0,40	0,40	-	0,30

Legura Incoloy 800H ima vrhunsku čvrstoću puzanja i prekidnu čvrstoću na visokom temperaturama, a svojsva su prikazana u tablici 4. [5]

Izrazite karakteristike Incoloy 800H je visoka čvrstoća puzanja i prekidnoj čvrstoći. U tablici 5. prikazane su čvrstoće puzanja za leguru Incoloy 800H na povišenim temperaturama.

Tablica 4. Mehanička svojstva za Incoloy 800H [5]

°C	R _{p 0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A ₅ [%]
21	200	531	52
93	161	490	53
316	131	459	53
427	125	454	53
538	114	438	51
649	102	384	50
780	99	223	70
871	80	128	120
982	61	70	120

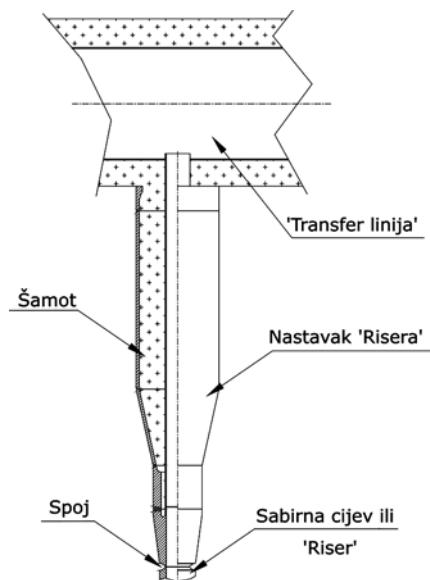
Tablica 5. Vrijednosti prekidne čvrstoće na povišenim temperaturama u ovisnosti o satima rada za legure Incoloy 800H [5]

Sati	10000	30000	50000	100000
°C	MPa			
650	121	103	97	55
705	76	66	61	37
760	50	43	40	26
815	36	30	28	17
870	24	21	19	8.3
925	13	11	10	5.5
980	8,3	6,9	6,2	90

3. EKSPERIMENTALNI DIO

3.1. Zavarivanje

Spoj navedenih dvaju legura je najznačajniji a također i najzahtjevniji spoj od ukupno 2170 zavarenih spojeva na cijevima smještenih unutar primarnog reformera. Spoj znači nastavak sabirne cijevi tzv. 'risera' koji uvodi prethodno opisanu smjesu plinova u sekundarni reformer.



Slika 4. Spoj sabirne cijevi sa nastavkom 'risera' i ulaz 'risera' u 'transfer liniju'

Usljed djelovanja vrlo visokih temperatura, koje se kreću u području 850 °C ... 950 °C, šamotni dio tijekom eksploatacije (više od 20 godina) gubi svojstva, što se u svim slučajevima do sada događalo u području konusnog dijela nastavka (uočava se promjena boje konusa). Daljnja ekspolatacija u opisanom stanju predstavlja rizik odnosno mogućnost pregaranja materijala na navedenom mjestu, a time i ekspanzije smjese plinova u okolnu atmosferu. U smjesi plinova nalazi se 68 % vodika čija bi ekspanzija u okolnu atmosferu imala za rezultat katastrofalne posljedice.

3.2. Izbor postupka zavarivanja

S obzirom da se radi o montažnom zavaru za koje se u pravilu i koriste postupci zavarivanja:

- TIG kao postupak zavarivanja korijenskog zavara
- REL kao postupak zavarivanja popune

Na mjestima gdje se zahtjeva visoko kvalitetni zavareni spoj i potpuna penetracija korijenskog spoja koristi se TIG postupak. Sam postupak spada u red najčišćih postupaka zavarivanja jer nema okolnog prskanja kapljica, jednostavnije je pratiti sam proces zavarivanja s obzirom da je talina čista i ne stvara veliku količinu troske, čime se lakše uočavaju eventualne greške; postupak pruža mogućnost prekida luka sa vrlo kvalitetnim nastavcima zavarivanja (što kod elektrode može izazvati greške). Ono što ovaj postupak čini složenim pri montažnom zavarivanju na cijevima je zahtijevana sekundarna zaštita lica korijena zavara za koju se obično primjenjuje plin argon (Ar). Složenost se očituje u izradi komora ili pregrada u cijevima kao što prikazuje slika 5. i dovodu zaštitnog plina u takove komore.

Kada se radi o manjim promjerima cijevi (promjer cijevi 161 mm), u uskom prostoru kao što je slučaj u zavarivanju navedenog spoja, REL postupak je nezamjenjiv. Masa nataljenog materijala s obzirom na debljinu stjenke cijevi i promjera elektrode je također zadovoljavajuća. Odgovarajuća tehnika zavarivanja bitna je za izvođenje kvalitetnog zavara. Održavanje što kraćeg luka sprečava stvaranje poroznosti. Pri prekidanju luka kratko zadržavanje na jednom mjestu zapuniti će završni krater i spriječiti nastanak pukotina u krateru. Prekidna mjesta moraju se prebrusiti i pretaliti kako bi se uklonile eventualne pukotine i poroznosti.



Slika 5. Izrada pregradne komore u cijevi na objektu

3.3. Izbor dodatnog materijala

Netočna su razmišljanja da pri zavarivanju visokolegirnih materijala treba upotrebiti onaj dodatni materijal sa približno istim kemijskim sastavom kao osnovni, jer u tom slučaju metal zvara može imati manju čvrstoću nego osnovni materijal.[2]

Razlika u čvrstoći loma povećava se s porastom temperature, pa se izbor dodatnog materijala i bazira upravo na radnoj temperaturi legure. Pri izboru dodatnog materijala za zavarivanje navedenih legura treba odabrati onaj koji je:

- otporan na rupičastu koroziju
- otporan na naponsku koroziju u klornom okruženju
- otporan na oksidaciju pri visokim temperaturama.

3.3.1. Dodatni materijal za TIG postupak

Navedeni podaci u tablici 6. prikazuju mehanička svojstva šipke za zavarivanje korijenskog zavara francuskog proizvođača dodatnog materijala Metrode, a šipka nosi oznaku Metrode 62 - 50 standardizirane prema normi AWS ER NiCrMo – 3.

Tablica 6. Mehanička svojstva šipke Metrode 62 – 50. [2]

Veličina	Vrijednost	Dimenzija
Granica razvlačenja	750	N/mm
Ispitno naprezanja	500	N/mm ²
Istezljivost	38	%

U tablici 7. nalaze se podaci kemijskog sastava šipke za TIG postupak zavarivanja Metrode 62 – 50

Tablica 7. Kemijski sastav šipke Metrode 62 – 50. [2]

C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	Nb	Cu	Al	Ti	Fe
0.014	0.10	0.06	0.002	0.002	22.2	64.0	9.2	3.65	0.01	0.06	0.20	0.47

3.3.3. Dodatni materijal za REL postupak

Navedeni podaci u *tablici 8.* prikazuju mehanička svojstva elektrode za zavarivanje popune zavara francuskog proizvođača dodatnog materijala Metrode, a elektroda nosi oznaku Metrode Nimrod 625KS standardizirane prema normi AWS E NiCrMo - 3.

Tablica 8. Mehanička svojstva elektrode Metrode Nimrod 625KS. [2]

Veličina	Vrijednost	Dimenzija
Granica razvlačenja	>800	N/mm ²
Ispitno naprezanja	500	N/mm ²
Istezljivost	40	%

U tablici 9. nalaze se podaci kemijskog sastava elektrode za REL postupak zavarivanja Metrode Nimrod 625KS.

Tablica 9. Kemijski sastav elektrode Metrode Nimrod 625KS. [2]

C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Nb	Fe	Mo	Cu
0.014	0.54	0.29	0.008	0.003	21.8	63.7	3.28	0.90	09.3	0.01

3.3.4. Obuka zavarivača

U skladu sa zavarivačkim specifikacijama kao ASME i AWS zavarivači prije atestiranja moraju proći obuku. Obuka zavarivača je ključna za atestiranje, a cilj joj je osigurati kvalitetnu izvedbu zavara na navedenom spoju. Opsežna vježba i vrijeme treninga omogućeno je za zavarivače koji nisu imali iskustva sa zavarivanjem niklovinih legura. Kod mnogih kvalificiranih zavarivača, koji su ranije imali iskustva sa zavarivanjem kemijski postojanih čelika tipa AISI 316L ili AISI 304L pri zavarivanju navedenih legura pojavile su se poteškoće pogotovo pri zavarivanju korijenskog zavara. Poteškoće su se pojavile iz razloga što je talina rastopljenog dodatnog materijala niklovinih legura inertna. Inertnost se može jedino opravdati iz širine zone između likvidusa i solidusa odnosno taline i krutnine pa se talina čini 'gušćom'. Iz tog se razloga pištolja TIG postupka može voditi sporije, jer dužim zadržavanjem na jednom mjestu talina postaje 'žitkija' (više nego kod kromovih materijala), i tada jednostavno 'propadne' kroz žlijeb zavara. To proizlazi iz činjenice da je atomska masa nikla (Ni) 58.693 A_r veća od atomske mase krom (Cr) 51.996 A_r.

Za vrijeme zavarivanja žica se 'ukapava', to znači da se žica zadržava u plazmi luka dok se s nje ne odvoji samo jedna kapljica. Žicu je po mogućnosti bolje dodavati kroz žlijeb nego paralelno sa ivicom stjenke cijevi. U tom slučaju talini je otežano da 'propadne' kroz žlijeb, a smanjena je i mogućnost da komadići žice ostanu zarobljeni u metalu zavara korijena. Kada steknu rutinu i savladaju specifične elemente koji su svojstveni za leguru u odnosu na kemijski postojane materijale kao i ograničenja u pristupačnosti spoja mogu pouzdano i produktivno izvoditi kvalitetne zavare.

3.4. Žljebovi za zavarivanje

Da bi se ispunili zahtjevi vezani za kvalitetu zavarenog spoja, priprema za zavarivanje i oblik žlijeba spoja su od presudne važnost. Sama konstrukcija žlijeba ovisi o niz faktora kao:

- vrsta opterećenja,
- debljina materijala,
- položaj zavarivanja i
- radni uvjeti zavara.

Oblik i dimenzije pripremljenog žlijeba trebaju biti takovi da zadovoljavaju nosivost a ujedno da presjek zavara bude minimalan zbog što manjih utroška dodatnog materijala, što u slučaju zavarivanja spoja Incoloy 800H i MAN 900 obzirom na cijenu dodatnog materijala i nije mala stavka. Na troškove također utječe način izrade pripreme zavara odnosno izrađuje li se priprema ručno (brušenjem) ili strojnom obradom. Oblik profila pripreme je kriterij koji nadalje povisuje troškove, što su profili pripreme zahtjevniji time je složenija izrada. Masa nataljenog dodatnog materijala računa se prema formuli:

$$K_d = \left(A \cdot \frac{d}{2} \cdot \pi \cdot \rho \right) \cdot 1.25, \text{ kg}$$

gdje je :

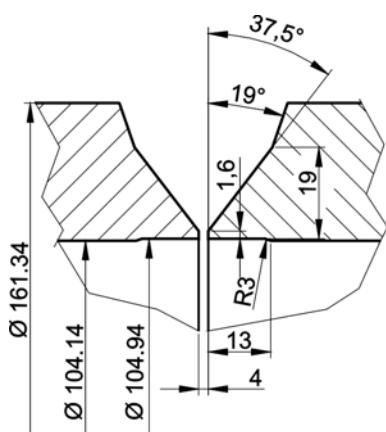
K_d - masa nataljenog depozita, kg

d - cijevi, m

A - površina presjeka zavara, m^2

ρ - specifična masa, kg/m^3

Iskustveno se dobiveni ukupni iznos povećava za 25 % to proizlazi iz potrebe za nadvišenjem zavara, a također u težini pakovanja dodatnog materijala pogotovo kada se radi o REL postupku ulazi i težina obloge. Stoga da bi se dobila potrebna masa čistog materijala koji će ispuniti spoj mora se uzeti u obzir i težina obloge elektrode.



Slika 6. Detalj pripreme za zavarivanje spoja Incoloy 800H i MAN 900



Slika 7. Strojna priprema za zavarivanje na objektu

Složeniji oblici profila, ukoliko to dozvoljavaju mogućnosti, najkvalitetnije i najbrže se izrađuju strojnom obradom. Da bi se strojna obrada mogla izvršiti na objektima potrebno je u tu svrhu posjedovati odgovarajuću opremu poput zračne tokarilice kako je prikazano na slici 7.

Strojna priprema za zavarivanje obavljena je na tokarskim strojevima prema priloženoj dokumentaciji u svrhu atestiranja postupka zavarivanja.

3.5. Parametri zavarivanja

Parametri zavarivanja koji u najvećoj mjeri utječu na kvalitetu zavarivanja su : jakost struje zavarivanja (A), napon električnog luka (V) i brzina zavarivanja. Veličine jakosti struje zavarivanja, a ujedno i napona električnog luka ovise o vrsti osnovnog materijala, debljini osnovnog materijala, položaju u kojem se izvodi zavareni spoj, obliku spoja kao i o dimenzijama odnosno promjeru dodatnog materijala. Kod zavarivanja u prinudnim položajima kao: vertikalnom, nadglavnom i zidnom položaju struje zavarivanja trebaju biti manje nego u vodoravnom položaju. Jedan od važnijih parametara koji u nekim slučajevima znatno utječe na kvalitetu zavarenog spoja je unos topline. Unos topline je u zavarivanju vatrootpornih legura Incoloy 800H i MAN 900 bitan tim više što preveliki unos topline može dovesti do pojave toplih pukotina u samom metalu zavara a također i u prelaznoj zoni tj. ZUT-u. Upravo iz tog razloga u specifikaciji zavarivanja je definirana međuslojna temperatura od 150 °C. Unesena količina topline računa se prema izrazu:

$$E_{\text{ef}} = \frac{U \cdot I \cdot \eta_l}{v}, \text{ J/mm}$$

gdje je :

U - napon električnog luka, V

I - jakost struje zavarivanja, A

η_l - koeficijent iskoristivosti energije el. luka

v - brzina zavarivanja, mm/sek

Električne karakteristike navedene su u tablici 10.:

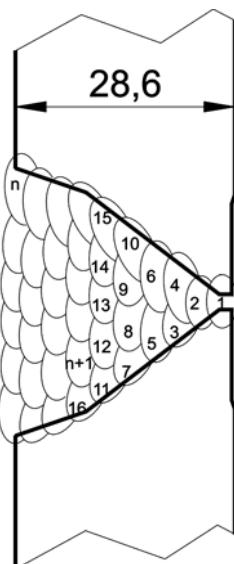
Tablica 10. Prikaz električnih karakteristika struja [7]

Postupak	Polaritet	Vrsta struje	Dodatni mat. Ø	Jakost (A)		Napon (V)	
				min	max	min	max
TIG	—	=	2.4	75	78	9	11
REL	+	=	3.25; 4	75	98	19	26

3.6. Redoslijed polaganja slojeva

Za izvedbu kvalitetnog zavara na legurama potreban je što manji toplinski input kao što je prethodno navedeno, također od velikog značaja je i čistoća samog spoja. Spoj prije zavarivanja ne smije imati nikakove nečistoće u tom cilju se preporučuje poliranje površine zavara do metalnog sjaja pločama za poliranja dimenzija Ø115 mm. Također se preporučuje čišćenje okolne zone spoja u širini do 20 mm brušenjem ili poliranjem, nakon toga se otapalima kao što je aceton spoj temeljito 'opere'. Postupak zavarivanja prema ASME normi odvijao se u položaju 2G što znači da je zavar bio u tzv. 'zidnom položaju'. Na spiju su načinjene pregrade od klingerita s time što je gornja pregrada imala provrt Ø10 mm za prolaz cjevčice kroz koju se dozirao argon dok je donja pregrada bila 'slijepa' (bez otvora). Distance su izrađene iz korozionski

postojanog čelika AISI type 316L promjera $\varnothing 17$ mm i debljine 5 mm, iste su TIG postupkom, žicom kvalitete za provar korijena, pripojno zavarene u žlijebu zavara. Distance su 'držale' razmak provara uzorka od 4 mm. Broj prolaza zavara prikazan je na slici 8., broj prolaza je kod zavarivača bio različit što je ovisilo o brzini vođenja elektrode, brušenju pojedinih slojeva prije početka slijedećeg sloja itd.



Slika 8. Redoslijed polaganja slojeva

Redoslijed polaganja slojeva:

- 1., 2., 3., 4. prolaz TIG postupak,
- završetkom 4. prolaza zatvoren je ulaz argona u komoru,
- od 5 ... 15. prolaza REL postupak elektroda $\varnothing 3,25$,
- od 16. ... $n+1$ prolaza REL postupak elektroda $\varnothing 4$ i
- $n+1$... n slojevi REL postupkom elektroda $\varnothing 3,25$.

3.7. Ispitivanja

Sva ispitivanja na objektu obavljena su: vizualnom, pentrantskom i radiografskom kontrolom. Dok su ispitivanja vezana za atestiranje postupka zavarivanja PQR obavljena prema ASME sec IX normi, a ista se odnose na atestaciju zavarivača, zavarivača operatera i klasifikaciju postupka zavarivanja. Gdje je na osnovu debljine utvrđeno da se trebaju ispitati

- 2 epruvete vlačne čvrstoće
- 4 epruvete bočnih savijanja
- 1 epruveta makro izbrusak.

3.7.1. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće

Ispitivanja za navedeni spoj izvršena su prema specifikaciji ASME sec IX QW – 150 [6] odnosno ispitivanja vlačne čvrstoće, koja su dala rezultate prikazane u tablici 11.

Iz rezultata je vidljivo da su se prelomi na oba uzorka događali u području lijevane legure, što je bilo i za očekivati. Struktura lijevanja je dosta gruba a isto se moglo primijetiti i vizualnim pregledom preloma bez povećanja. Sile loma su zadovoljavale zahtijevane rezultate. Povećanjem slike 9. može se uočiti gruba struktura lijevanje strukture na mjestu loma.

Tablica 11. Rezultati ispitivanja čvrstoće [7]

Uzorak	Širina mm	Debljina mm	Početni presjek mm ²	Maksimalna sila N	Čvrstoća N/mm ²	Tip i položaj loma
Č1	19.56	23.10	452	270000	597	ZUT/OM MAN900
Č2	19.52	22.70	452	270000	587	OM MAN 900

Iz rezultata je vidljivo da su se prelomi na oba uzorka događali u području lijevane legure, što je bilo i za očekivati. Struktura lijevanja je dosta gruba a isto se moglo primijetiti i vizualnim pregledom preloma bez povećanja. Sile loma su zadovoljavale zahtijevane rezultate. Povećanjem slike 9. može se uočiti gruba struktura lijevane strukture na mjestu loma.

Na bočnoj strani iste epruvete uočava se u predjelu loma nagla kontrakcija materijala MAN 900 koja ide u prilog smanjene žilavosti slika 10., dok je u predjelu Incoloy 800H kontrakcija zadovoljavajuća.



Slika 9. Prelov na epruveti označe Č2



Slika 10. Kontrakcija loma legure MAN 900 i Incoloy 800H

3.7.2. Rezultati ispitivanja bočnim savijanjem

Ispitivanja za navedeni spoj izvršena su prema specifikaciji QW - 160 [6] odnosno ispitivanja savijanja koja su dala rezultate prikazane u tablici 12.

Tablica 12. Rezultati ispitivanja bočnim savijanjem [7]

Vrsta i oznaka uzorka	Rezultat ispitivanja
BS1 (strana savijanja)	180°
BS2 (strana savijanja)	180°
BS3 (strana savijanja)	180°
BS4 (strana savijanja)	180°

Na epruvetama nakon ispitivanja bočnog savijanja nisu uočeni nikakvi počeci preloma na zavaru ili u prelaznoj zoni ZUT-a što se uočava i na slici 11.

3.7.2. Makro izbrusak

Da bi se istaknula prijelazna zona i uočile greške kao uključine i neprotaljivost uzorak je više puta nagrizan smjesom dušične i solne kiseline. Na slici 12. se također uočava i tamnija zona u zavaru neposredno uz ZUT gdje je došlo do miješanja dodatnog materijala koji se sastoji od skoro 65 % Ni i osnovnog materijala sa jedne strane Incoloy 800H, a s druge strane MAN 900. Uočava se također dosta veliko polje svjetlige boje na sredini zavara koje ide u prilog

čistom dodatnom materijalu bez miješanja. Na slici 12. je također vidljiva gruba ljevačka struktura legure MAN 900 s desne strane dok je s lijeve strane sitno zrnata struktura otkivka Incoloy 800 H.



Slika 11. Epruvete bočnog savijanja



Slika 12. Makro izbrusak zavara Incoloy 800H i MAN 900

4. ZAKLJUČAK

S obzirom na zahtjevne uvjete rada (povišene temperature koja se kreće u vrijednostima 850 ... 950 °C) cijevi unutar promatranog reprezentanta tj. peći primarnog reformera, odabir materijala za njihovu izradbu je od vitalnog značaja za nesmetani proces proizvodnje amonijaka, a također i za sigurnost ljudi i okoline. Proračunati životni vijek legura Manaurit 900, Manaurit XM te Incoloy 800H (koji radi na nešto blažim uvjetima) je cca 100 000 sati. Prethodne cijevi koje su bile izrađene iz legure (HK 40), materijala sličnog kemijskog sastava i mehaničkih svojstava, zamijenjene su nakon 10 godina odnosno cca 87000 sati eksploatacije. Što bi značilo da je životni vijek cijevi izrađenih od legura Manaurit 900 i Manaurit XM produžen za cca 13000 sati, uz zahtijevana ispitivanja u toku redovnih zastoja pogona. Uz pravilan odabir dodatnog materijala koji se bazira na dodatnom materijalu koji je otporan na oksidaciju pri visokim temperaturama, rupičastu koroziju, naponsku koroziju, te koji je predviđen za rad na povišenim temperaturama, može se uz posebnu tehnološku disciplinu izvesti zavar zadovoljavajuće kvalitete.

Najveću opasnost pri zavarivanju predstavlja pojava toplih pukotina u zoni utjecaja topline te samom metalu zavara, kao i izlučivanje karbida po granicama zrna u ZUT-u što bi imalo za posljedicu smanjene korozijske postojanosti i smanjenja mehaničkih svojstava. Da bi se ovakve pojave izbjegle prilikom pripreme zavara kao i pri samom zavarivanju, potrebno je pridržavati se određene tehnološke discipline koja se očituje u čistoci pripreme zavara, potrebnom zazoru za provar zavara, kao i što manjem toplinskom inputu odnosno praćenju temperature međuprolaza koja ne bi smjela prelaziti 150 °C.

5. LITERATURA

- [1] Kellog Continental: *Amonia plant specification*. Zaandam, Netherland, 1978.
- [2] Mateša, Branko: *Problematika eksploatacije katalitičkih cijevi procesnih peći*. Sisak, Zbornik radova 'Materijali i zavarivanje u naftnoj i petrokemiskoj industriji', 1992, str. 243 – 257.
- [3] Mateša, Branko: *Projektiranja, proizvodnja, ispitivanje i ugradnja cijevi iz visokotemperaturno koroziski postojanih legura namjenjenih za rad u procesnim pećima*. Opatija, Zbornik radova 'Spajanje koroziski postojanih materijala', 2003, str. 241 – 254.
- [4] Sandmeyer steel company: *Nickel – iron – chromium designed to resist oksidacion and carburization*. www.sandmeyersteel.com.
- [5] Special metals: *Incoloy alloy 800H and 800HT*. www.specialmetals.com.
- [6] Norma: *Welding and brazing qualification*. ASME sekacija IX 1995.
- [7] Atesti postupka: Dokumentacija odjela Tehnološke pripreme rad.