

PRIMJENA IZMJENIČNE STRUJE KOD MAG NAVARIVANJA LEGURE INCONEL 625

APPLICATION OF ALTERNATING CURRENT FOR MAG CLADDING OF INCONEL 625

Ivica Garašić , Zoran Kožuh, Slobodan Kralj, Tomić T., Glogović Z.

Fakultet strojarstva i brodogradnje, Ivana Lučića 1, HR 10000 Zagreb

Ključne riječi: *MAG, izmjenična struja, navarivanje, zaštitni plin*

Key words: *MAG, alternating current, cladding, shielding gas*

Sažetak:

Sve intenzivniji zahtjevi za energetske objektima koji koriste otpad i biomasu kao gorivo te kao posljedicu generiraju korozivni agresivni dimni plinovi, definiraju složene proizvodne i tehnološke okvire za navarivanje nikl legurama pri čemu je potrebno zadovoljiti stroge metalurške i geometrijske značajke navarenih slojeva. U praksi se često primjenjuje legura Inconel 625 pri čemu se apliciraju impulsi ili novorazvijeni modificirani postupci MAG zavarivanja. U novije vrijeme pojavom izmjeničnih izvora struje za MAG zavarivanje otvara se mogućnost primjene ove tehnologije za navarivanje legure Inconel 625. Međutim, potrebno je detaljno definirati parametre i mješavine zaštitnih plinova kako bi se dobili zadovoljavajući rezultati. U radu je prikazana analiza značajki MAG navarivanja izmjeničnom strujom dok je u eksperimentalnom dijelunačinjena obrada uzoraka navarenih HC-MAG postupkom izmjeničnom strujom u zaštiti plinske mješavine argona i ugljičnogdioksida. Ovaj rad ostvaren je u suradnji s tvrtkama Servus d.o.o. i ĐĐ-TEP d.o.o.

Abstract:

Objects that use waste and biomass as fuel and, as a consequence, generate corrosion aggressive gasses must fulfill intensive requirements and define complex products and technological frames for cladding nickel alloys where strict metallurgical and geometrical requirements have to be completed. Nickel alloy Inconel 625 is often used in the industrial praxis where pulse or newly developed modified MAG welding procedures are applied. In recent times, with the development of alternating current power supplies for MAG welding, a new possibility is open in cladding of the Inconel 625 alloy. However, it is necessary to define the parameters and shielding gas mixtures to gain satisfying results. This paper presents the features of alternating current MAG welding and in the experimental part results of sample analysis that were produced using HC-MAG process in an active shielded gas environment of Ar and CO₂. This paper is a result of a cooperation with the companies Servus d.o.o. and ĐĐ – TEP d.o.o.

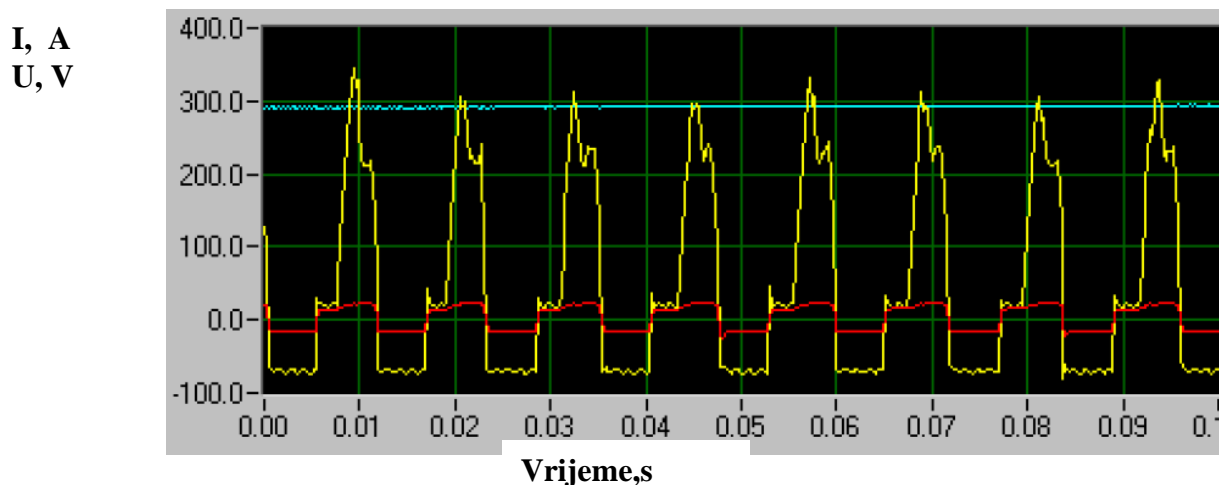
1. UVOD

Složeni korozivni mehanizmi kod kotlova za izgaranje otpada i biomase koji su dodatno ubrzani povišenom temperaturom zahtjevaju navarivanje nikl legurama uglavnom serija Inconel 625, 686 i 825 kako bi se povećala korozivna i tribološka postojanost. Osnovni zahtjevi navarenog sloja od nikl legure odnose se na minimalnu debljinu, homogenost (prvenstveno izostanak naljepljivanja i pora te vrućih pukotina), geometriju i maseni udio željeza u površinskom sloju. Slijedi da se moraju koristiti relativno mali parametri navarivanja kako bi se minimaliziralo miješanje nikl legure i osnovnog materijala ali se istodobno mora zadržati razina produktivnosti tj. zadovoljavajuća količina nataljenog materijala. Gornja vrijednost masenog udjela željeza iznosi 5%

te se prema [1] unos topline mora ograničiti na približno 3 kJ/cm kako bi se ta razina održala u predviđenim okvirima.

Pri konvencionalnom MAG zavarivanju uobičajena je primjena pozitivnog polariteta na žici pri čemu se postiže stabilan električni luk u svim područjima prijenosa metala; od krakih spojeva do štrcajućeg luka te impulsnih struja. Primjena negativnog polariteta na žici uobičajena je kod zavarivanja praškom punjenom žicom (ovisno o vrsti praška) ili pak pri navarivanju elektrolučnim zavarivanjem pod praškom. Primjena konstantnog negativnog polariteta na žici kod zavarivanja metalnom taljivom elektrodom u zaštiti plina nije moguća zbog nestabilnog električnog luka, štrcanja te loše penetracije i kvašenja što je neprihvatljivo kod uobičajenih zavarivačkih operacija. Naime kako je pri negativnoj elektrodi na žici (DCEN) tj. katodi izvor emisije elektrona javljaju se jake odbojne sile koje djeluju na rastaljenu kapljicu na vrhu elektrode te dolazi do asimetričnog odvajanja rastaljenog metala. Fizikalni razlog dobivanja veće količine nataljenog metala leži u činjenici da električni luk nije koncentriran na kraju žice kao što je slučaj pri pozitivnom polu (DCEP) već obuhvaća širu površinu pri čemu je emisija elektrona bolja u područjima na kojima se nalaze oksidi. Pri tome je na katodi znatno veći pad napona pa je i distribucija energije takva da se veći dio prenosi na žicu a manji na osnovni materijal. Ako je moguće upravljati distribucijom topline lako se ostvaruje kontrola penetracije u osnovni materijal. Nadalje, ova značajka uzrokuje znatno niže količine željeza na površini navarenog materijala a što je nužno zbog dužeg eksploatacijskog perioda samog sustava [3-7].

Moderni izvori struje za zavarivanje omogućili su primjenu izvora koji generiraju izlaznu struju za zavarivanje promjenjivog polariteta tzv. VP-variable polarity. To znači da se na metalnoj elektrodi izmjenjuju pozitivna i negativna perioda određenog trajanja i intenziteta, slika 1. Optimalnim odnosom frekvencije i intenziteta pozitivnih i negativnih perioda postiže se stabilan prijenos metala u električnom luku koji za istu jakost struje zavarivanja postiže veći depozit nataljenog metala uz minimalno miješanje što su upravo karakteristike koje se zahtjevaju pri navarivanju.

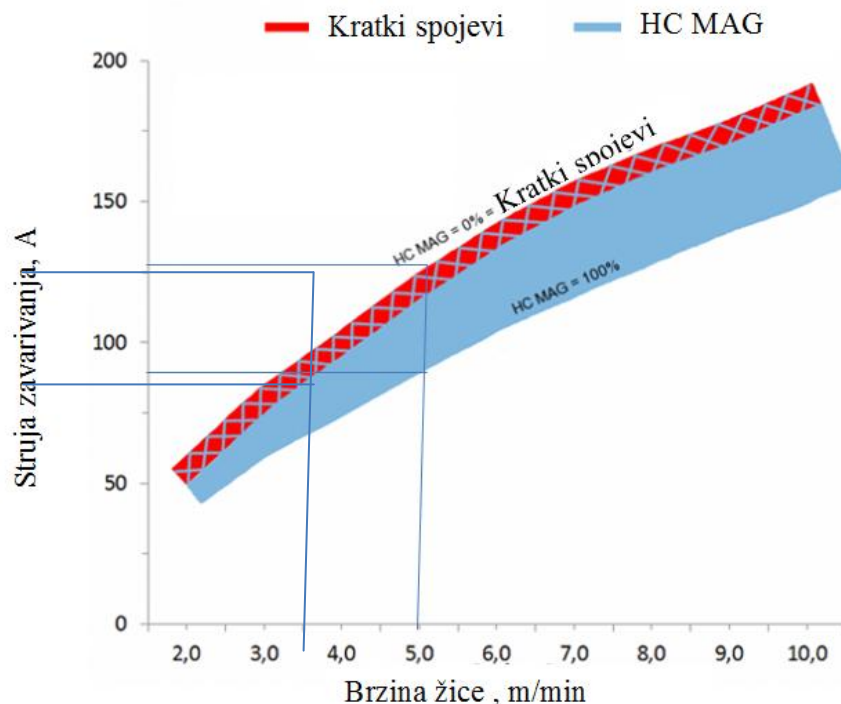


Slika 1. Oscilogram struje i napona kod MAG zavarivanja promjenjivim polaritetom (žuti signal $I=f(t)$, crveni signal $U=f(t)$) [2]

Značajke HC MAG postupka

HC-Heat Controled MAG je modificiran postupak zavarivanja kratkim spojevima u rasponu do 200A pri čemu se distribucijom pozitivnog i negativnog polariteta na žici može precizno upravljati količinom rastaljenog metala i penetracijom upravo zbog načela fizikalnih procesa pri zavarivanju izmjeničnom strujom. Kada je udio negativnog polariteta minimalan (ili ga uopće nema), prijenos metala u električnom luku se odvija standardnim kratkim spojevima (gornje crveno

područje), slika 2. Povećanjem udjela negativnog polariteta za istu brzinu žice smanjuje se struja zavarivanja; npr. za brzinu žice 5m/min kod HC MAG=0% (nema negativnog polariteta) struja zavarivanja za žicu 1,0mm je približno 130A dok se za maksimalni balans negativnog polariteta HC MAG=100% struja zavarivanja reducira na svega 85A što znači da uz bitno niži unos topline postizemo jednaki učin taljenja, slika 3. Nadalje, znatno se proširuje i radno područje parametara zavarivanja ili navarivanja za određenu brzinu žice što daje i veću fleksibilnost pri određivanju radnih područja [8].



Slika 2. Ovisnost jakosti struje o brzini žice za prijenos metala kratkim spojevima i HC MAG postupkom (promjer žice 1,0mm, zaštitni plin 82%Ar/18%CO₂) [8]

Značajke zavarivanja MAG izmjeničnom strujom omogućile su primjenu kod tanjih limova u automobilskoj industriji ali i pri zavarivanju gdje postoje veći razmaci između limova pri čemu je izbjegnuto propaljivanje a postiže se prihvatljiva kvaliteta zavara. Još uvijek je određivanje parametara relativno zahtjevno jer je za sve kombinacije osnovnih materijala i zaštitnih plinova potrebno pronaći kompromis udjela negativne komponente tj. perioda trajanja i intenziteta. HC MAG moguće je uspješno primijeniti i kod zavarivanja korijenskog prolaza te , kao što je i slučaj u ovom radu, pri navarivanju.

Osvrt na utjecaj zaštitnih plinova

Istraživanja su pokazala da su najbolji rezultati pri zavarivanju ili navarivanju MAG postupkom izmjeničnom strujom ostvareni u mješavini argona i malih udjela kisika ili ugljičnog dioksida [3-6]. Iako se to u praksi često zanemaruje, udio CO₂ u Ar ima veliki utjecaj na mehanička svojstva, geometriju i izgled zavara. Pri sobnoj temperaturi njegova kemijska reaktivnost ne dolazi do izražaja, ali u uvjetima zavarivanja, primjerice kod MAG postupka zavarivanja, potaknuta velikom energijom plazme luka, molekula CO₂ se u anodnom području luka, raspada na ugljični monoksid i kisik [9]. Slobodni elementi nastali disocijacijom miješaju se s talinom ili, pak, u hladnijem, katodnom području rekombiniraju ponovno u CO₂. Ponovna rekombinacija kemijskih elemenata u CO₂ molekulu popraćena je velikim oslobađanjem energije, a posljedica je formiranje dubljeg i šireg zavara.

Slobodni kisik, nastao disocijacijom, također može reagirati s kemijskim elementima u području električnog luka tvoreći okside. To se može spriječiti dodavanjem dezoksidanata poput silicija, mangana i titana u žicu dodatnog materijala. Bit je da navedeni elementi vežu na sebe kisik i potom se izlučuju na površinu taline u obliku troske. Veće količine CO₂ ujedno znače i veći oksidacijski potencijal, a time i više troske na površini zavara. Usuprotnom slučaju dolazi do većeg stupnja legiranosti zavara silicijem, manganom i ostalim elementima. Na primjer, utjecaj je značajniji kod čelika visoke čvrstoće jer se gubi i dio mikrolegiranih elemenata što ima direktnu posljedicu na mehanička svojstva zavarenog spoja zbog redukcije broja dispergiranih karbida i nitrida.

Kod zavarivanja nikla vrlo često se kao zaštitni plin preporuča i koristi argon, međutim kako je u ovom slučaju pri zavarivanju čistim argonom zamjetno nestabilno ponašanje električnog luka kao alternativa je primijenjena mješavina argona i relativno malog udjela ugljičnog dioksida. Funkcija ugljičnog dioksida je višestruka jer uz stabilizaciju električnog luka nakon disocijacije nastali kisik smanjuje površinsku napetost rastaljene kapljice i taline i omogućuje bolje kvašenje koje je inače kod MAG zavarivanja izmjeničnom strujom relativno lošije u odnosu na konvencionalno zavarivanje a također kompenzira niski unos energije uzrokovan parametrima zavarivanja. Vrlo male promjene udjela CO₂ rezultiraju bitnim odstupanjima u ponašanju električnog luka i kvaliteti navarenog sloja.

2. EKSPERIMENTALNI RAD

Obzirom na navedene zahtjeve odabran je izvor struje ESS E2 4000 sa HC –Heat Controlled Technology verzijom koja omogućuje primjenu izmjenične struje u kombinaciji sa dodavačem žice ESS DVK 2. Za zaštitni plin odabrana je mješavina argona sa udjelom CO₂ iz skupine HRN EN ISO 14175:M12. Osnovni materijal cijevi membranske stijene je EN 10216-2: P235GH promjera 57mm i debljine stijenke 5,6mm dok je dodatni materijal žica promjera 1,2mm klasificirana prema EN ISO 18274: G Ni 6625.

Oprema za navarivanje postupkom HC MAG instalirana je u Laboratoriju za zavarivanje FSB-a na robotsku stanicu OTC Daihen Almega AX-6. Za hlađenje membranske stijene vodom primijenjen je izmjenjivač topline sa zatvorenim sustavom. Navarivanje je provedeno u PG položaju pri čemu su redosljed i broj prolaza zadržani identično proizvodnim uvjetima. Bitno je napomenuti da je provedeno doručivanje originalno ugrađene sinergijske upravljačke krivulje kako bi se postigao što stabilniji prijenos metala u električnom luku i eliminiralo prskanje. Instalirana oprema prikazana je na slici 3. dok je na slici 4. prikazano samo navarivanje.



Slika 3. Instalirana oprema za eksperimentalno navarivanje u Laboratoriju za zavarivanje FSB-ZK



Slika 4. Navarivanje legure Inconel 625 u PG položaju HC MAG postupkom

Osnovni parametri navarivanja prikazani su u tablici 1. pri čemu treba posebno napomenuti parametar balansa tj. međusobnog omjera negativnog i pozitivnog polariteta u kompletnom ciklusu prijenosa metala u električnom luku. Što je udio negativnog polariteta veći, smanjuje se penetracija i povećava rizik od naljepljivanja uz nešto nestabilniji električni luk. Eksperimentom je pokazano da se najbolji rezultati postižu uz vrijednost balansa od 28%. Uz to, važno je i optimizirati parametre njihanja jer se uz vrlo nizak unos topline i tražena svojstva navara mora detaljno definirati trajektorija vođenja pištolja uz vremensko definiranje frekvencije i vremena zadržavanja na rubovima. Upravo su te značajke fundamentalne u postizanju dobrog slaganja taline i prihvatljive geometrije. Određene su značajke zadržavanja od 0,1s na rubovima uz frekvenciju njihanja 3 Hz koje su bile konstantne kod svih prolaza.

Tablica 1. Parametri navarivanja na uzorku FSB-04

Prolaz	Jakost struje	Napon	Brzina pištolja	Amplituda njihanja	Balans	Unos topline prema HRN EN 1011-1
	A	V	cm/min	mm	%	kJ/cm
1	170	17,5	53	5,5	28	4,26
2	167	17,9	53	6,5	28	4,28
3	151	17,4	55	6,5	28	3,69
4	156	17,9	55	6,5	28	3,92
5	150	17,3	55	6,5	28	3,64
6	173	17,8	53	5,5	28	4,41
7	165	17,8	53	6,5	28	4,21
8	150	17,3	55	6,5	28	3,64
9	155	16,9	55	6,5	28	3,68
10	150	16,3	55	6,5	28	3,43
11	151	16,8	55	6,5	28	3,56
12	160	17,5	53	6,5	28	4,01

Optimalni parametri navarivanja postignuti su uz nekoliko iteracija pri čemu se mora napomenuti da je relativno prihvatljivo područje parametara u jednom uskom području te da svako

odstupanje rezultira ili povećanim sadržajem željeza ili pojavom pora, loše geometrije, naljepljivanja i sl. Mogućim povećanjem balansa negativnog polariteta na 35 % i više smanjuje se vezivanje navarenog sloja i povećava rizik od naljepljivanja iako dolazi do pada udjela željeza na površini. U proizvodnim uvjetima potrebno je prilagoditi značajke njihovanja na način da budu što sličniji predloženim parametrima jer se bitnim promjenama frekvencije, brzine i širine utječe na stabilno formiranje taline.

3. ANALIZA NAVARENIH UZORAKA

Na uzorcima na kojima je postignuta zadovoljavajuća kvaliteta provedena je analiza značajki koje definiraju prihvatljivost navarenog sloja slijedećim opsegom ispitivanja:

- Nerazorna ispitivanja,
- Makroizbrusak,
- Mjerenje debljine navara,
- Mjerenje udjela željeza na površini,

Slaganje površine zavara je uredno, bez oštih prijelaza i površinskih ugorina. Nerazorna ispitivanja ultrazvukom te ispitivanje penetrantima nije rezultiralo nedozvoljenim indikacijama. Na površini navara nema intenzivne oksidacije niti zacrnjenja. Nije primijećeno naljepljivanje većih kapljica na slobodnu površinu membrane što znači da je štrcanje minimalno te da nije potrebno ponovno čišćenje površine. Na slici 5. prikazana je površina uzorka FSB-03 nakon zavarivanja svih slojeva bez naknadne mehaničke obrade.



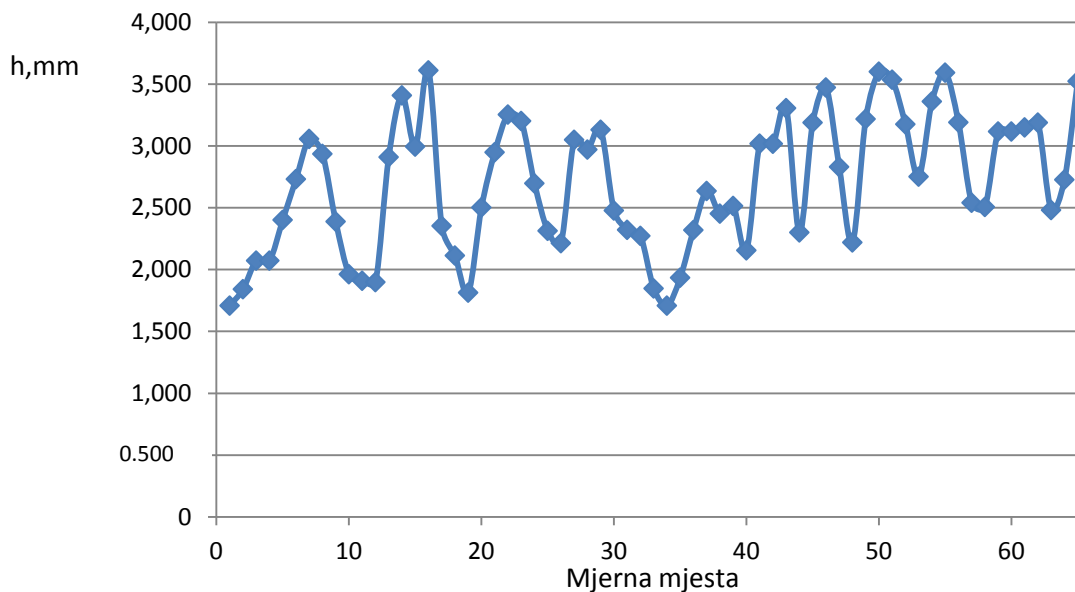
Slika 5. Izgled navarene površine uzorka FSB-03

Ispitivanje tvrdoće HV 10 pokazalo je da unatoč niskom unosu topline te dodatnom hlađenju maksimalna tvrdoća u zoni utjecaja topline iznosi između 154 i 162 HV10. Zona utjecaja topline je relativno uska. Nisu primijećene veće nehomogenosti u samom metalu navara, slika 6.



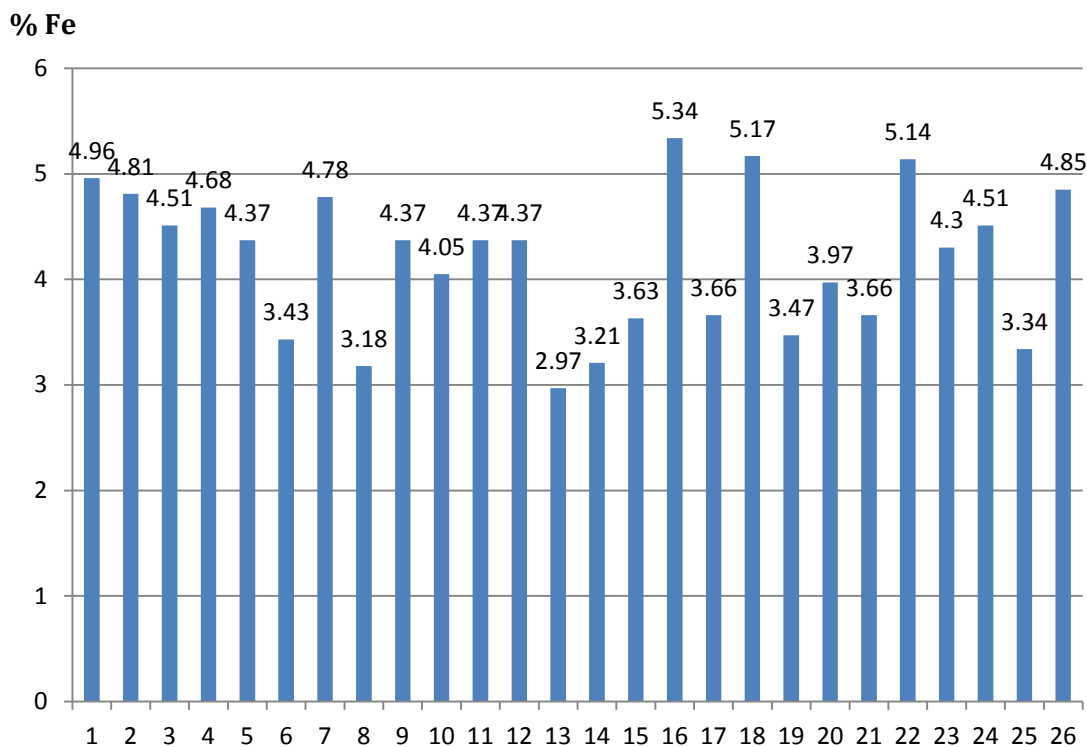
Slika 6. Makroizbrusak uzorka FSB-01

Debljina navarenog sloja izmjerena je na makroizbruscima uzoraka u 65 točaka kako bi se postigao kvalitetan raster za analizu debljine. Na uzorku FSB-04 kod kojeg je postignuta minimalna srednja debljina navara 2,695 mm izmjerena je minimalna vrijednost 1,708 mm i maksimalno 3,610 mm. Na slici 7. dan prikaz rasporeda debljine navara po opsegu cijevi. Naime vidljivo je da sami profil zadržava konturu „brijeg-dol“ što je rezultat preklapanja. Međutim, optimizacijom brzine gibanja pištolja, frekvencije i vremena zadržavanja na rubovima moguće je dodatno smanjiti srednju debljinu navara.



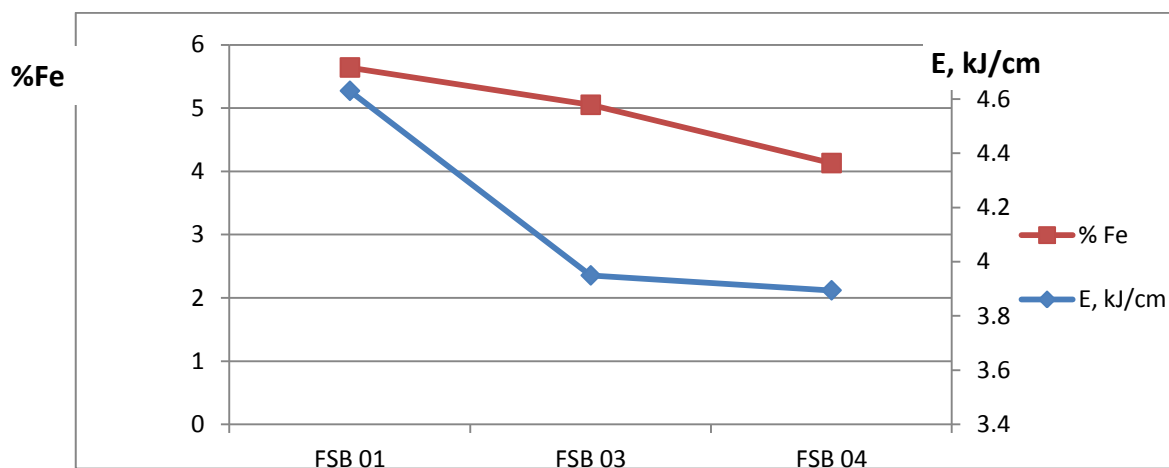
Slika 7. Raster rezultata mjerenja debljine navara po opsegu u 65 mjernih točaka

Analizom rezultata određivanja masenog udjela željeza na površini vidljivo je da je samo na tri mjesta na uzorku FSB-04 izmjerena vrijednost viša od 5 % (i to maksimalno 0,34 %), slika 8. Time je dokazan minimalan unos topline i optimalno miješanje uz relativno pouzdan proces kojim moguće uz kontrolu unosa topline regulirati udio željeza.



Slika 8. Vrijednosti masenog udjela željeza na uzorku FSB-04

Prema navodima iz [1] gdje se kao granica unosa topline definiraju vrijednosti od 3 kJ/cm (za impulsno MAG navarivanje sa žicom na pozitivnom polaritetu) vidljivo je da je kod izmjenične struje i pri 15-20% višim unosima topline moguće postići prihvatljivo niske udjele željeza zbog toplinske distribucije koja se u ovom slučaju više prenosi na žicu. Time se minimalizira miješanje ali se također dobiva i nešto veći depozit. Trend smanjenja udjela željeza sa smanjenjem unosa topline prikazan je na slici 9.



Slika 9. Relativni odnos unosa topline i udjela željeza na uzorcima FSB-01, FSB-03 i FSB-04

Također vrlo je važno naglasiti da se sam način prijenosa metala značajno mijenja kod novorazvijenih modificiranih MAG postupaka te da međusobna komparacija samo na osnovi unosa topline nije dovoljna kako bi se donijeli adekvatni zaključci ili definirali univerzalni parametri za postizanje prihvatljivih količina željeza u površinskom sloju. Razlog leži u dodatnim mehanizmima koji nisu obuhvaćeni konvencionalnom percepcijom unosa topline tj. parametrima struje zavarivanja, napona električnog luka i brzine zavarivanja. Isto tako, ovdje je potrebno naglasiti da

se ne primjenjuje helij u plinskoj mješavini što smanjuje trošak zaštitnog plina i što je također bitno omogućuje veću fleksibilnost u nabavi.

4. ZAKLJUČAK

Temeljem eksperimentalnih ispitivanja i analize postupka HCMAGza navarivanje membranskih stijena žicom Inconel 625 može se zaključiti kako slijedi:

HC MAG postupak navarivanja izmjeničnom strujom u zaštiti dvokomponentnog plina iz grupe HRN EN ISO 14175:M12 prikladan je za primjenu navarivanja Inconela 625 uz primjenu optimiziranih parametara pri čemu je za kompletan navar na cijevi promjera 57 mm potrebno 12 prolaza.

Vizualnim pregledom uzoraka vidljivi su uredno složeni i homogeni navari bez oštih prijelaza. UT kontrola nije detektirala nalijepljene zone kao ni PT površinske pukotine.

Kod minimalne struje zavarivanja na uzorku FSB-04 mjerenje debljine navara pokazalo je srednju vrijednost 2,6 mm uz minimalnu vrijednost 1,708 mm i maksimalnu 3,610 mm. Kontura debljina navara poklapa se sa preklapima navara te je na proizvodnoj liniji potrebno minimalizirati zaustavljanje na rubovima s 0,1 s na 0,05 s kako bi se dobili blaži prijelazi i smanjila varijacija debljine.

Optimizacijom parametara smanjena je srednja vrijednost unosa topline od 4,63 kJ/cm na uzorku FSB-01 na 3,89 kJ/cm na uzorku FSB-04. Najviše srednje vrijednosti udjela željeza od 5,64 % izmjerene su kod najvišeg unosa topline što se objašnjava većom penetracijom i intenzivnijim miješanjem. Kod uzorka FSB-04 postignuta je najniža srednja vrijednost udjela željeza od 4,129 % . Temeljem provedenih mjerenja može se zaključiti da je kritični prag unosa topline s aplikacijom izmjenične komponente od 28% približno 3,9 kJ/cm uz dovoljno vezivanje navarenog sloja sa osnovnim materijalom. Već za unose topline od 4,63 kJ/cm količina željeza je većinom iznad 5% dok je za manje unose topline povećana vjerojatnost površinskih grešaka i naljepljivanja.

4. LITERATURA

- [1] Adamiec J., High temperature corrosion of power boiler components clad with nickel alloys, Materials Characterization Vol 60., 2009., 1093-1099.
- [2] Joseph A., Webb C., Haramia M., Yapp D., Variable Polarity (AC) Arc Weld Brazing of Galvanized Sheet, IIW Doc. No. XII-1799-03, 2003.
- [3] Dutra J.C., Puhl E. B., Bonacorso N.G., Silva R.H.G., Improving surfacing performance with GMAW, Welding Journal, 5/2013., 42-47.
- [4] Vilarinho L.O., Nascimento A.S., Fernandes D.B., Mota C.A.M., Methodology for parameter calculation of VP-GMAW, Welding Journal, 4/2009., 92s-98s.
- [5] Huismann G., Steering the heat input with the MIG process, IIW Doc. No. XII-1877-05, 2005.
- [6] Harwig D.D., Dierksheide J.E., Yapp D., Blackman S., Arc behavior and melting rate in the VP-GMAW process, Welding Journal, 3/2006., 52s-62s.
- [7] Garašić I., Kralj S., Kožuh Z., Suvremeni postupci MIG/MAG zavarivanja, Zavarivanje Vol. 54, 2011.
- [8] http://www.ess-schweisstechnik.de/assets/files/ess-hc-mag-welding_tb-e.pdf, HC MAG-Heat Controlled MAG, 05.09.2013.
- [9] Tomić T., Kralj S., Kožuh Z., Garašić I., Brumec G., Welding parameter optimization for welding API 5L X80 steel, Welding and welded structures, Vol. 58/3, 2013.