



## **PRIMJENA ROBOTA U NAVARIVANJU PANELA CIJEVNIH ZIDOVA I SABIRNIKA**

### **ROBOTS APPLICATION FOR MEMBRANE PANELS CLADDING AND COLLECTORS**

**Vedran RAJKOVIĆ, Božo DESPOTOVIĆ, Tihomir MARSENIĆ, Vladimir MAGDALENIĆ**<sup>1)</sup>

**Ključne riječi:** robotizirano navarivanje, Inconel 625, membranski cijevni zid

**Key words:** robotics cladding, Inconel 625, membrane tube wall

**Sažetak:** U radu se opisuje proces navarivanja panela membranskih cijevnih zidova korištenjem dva robota u paralelnom radu. Navarivanje se izvodi žicom oznake 625 čija je osnova Ni. Kao zaštitni plin koristi se specijalni 4-komponentni plin sastava: Ar+He+CO<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>. Navarivanje se izvodi u horizontalnom položaju primjenom specijalnog rotirajućeg radnog stola, a tijekom navarivanja kroz cijevi panela struji voda za održavanje konstantne temperature na mjestu navarivanja. Proces navarivanja je kontinuiran da proces vode specijalno educirani operateri i poslužioi.

**Abstract:** The paper describes the cladding process of membrane panels tube walls using two robots work in parallel. Filler metal for cladding is wire tags 625 which is based on Ni. As protective gas is used a special 4-component gas composition: Ar + He + CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>. Cladding is performed in a horizontal position using a special rotating work table while during cladding through panel pipes water flows to maintain constant temperature at the cladding place. Cladding process is a continuous process which is leading by specially trained operators and servants.

---

<sup>1)</sup> Austrian Energy & Enviroment, Đuro Đaković Termoenergetska postrojenja d.o.o., Slavonski Brod, vedran.rajkovic@aee-dd.hr



## 1. UVOD

Zbog velikog porasta broja stanovništva u svijetu pojavljuje se problem sve veće potrošnje električne energije bez koje je današnji život gotovo nezamisliv. Porast stanovništva nosi sa sobom još jedan problem, a to je gomilanje velikih količina kućnog otpada. Rješenje navedenih problema se vidi u tome da se kućni otpad koristi kao gorivo u termoenergetskim postrojenjima. Tako bi se spaljivanjem otpada oslobađala energija koja bi služila za dobivanje pregrijane pare u termoenergetskim postrojenjima putem koje se proizvodi električna energija, dok bi se otpadna toplina koristila za grijanje.

No za graditelje kotlova tu nastaju značajni problemi. Pošto se pri loženju kućnog otpada oslobađaju agresivni plinovi nepoznatog – vrlo kompleksnog kemijskog sastava ( $H_2SO_4$ ,  $CO$ ,  $HCl$ ), dolazi do ozbiljnog oštećenja kotlovskih cijevi, a samim tim i smanjenja vijeka trajanja kotlovskog postrojenja.

Kao moguća rješenja nameću se zaštita kotlovskih cijevi raznim metodama kao što su: oblaganje, naštrecavanje, kompozitne cijevi, navarivanje i dr.

Postupak ručnog navarivanja je do sada egzistirao u tvornici ĐĐ Termoenergetska postrojenja, ali zbog sve veće potražnje kotlovskih postrojenja koja se lože na kućni otpad uveden je proces navarivanja automatiziranim procesima.

## 2. IZBOR VARIJANTE PROCESA

Do sada se u praksi, s obzirom na položaj navarivanja, primjenjuju dvije varijante pri navarivanju membranskih panela i to:

- horizontalni i
- vertikalni.

Svaki od njih ima svoje prednosti i nedostatke.

Prednosti procesa navarivanja panela u vertikalnom položaju:

- jednostavnija konstrukcija cijelog sustava,
- manja cijena opreme (korištenje automata),
- jednostavnije vođenje procesa.

Nedostaci procesa navarivanja panela u vertikalnom položaju:

- rad operatera na visini zbog praćenja procesa,
- nemogućnost potpune automatizacije procesa.

Prednosti procesa navarivanja membranskih panela u horizontalnom položaju:

- mogućnost potpune automatizacije procesa,
- izbjegnut je rad operatera na visini.

Nedostaci procesa navarivanja panela u horizontalnom položaju:

- veća cijena opreme (robot je znatno skuplji od automata),
- vrlo kompleksna i skupa konstrukcija na koju se pričvršćuje panel za navarivanje,
- potrebno je školovano osoblje koje mora biti sposobno programirati (voditi) proces.

Nakon razmjene iskustava s proizvođačima koji vrše navarivanje panela u oba položaja i s obje vrste tehnologije ĐĐ TEP se odlučio za kupnju varijante koja vrši navarivanje u horizontalnom položaju. Razlozi prvenstveno leže u mogućnosti potpune automatizacije, ali i izbjegavanja rada operatera na visini.

### 3. RAZVIJANJE KONCEPCIJE, ODABIR TIPA OPREME

Pri definiranju projektnog zadatka proces navarivanja je osmišljen tako da dva robota na jednoj pruži istodobno navaruju svaki svoju polovicu membranskog panela cijevnog zida. Uz pomoć stola koji ima mogućnost zakretanja  $\pm 45^\circ$  dovodi se panel u idealan položaj za navarivanje (položaj gorionika okomit na površinu panela). Pošto se duljina panela za navarivanje kreće najčešće između 6000 i 12000 mm definiran je sustav za navarivanje panela duljine do 12000 mm.

Kompletna linija za robotsko navarivanje membranskih panela se sastoji od:

- 2 robota s uzdužnom prugom,
- okretnog stola (nosivog i izmjenjivog),
- pozicionera (pogonskog i gonjenog),
- rashladnog sustava,
- linije za opskrbu 4-komponentnim zaštitnim plinom,
- izvora za zavarivanje.

Za dobavljača i proizvođača robotske linije odabrana je renomirana tvrtka iz Njemačke kao jedna od iskusnijih na području robotiziranog zavarivanja. Robotska linija je sastavljena od dva robota tipa RV30-16, koji se kreću na podnoj uzdužnoj pruži tipa RLV25 (slika 1.). Roboti su 6-osne koncepcije, s maksimalnom nosivošću na vrhu ruke od 16 kg, ponovljivosti  $\pm 0,08$  mm, te dohvatnim radijusom od 2100 mm. Duljina uzdužne pruge iznosi 14000 mm, nosivosti 2500 kg.

Na robotskoj platformi se nalaze specijalni dodavači tip TR300/1 namjenjeni za opskrbu gorionika s velikih kolutova žice mase 300 kg, jer proces robotskog navarivanja radi u tri smjene tj. u 24 satnom ciklusu (slika 1.).

Kao veliki konstrukcijski problem pokazao se okretni stol. Stol se sastoji od dva dijela, donjeg nosivog i gornjeg izmjenjivog dijela, kako bi se u što kraćem vremenskom roku novi membranski panel mogao pripremiti za navarivanje. Zbog maksimalnih dimenzija izratka tj. membranskog panela od  $12000 \times 1280$  mm izrađen je stol duljine 13000 mm, širine 1610 mm i visine 1085 mm (slika 1). Problem konstrukcije stola je njegova krutost, što zbog duljine stola i njegove mase, što zbog deformacija prilikom navarivanja. Radi sprječavanja progiba stola izrađena je konstrukcija u zavarenoj izvedbi ukupne mase (donji nosivi + gornji izmjenjivi stol) od 18000kg. Stol je idejno rješenje i izrada od strane korisnika, ĐĐ TEP-a.

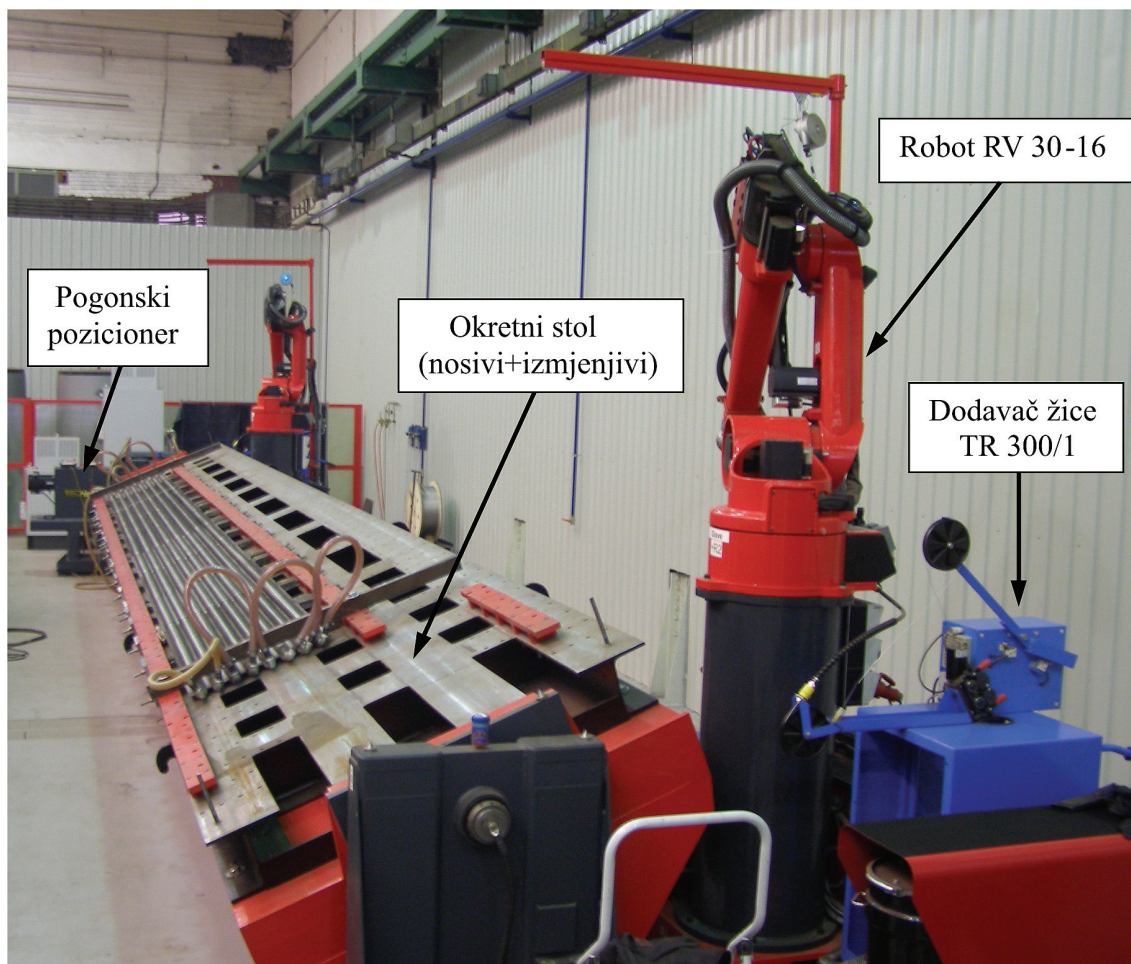
Za okretanje tako masivnog stola naručen je specijalni pozicioner. Pogonski pozicioner je opremljen sa servo motorom snage 2 kW, te reduktorom prijenosnog omjera 1:171 i okretnog momenta od 30800 Nm! Težina samog reduktora je 1223 kg s totalnom redukcijom od 2965:1. Gonjeni pozicioner je jednake konstrukcije kao pogonski, ali je bez pogonske jedinice (slika 1.).

Za vrijeme procesa navarivanja kroz cijevi koje se navaruju kontinuirano struji rashladna tekućina – voda koja treba biti određene – kontrolirane temperature .

Rashladni sustav se sastoji od tri spremnika od kojih svaki ima zapreminu od  $2 \text{ m}^3$ . U slučaju niže okolne temperature spremnici imaju ugrađene grijače ukupne snage 24 kW, a isto tako u slučaju visoke temperature ugrađen je hladnjak rashladne tekućine. Napojne pumpe ugrađene u sustav cirkuliraju rashladnu tekućinu tijekom procesa navarivanja pod pritiskom od 2 bara. Za odsis rashladne tekućine nakon završetka navarivanja zadužene su odsisne pumpe koje vrše ispušavanje sve dok senzori ne registriraju zrak u sustavu pri čemu se pumpe automatski isključuju.

Kao zaštitni plin pri navarivanju koristi se specijalni 4-komponentni plin (trgovačkog naziva Cronigon Ni10). Za opskrbu procesa sa zaštitnim plinom koristi se oprema koja se sastoji od vanjskog spremnika tekućeg argona zapremine 13000 litara, 4 baterije helija (12 boca u bateriji), 4 boce Premix-a (vodik i  $\text{CO}_2$ ), te centralne jedinice koju čini mješač WITT. Mješač

radi na principu elektromagnetskih ventila koji volumno miješaju sve četiri komponente plina u određenom omjeru, te ih sprema u 80 litarski spremnik na kojem se nalazi i sam mješač. Linija spremnika s plinovima (Ar, He, Premix) ima sustav daljinskog nadzora, a samim time i mogućnost praćenja potrošnje i dopremanja novih količina plina. Isto tako mješač ima mogućnost zapisa i ispisa smjese plinova u određenom vremenskom razdoblju.



Slika 1. Robotski sustav (robot RV30-16, okretni stol, pozicioneri)  
Figure 1. Robotics cells (robot RV 30-16, rotating table, rotating drive unit)

Za siguran i kontinuiran rad u rezervi su priključene 4 baterije laboratorijski zamješanog 4-komponentnog plina (Cronigon Ni10) (slika 2 i slika 3). Za napomenuti je da je ovo prvi takav mješač instaliran u Hrvatskoj i četvrti u Europi.

Izvori za zavarivanje su tip TransPuls Synergic 5000 R – prisilno hlađeni vodom. Izvori za zavarivanje imaju maksimalnu jakost struje od 500 A, a intermitenciju od 90 %, te su namjenjeni za robotski režim rada. Uz tvornički interni sustav hlađenja, na robotsku platformu je ugrađen sustav za dodatno hlađenje izvora koji ima kapacitet od 25 litara rashladne tekućine. Gorionici su Binzel tip ROBO WH 652 D TS - MIG/MAG također hlađeni vodom, s brzo izmjenjivim vratom gorionika u slučaju oštećenja. Namjenjeni su za rad sa strujama jakosti od 500 A na žicama promjera od 1,0÷1,6 mm uz 100 % ciklus rada.





Slika 2. 4-komponentni mješač  
 Figure 2. 4-component gas mixture unit



Slika 3. Linija za opskrbu zaštitnim plinom  
 Figure 3. Shielded gas feeding unit

#### 4. DODATNI MATERIJAL

Kao dodatni materijal pri procesu navarivanja membranskih panela cijevnih zidova koristi se legura na bazi nikla oznake SNI 6625 prema EN ISO 18274 (NiCr22Mo9Nb) trgovačkog naziva Inconel 625 čiji sadržaj željeza smije biti maksimalno 1% (tablica 1). Radi zahtjevnosti postupka i samog dodatnog materijala za zaštitu električnog luka se koristi specijalni 4-komponentni plin, ranije naveden.

Tablica 1. Kemijski sastav legure Inconel 625 [ 1 ]  
 Table 1. Chemical composition of Inconel 625 alloy [ 1 ]

	Ni	Cr	Fe	C	Mn	Si	Mo	Co	Al	Ti	Nb+Ta	P	S
min.	58,0	20,0					8,0				3,15		
max.		23,0	1,0	0,10	0,50	0,50	10,0	1,0	0,40	0,40	4,15	0,015	0,015

Upravo zbog korištenja dodatnog materijala na bazi nikla potrebno je voditi računa o čistoći radnog prostora, osnovnog i dodatnog materijala, zaštitne opreme za radnike, jer je to jedan od preduvjeta za kvalitetno navarenu površinu bez grešaka i pukotina.

#### 5. PROCES NAVARIVANJA

Pri automatiziranom navarivanju Inconelom 625 moraju biti ispunjeni sljedeći zahtjevi za navareni sloj:

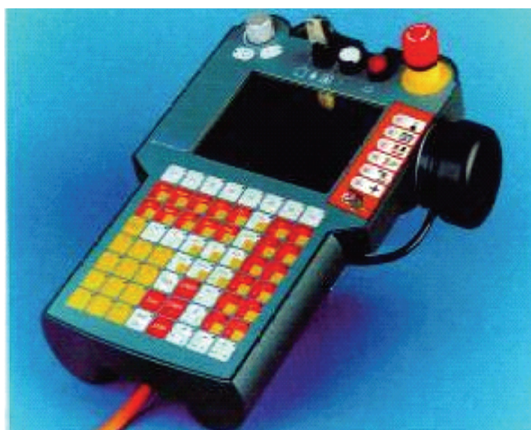
- debljina navara mora iznositi minimalno 2 mm,
- udio Fe u navaru smije biti max. 5 % pri automatiziranom i 8 % pri ručnom postupku,
- mora postojati metalurško povezivanje između osnovnog i dodatnog materijala.

Ovi uvjeti su propisani stručnim standardom VdTÜV 1166, a uz isti je važeća i tehnička specifikacija konkretnog objekta. Navarivanje Inconelom 625 kao dodatnim materijalom se vrši na membranske panele izrađene od cijevi i traka kao osnovnog materijala i to 1 grupe materijala (P235 GH ÷ 16Mo3).

Membranski paneli se prije postavljanja na izmjenjivi stol čiste dvostrukim sačmarenjem, a potom se brišu tekućinom za odmašćivanje i uklanjanje eventualnih nečistoća. Nakon pripajanja krajeva panela za držače ("pakne") koje se nalaze na izmjenjivom stolu na oba kraja

panela priključuju se elementi rashladnog sustava. Time je završena priprema panela na izmjenjivom stolu, te se zatim stol zajedno s panelom postavlja i pričvršćuje na nosivi okretni stol. Na prvu i zadnju cijev se priključuje crijevo rashladnog sustava koji ima zadatak da osigurava optimalnu temperaturu rashladne tekućine. Optimalna temperatura je neophodna zbog sprječavanja zagrijavanja osnovnog materijala, a samim time i smanjenje deformacija panela i difuzije željeza iz osnovnog u dodatni (navareni) materijal.

Prije samog procesa navarivanja potrebno je izvršiti programiranje robota. Programiranje se vrši u programu pod nazivom RobOffice, licenciranom programu tvrtke REIS. Programiranje je jako slično DOS aplikacijama, a robote je moguće programirati na osobnom računalu (offline) ili na "teach pendantu" (online) upravljačkoj konzoli koja je priključena direktno na robotsku stanicu (slika 4 i 5). Pri programiranju je potrebno definirati alat kojim se radi, točke (putanje) u koordinatnom sustavu, kao i varijable i potprograme koji potpomažu glavni program pri procesu navarivanja. Kada je program dovršen, potrebno je na robotu provjeriti njegovu ispravnost da ne bi došlo do kolizije, te oštećenja vrlo skupe robotske opreme. Ukoliko je program ispravan, potrebno je definirati parametre navarivanja dane u tablici 2, te unutar maske na "teach pendantu" unijeti podatke o panelu (promjer i broj cijevi, korak, duljina panela) prema kojima robotski program vrši kalkulacije te s pomoću "touch" senzora definira početne točke za svaki pojedini prolaz.



Slika 4. Upravljačka konzola  
Figure 4. Teach pendant



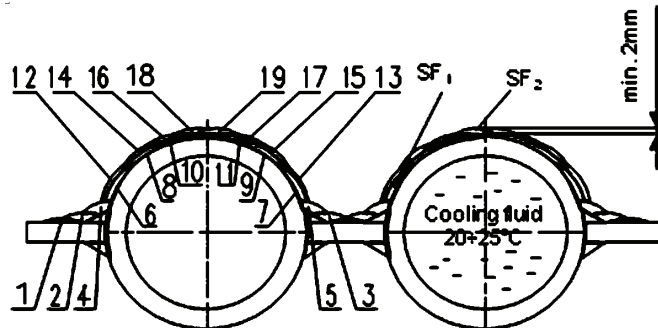
Slika 5. Programski redovi u RobOfficeu  
Figure 5. Program line in RobOffice

Samo navarivanje se vrši u 2 sloja od kojih prvi sloj ima 11, a drugi 8 prolaza, ukupno 19 prolaza (slika 6). Vrlo je bitno voditi računa o pravilnom redosljedju prolaza kako bi se ispoštovali svi zadani uvjeti (min. 2 mm navarenog sloja i max. 5 % Fe u površini navara).

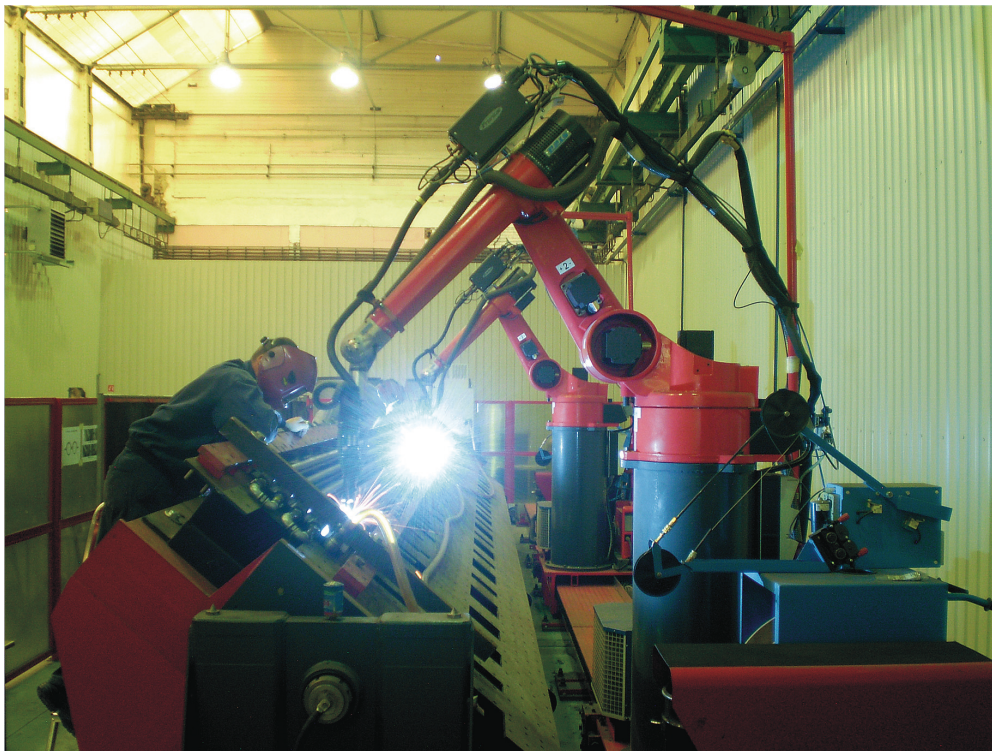
Kao posljedica navarivanja tj. velikog toplinskog inputa u osnovni materijal dolazi do deformacije i skupljanja panela po koraku, te po dužini navarene površine. Radi toga je programski predviđeno zaustavljanje procesa, te ponovno definiranje početnih točaka putem "touch" senzora. Upravo zbog deformacije i velike duljine membranskih panela (do 12000 mm) potrebna je konstantna kontrola i vođenje procesa. Vertikalno praćenje zadane putanje je riješeno putem "arc" senzora koji preko napona električnog luka provjerava i korigira visinu gorionika svaki puta kada gorionik dođe u središnjicu gusjenice. Za uzdužno praćenje prolaza zaduženi su posebno obučeni operateri koji nakon određenog vremenskog intervala provjeravaju ispravnost putanje, te ako je potrebno putem "touch pendanta" dodatno korigiraju putanju u lijevu ili desnu stranu (slika 7). Kao dodatni automatizirani postupak programirano je čišćenje



gorionika i sječenje vrha žice na automatskoj Binzel stanici nakon svakog prolaza.



Slika 6. Redosljed polaganja gusjenica pri navaranju [ 2 ]  
 Figure 6. The order of cladding seems [ 2 ]



Slika 7. Nadziranje procesa navaranja panela cijevnih zidova  
 Figure 7. Monitoring the process of tube wall panels cladding

Membranski panel se nakon cjelokupno završene operacije navaranja zajedno s izmjenjivim stolom skida s nosivog stola. Pošto je panel navaren samo s jedne strane dolazi do znatnih deformacija i progiba njegovih krajeva prema gore. Radi toga se panel s izmjenjivog stola smije skidati samo uz prethodno opterećenje kraja panela s utegom. Potom se brušenjem zavarenih spojeva između panela i pakni panel oslobađa veze i uklanja se uteg s njegova kraja. Samo za ilustraciju – deformacije su tolike da se panel duljine 10000 mm na oba kraja progibne čak 650 ÷ 700 mm!

Potom se na panelu izvrše popravci ukoliko za to ima potrebe. Sa suprotne strane na koju se nije vršilo navaranje panel se plinskim plamenom izravnava do te mjere da ga je moguće ravnati na hidrauličkoj presi. Nakon ravnanja pomoću hidrauličke prese, panel se pjeskari sa

čistim nekorištenim pijeskom, te se još jednom prekontrolira navarena površina ukoliko postoji koja zaostala greška.

Za kraj ostaje da kontrolori izvrše sva bitna mjerenja koja moraju ispuniti zahtjeve od min. 2 mm navarenog sloja, te max. 5 % Fe u površini navara. Potvrda kvalitete postupka i pravilnih parametara zavarivanja je i makro uzorak izrađen za potrebe atesta postupka (slika 8). Na slici se jasno vidi da je sjedinjenje osnovnog i dodatnog (navarenog) sloja potpuno, što je vrlo bitno za daljnje rukovanje i eksploataciju navarenog membranskog panela cijevnog zida.



Slika 8. Makro uzorak navarenih slojeva na membranski panel [ 2 ]  
Figure 8. Macro sample of cladding layers on membrane wall [ 2 ]

## 6. ZAKLJUČAK

Porastom stanovništva rapidno raste potrošnja i potražnja za električnom energijom. Pošto su izvori energenata ograničeni, kućni otpad kao gorivo nametnuo se sam po sebi. Zbog agresivnih dimnih plinova radni vijek standardnih kotlovskih cijevi (16Mo3) je znatno skraćen, te se kao rješenje nametnulo navarivanje membranskih panela cijevnih zidova s elektrodom na bazi nikla (Inconel 625). Ručni proces navarivanja je suviše spor i ne ispunjava norme sve zahtjevnijeg tržišta. Robotizacija postupka navarivanja pokazala se kao dobro rješenje za povećanje proizvodnih kapaciteta i konkurentnost na tržištu.

Unatoč početnim problemima i slabom predznanju filozofije rada robota kroz kratak period uspješno se u proizvodne pogone ĐĐ Termoenergetska postrojenja implementirala robotska proizvodnja, te se došlo do vrlo dobrih rezultata, a samim tim i gotovih proizvoda koji se već ugrađuju u termoenergetska postrojenja diljem svijeta.

## 7. LITERATURA

- [1] Thyssen - Krupp VDM, Nicrofer 6020 hMo – alloy 625, Material data sheet No. 4018, June 2002
- [2] ĐĐ TEP, Uputa za zavarivanje (WPS), Slavonski Brod, 2009.
- [3] Pecić, Vladimir; Budić, Ivan: Izvješće o postupku ispitivanja zavarenog spoja SF3094/09, Strojarski fakultet Slavonski Brod, Slavonski Brod, 2009.
- [4] Rajković, Vedran; Diplomski rad: Tehnologija navarivanja Alloy 625 legure na pojedinačne cijevi i panele kotlovskih postrojenja, Strojarski fakultet Slavonski Brod, Slavonski Brod, 2007.