FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

KATEDRA ZA ZAVARENE KONSTRUKCIJE

STROJEVI I OPREMA ZA ZAVARIVANJE

PODLOGE

ZAGREB, STUDENI 2013.

Sadržaj

1.	Prednost automatskog zavarivanja pri izgradnji cjevovoda	3
2.	Instalacija CNC sustava za kombinirano rezanje laserom i plazmom	18
3.	Primjena izmjenične struje kod MG navarivanja legure Inconel 625	34
4.	Suvremeni postupci MIG/MAG zavarivanja	47
5.	Automatizirano TIP TIG zavarivanje	60
6.	Trendovi u razvoju postupaka zavarivanja	76
7.	Utjecaj duljine kabela na električni luk pri zavarivanju	114
8.	Zavarivanje aluminija „diplim“ pulsom - (Double puls)	122
9.	Robotizirano zavarivanje mikropanela uz pomoć strojnog vida	126
10.	Implementacija linije za rezanje profila	137
11.	Mehanizacija postupaka rezanja i zavarivanja u svjetskoj brodogradnji	149
12.	Optimizirani plinovi za mehanizaciju postupaka zavarivanja	158
13.	Neki aspekti primjene STT postupka zavarivanja u kotlogradnji	167
14.	CMT – postupak – Revolucija u tehnologiji zavarivanja	179
15.	Mehanizirani postupci u proizvodnji rasvjetnih stupova	193
16.	Robotizacija u tehnici zavarivanja	203
17.	Programiranje robota	208
18.	Pitanja za ispit	216

PREDNOSTI AUTOMATSKOG ZAVARIVANJA PRI IZGRADNJI CJEVOVODA

Authors: Prof.dr.sc. Slobodan Kralj[1]

Branko Radošević, dipl.ing.[2]

Prof.dr.sc. Zoran Kožuh [1]

Ivica Garašić, dipl.ing. [1]

[1] Fakultet strojarstva i brodogradnje, I. Lučića 1, Zagreb, e-mail: fsb.zk@fsb.hr

[2] Plinacro d.d., Savska 88a, Zagreb, e-mail: TTTbranko.radosevic@plinacro.hr

Ključne riječi: cjevovodi, automatsko zavarivanje, čelici povišene čvrstoće

Sažetak:

Izgradnja magistralnih plinovoda predstavlja velike zahtjeve za tehnologiju zavarivanja. Konvencionalne ručne tehnologije zavarivanja sve teže prate zahtjeve ne samo sa stanovišta osiguravanja kvalitete zavarenih spojeva već i s ekonomskog, tehnološkog i metalurškog gledišta. Dodatno se mora naglasiti humana i ekološka komponenta primjene automatskog zavarivanja koja dolazi do punog izražaja u posebno teškim radnim uvjetima i zahtjevnim trasama kao i pri očuvanju integriteta konstrukcije u eksploataciji. Iako primjena automatskog zavarivanja ima limitirajuće čimbenike, moguće je uz adekvatnu opremu, izvore struje, organizaciju i logistiku postići izvrsne rezultate i u teškim radnim uvjetima. U ovom radu opisana je primjena automatskog elektrolučnog zavarivanja pri zavarivanju cjevovoda od čelika povišene čvrstoće, pri čemu su definirane komparativne prednosti automatskog zavarivanja i potrebna oprema a ukratko je obrađena i problematika zavarljivosti čelika povišene čvrstoće za cjevovode. Uz to, predstavljena su iskustva i rezultati primjene automatskog zavarivanja pri izgradnji magistralnog plinovoda Pula-Karlovac.

1. Uvod

Izgradnja modernih cjevovodnih sustava za transport plina zahtjeva primjenu sofisticiranih tehnologija. Jedna od najosjetljivijih tehnologija je zavarivanje jer diktira uvjete u izgradnji, od same brzine napredovanja cjevovoda pa do sigurnosti u eksploataciji. S druge strane, od plinovoda se zahtjevaju sve veći transportni kapaciteti uz zadržavanje strukturne postojanosti i minimalizacije rizika, posebno kada se radi o vremenskom aspektu korištenja ovakvih sustava. Vremenom se ovisno o transportiranom mediju i sustavu antikorozijske zaštite mogu očekivati problemi poput smanjenja debljine stijenke, stvaranja oštećenja nastalih zbog strujanja plina i sl. Uz to, moguća su i dinamička opterećenja koja se često zanemaruju a iskustva su pokazala da su vrlo česta npr. dinamički udari pri ekstremnim situacijama, puštanju u pogon i sl. Da bi se zadovoljili svi uporabni i tehnološki zahtjevi, sve više se primjenjuju moderni čelični materijali koji imaju izvrsna eksploatacijska svojstva, ali zahtjevaju i izuzetnu tehnološku disciplinu što posebno dolazi do izražaja pri zavarivanju jer se premalim ili prevelikim unosom topline ili odabirom neodgovarajućeg dodatnog materijala, te lošom tehnologijom zavarivanja degradiraju mehanička svojstva zavarenog spoja. Svaki plinovod, ili cjevovod, je čvrst koliko i njegov najslabiji zavareni spoj.

Gledjući s ergonomske i humane strane, rokovi i trase diktiraju tempo izgradnje koji ponekad zna biti pretežak za zavarivača. Teški vremenski uvjeti, rad u prisilnim položajima, toplina od predgrijavanja cijevi, brušenje međuprolaza i čišćenje od troske koji su nužni za osiguravanje kvalitete zavarenog spoja stvaraju vrlo teške radne uvjete u kojima greške nastaju zbog umora zavarivača. To svakako dodatno otežava činjenica da se traže sve kvalitetniji spojevi pri čemu se granica prihvatljivosti podiže sve više. U takvim uvjetima teško je zadržati potpunu koncentraciju i osigurati kvalitetu i zato se nastoji konvencionalne ručne tehnike zamjeniti sustavima za automatsko zavarivanje, pri čemu je radno opterećenje operatera znatno manje.

To potvrđuje i primjena automatskog zavarivanja na magistralnom plinovodu od Pule do Karlovca duljine 191km gdje su usprkos zahtjevnoj trasi i teškim radnim uvjetima postignuti izvrsni rezultati i to u iznimno kratkom roku od 7 mjeseci. Postignuta kvaliteta zavarenih spojeva znatno pridonosi očuvanju strukturalnog integriteta plinovoda u ekološki osjetljivom području i naseljenim područjima i to na objektu koji povezuje nalazišta plina u Jadranskom moru s plinsko distributivnim sustavom RH.

2. Automatsko elektrolučno zavarivanje cjevovoda u plinskoj zaštiti-usporedba s konvencionalnim postupcima

Paralelno s povećanjem intenziteta izgradenje cjevovoda bilježi se i značajan razvoj sustava za automatsko elektrolučno zavarivanje cjevovoda iako se u novije vrijeme javljaju i hibridni sustavi laser-MAG [1]. Orbitalno TIG automatsko zavarivanje cijevi malih promjera već je dobro poznato u praksi i koristi se prvenstveno u procesnoj industriji i kotlogradnji. Međutim, za zavarivanje cijevi velikih promjera koristi se postupak MAG zavarivanja. Da bi se postigao tehnološki ispravan i ekonomski isplativ sustav za automatsko zavarivanje cjevovoda nužno je integrirati kvalitetan izvor struje, glave za zavarivanje (koje se često sastoje od više pištolja, sustav za dovod žice, vodilice (koje omogućuju kretanje glava po obodu cijevi) i upravljački sustav. Operater je zadužen za pozicioniranje sustava, puštanje u pogon i kontrolu pri radu. Izuzetno je važno uz osnovne parametre zavarivanja prilagoditi i sastav plinske mješavine koja znatno utječe na geometriju i kvalitetu zavarenog spoja.

U novije vrijeme vidljivo je da se koriste sofisticirani mikroprocesorski upravljani izvori struje koji pomoću ugrađenog algoritma reguliraju prijenos metala u električnom luku te osiguravaju stabilnost procesa. Sofisticirani sustavi za vođenje glave za zavarivanje omogućuju i njihanje što je posebno značajno kod zavarivanja popune i završnih prolaza.Uobičajeno se pri zavarivanju korijenskog prolaza primjenjuju podloške, međutim kod novih inaćica moguće je zavarivanje korijenskog prolaza bez podloške što smanjuje rizik od uključaka bakra koji se mogu javiti u korijenskom prolazu kada se za materijal podloški koristi bakar. Također je vidljivo da se za automatske sustave razvijaju i namjenski dodatni materijali tj žice i praškom punjene žice te posebni omjeri plinskih mješavina kako bi se u što boljoj mjeri iskoristili potencijali automatskog zavarivanja.

Uzimajući u obzir ekonomsko tehnološke parmetre automatsko zavarivanje ima niz prednosti pred konvencionalnim ručnim tehnologijama, ali postoje i ograničenja koja treba uzeti u obzir pri projektiranju tehnologije zavarivanja.

Kao prednosti moguće je navesti slijedeće:

- Veća količina nataljenog materijala u jedinici vremena.
- Veća brzina zavarivanja.

- Veća produktivnost.
- Manji broj grešaka i popravaka.
- Bolja kontrola geometrije zavara za svaki prolaz zasebno pri čemu se postiže ujednačenost oblika zavara i penetracije.
- Bolja kontrola unosa topline što je posebno bitno kod čelika visoke čvrstoće jer je u uskim granicama moguće utjecati na unos topline a i omogućena je visoka ponovljivost što garantira minimalna odstupanja mehaničkih svojstava.
- Veća iskoristivost dodatnog materijala jer nema bacanja polupotrošenih elektroda niti rezanja kraja žice zbog izvođenja nastavaka. Također je bitni naglasiti da se optimiranjem prijenosa metala u električnom luku minimalizira štrcanje koje zahtjeva i kasnije čišćenje brušenjem.
- Eliminacija nastavaka jer je moguće svaki sloj zavariti u jednom prolazu, za razliku od elektroda ili poluautomatskog zavarivanja.
- Manje brušenja u odnosu na zavarivanje celulozno obloženom elektrodom zbog eliminacije specifičnog nadvišenja koje nastaje zavarivanjem korijenskog prolaza.
- Neovisnost o tržištu zavarivača gdje je npr. za REL zavarivanje celulozno obloženom elektrodom vrlo često teško naći dovoljan broj zavarivača da bi se postigli traženi rokovi i uvjeti.
- Manja količina vodika u metalu zavara u odnosu na celulozno obložene elektrode što ima posebnu važnost kada se uzme u obzir primjena čelika visoke čvrstoće koji su posebno osjetljivi na pojavu hladnih pukotina.
- Izbacivanje tobolaca za grijanje elektroda i posebnih uvjeta čuvanja i pripremanja specifičnih za obložene elektrode s bazičnom oblogom.

Comment [T1]: Odgovor na pitanje br.1

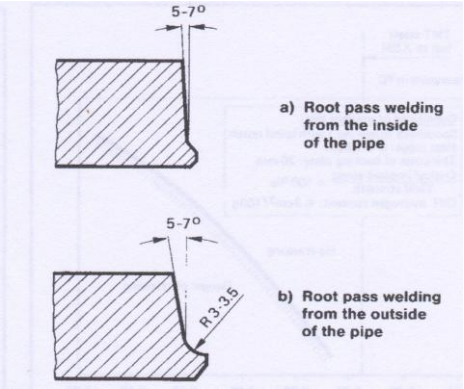
S druge strane prisutni su slijedeći problemi:

- Skupa i složena oprema.
- Ovisnost primjene o složenosti trase, jer za specijalne točke su još uvijek neophodni zavarivači.
- Mogući su problemi s plinskom zaštitom kod jakog vjetra i lošeg vremena.
- Znatno veći zahtjevi za održavanjem opreme.
- Zahtjeva se jaka logistika.

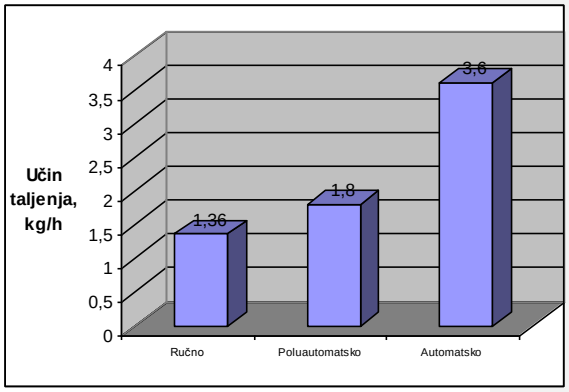
Comment [T2]: Odgovr na pitanje br.2

Opravdanost primjene je potvrđena i u samoj praksi gdje se automatsko zavarivanje magistralnih distributivnih sustava sve intenzivnije koristi pri izgradnji plinoopskrbnih sustava i to na svim kontinentima.

Automatsko zavarivanje MAG postupkom zahtijeva velika ulaganja u radne stanice i logistiku, kao i u obuku operatera. Također, priprema spoja mora biti jako kvalitetna, te nema fleksibilnosti ako postoji npr. nejednolik razmak ili smaknuće cijevi. Uobičajena priprema spoja za automatsko MAG zavarivanje prikazana je na slici 1. gdje se razlikuje zavarivanje korijena s unutarnje i vanjske strane uz primjenu bakrene podloške. Vidljivo je da se ne primjenjuje klasična V priprema kao kod zavarivanja REL postupkom. Za dobru pripremu, obavezna je primjena unutarnjih centralizera. Kvaliteta zavara je dobra i ujednačena, međutim poteškoće nastaju ako dođe do problema s radnim stanicama, te tada nema napredovanja u izgradnji cjevovoda. Iz tog razloga nužno je osigurati rezervne radne stanice koje se mogu upotrijebiti ako dođe do zastoja uslijed kvara.



Slika 1. Uobičajena priprema za automatsko MAG zavarivanje cjevovoda [2]

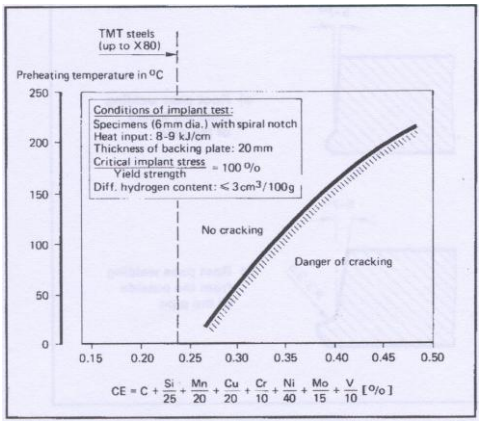


Slika 2. Usporedba učina pri automatskom, poluautomatskom i ručnom zavarivanju [3]

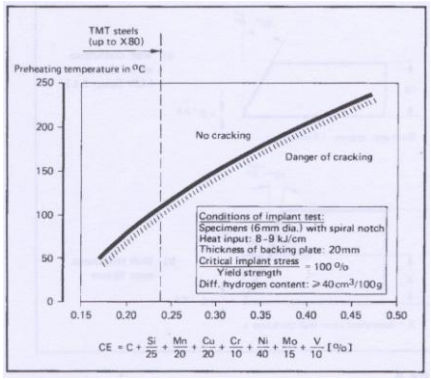
Automatsko zavarivanje, ima u usporedbi s ručnim i poluautomatskim zavarivanjem najveći učin taljenja, najmanji gubitak osnovnog materijala i najveći operativni faktor, tj. najveća je iskoristivost uređaja i opreme, slika 2. Često prekidanje luka kao i izvođenje nastavaka kod REL zavarivanja uzrokuju veći broj grešaka, gubitak dodatnog materijala i do 30% te najniži operativni faktor. Međutim, ulaganja u automatski postupak zavarivanja su daleko najveća, fleksibilnost je

minimalna, a traži se i vrhunska priprema spoja. Prednosti automatskog zavarivanja dolaze do izražaja na velikim projektima, s većim promjerom cijevi i debljinom stijenke.

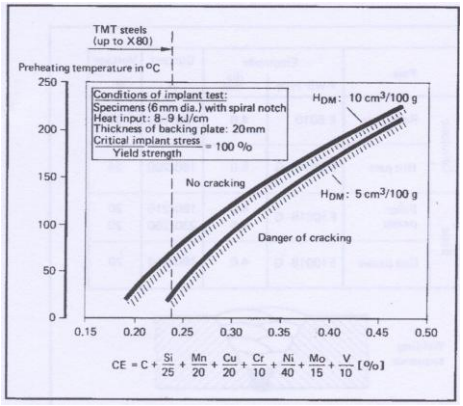
Ako se na temelju CE komparira opasnost od pojave hladnih pukotina za automatski MAG postupak i konvencionalno REL zavarivanje celulozno i bazično obloženim elektrodama vidljivo je da se za čelike do klase X80 javljaju znatne razlike. Naime, kod celulozno obloženih elektroda količina difundiranog vodika iznosi i više od 40ml/100g zavara dok je kod bazično obloženih elektroda to do 5ml/100 g zavara. Za MAG postupak je ta količina ispod 3 ml/100 g zavara. To direktno utječe na temperaturu predgrijavanja i opasnost od pojave hladnih pukotina kako je prikazano na slikama 3., 4. i 5. [2]



Slika 3. Ovisnost temperature predgrijavanja o CE za MAG postupak[2]



Slika 4. Ovisnost temperature predgrijavanja o CE za celulozno obložene elektrode[2]



Slika 5. Ovisnost temperature predgrijavanja o CE za bazično obložene elektrode[2]

Zahtjevi za predgrijavanjem su znatno veći kod REL zavarivanja celuloznom i bazičnom elektrodom, dok je za MAG postupak vidljivo da se i bez predgrijavanja postižu uvjeti pri kojima nema opasnosti od pojave hladnih pukotina. Međutim, iz predostrožnosti zbog moguće kontaminacije vodikom iz vlage i nečistoća preporuča se predgrijavanje na minimalno 50°C.

Također, ako se zahtjevaju niske tvrdoće do 248 HV 10, pogotovo za cjevovode koji transportiraju plin s korozijski agresivnim komponentama, temperatura predgrijavanja iznosi minimalno 100°C.

Iz ovog je vidljivo da primjena automatskog MAG zavarivanja nema samo pozitivan ekonomsko tehnološki učinak već utječe i na integritet i mehanička svojstva zavarenog spoja što je posebno važno kod visokočvrstih čelika.

3. Oprema i logistika za automatsko zavarivanje

Oprema i izvori struje imaju izuzetno veliku važnost kod automatskog zavarivanja. Uz standardne zahtjeve, posebno je važna robustnost sustava. Slika 6. shematski prikazuje osnovne elemente sustava za automatsko zavarivanje. Ovisno o proizvođaču moguće su manje izmjene u izvedbi. Preferira se i modularna izvedba ovih sustava kako bi se postigla bolja fleksibilnost ovisno o zahtjevima. Sustav za automatsko zavarivanje magistralnih cjevovoda se sastoji od slijedećih komponenti:

- Traktor, koji služi kao transportna i manipulativna jedinica i integralni je dio sustava. Na traktoru se nalaze generatori za struju, izvori struje za zavarivanje, spremnici sa zaštitnim plinom, mješači plina i ostala oprema.
- Agregat za struju pokretan diesel motorom koji mora osigurati električnu energiju ne samo za zavarivanje već i za pomoćne uređaje.
- Izvor struje za zvarivanje koji mora osigurati tražene parametre zavarivanja. Važno je napomenuti da se od ovakvih izvora zahtjeva visoka intermitencija za radne parametre jer se radi automatskom sustavu bez čestih prekida, tj. poželjna je 100% intermitencija za vrijednost radnih parametara.
- Kontrolni sustav koji objedinjuje upravljanje zavarivanjem i gibanjem glave za zavarivanje.
- Terminal za programiranje pomoću kojeg se unose parametri zavarivanja.
- Glava za zavarivanje obavlja glavno gibanje po orbitali uz pomoć vodeće nazubljene letve koja služi kao vodilica. U sklopu glave nalazi se pištolj za zavarivanje, mali kalem s dodatnim materijalom, kontrolni panel za određivanje gibanja tj. brzine i oscilacije njihanja te pogonski elektromotor. Jedan sustav ima dvije glave za zavarivanje pri čemu svaka zavaruje polovinu opsega cijevi. Da bi se poboljšala produktivnost zavarivanja na istu glavu moguće je kod određenih proizvođača montirati i dva pištolja za zavarivanje. To znači da u jednom prolazu glave istovremeno zavarujemo dva prolaza što komplicira i podiže zahtjeve za izvore struje i upravljačke sustave. Međutim, neka istraživanja pokazala su da takav termodinamički ciklus s tandem glavom rezultira boljim mehaničkim svojstvima zavara [1].
- Spremnik zaštitnih plinova s mješačem iz kojeg se dobavlja zaštitni plin. Mješač je potreban jer se često mjenja omjer mješavine za korijenski ili završni prolaz čime se utječe na geometriju zavarenog spoja.
- Zavarivačka kućica ili šator koji služi kao zaštita od vremenskih uvjeta ali u koji su integrirani svi priključci kako bi se minimaliziralo vrijeme pripreme i manipulacije.

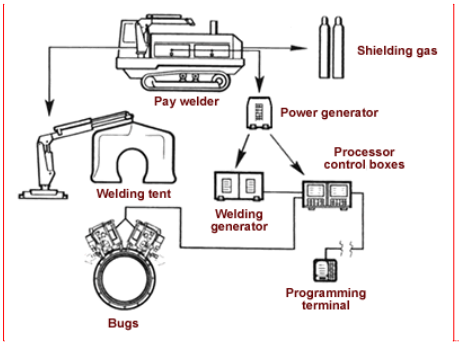
Comment [T3]: Odgovor na pitanje br.4

Comment [T4]: Odgovor na pitanje br.5

Comment [T5]: Odgovor na pitanje br.6

Comment [T6]: Odgovor na pitanje br.7

- Sustav za pozicioniranje i centriranje cijevi koji se većini slučajeva koristi pneumatskim ili hidrauličnim pogonom i u koji može biti integrirana podloga za zavarivanje.



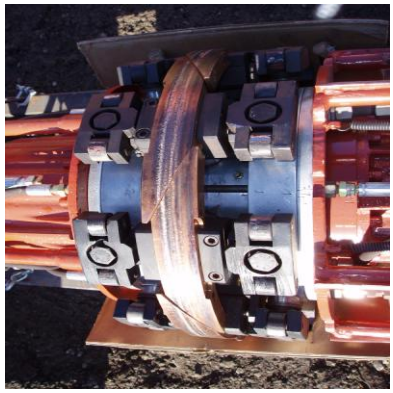
Comment [T7]: Odgovor na pitanje br.3
-Izvor struje
-Zaštitni plin
-Generator
-Programski terminal
-Zavarivački šator
-Automat za zavarivanje
-Stezne naprave,
-...

Slika 6. Shematski prikaz sustava i opreme za automatsko zavarivanje cjevovoda [4]

Slika 7. Glava za zavarivanje

Slika 8. Zaštitni plinovi i mješač plinova

Slika 9. Traktor s ugrađenom opremom



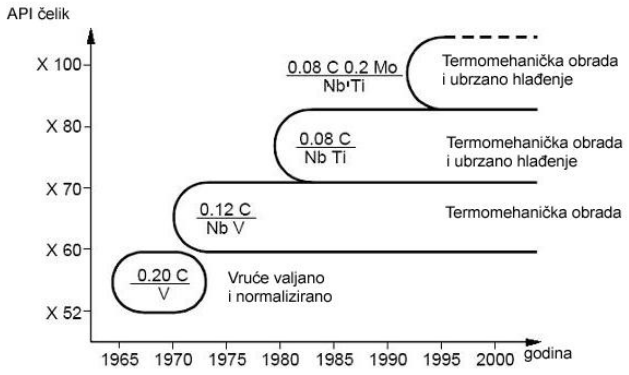
Slika 10. Centralizer s bakrenom podloškom

4. Moderni čelici za izgradnju magistralnih cjevovoda

Za većinu današnjih zahtjeva za transport nafte i plina najčešće se koriste čelici gradacije X70 i X80 prema API 5L, dok se X90 i X100 tek uvode u primjenu. Čelici grupe X70 imaju dobra mehanička svojstva i odličnu zavarljivost. To je rezultat razvoja na području metalurgije i termomehaničke obrade. Smanjenje udjela ugljika ispod 0,1%, mikrolegiranje s Nb, V ili Al u korelaciji s parametrima toplinske obrade rezultiralo je sitnozrnatom strukturom odličnih mehaničkih svojstava. X70 čelici se svakodnevno primjenjuju za izgradnju cjevovoda te u manjoj mjeri i u off-shore postrojenjima. Međutim, zbog njihove mikrostrukture potrebno je definirati parametre zavarivanja u uskim područjima kako bi se omogućilo dobivanje zavarenih spojeva zadovoljavajućih mehaničkih svojstava. U proteklih 30 godina strahovito su povećani zahtjevi za materijale od kojih se grade cjevovodi. Cjevovodi velikih promjera danas transportiraju 75% svjetske proizvodnje prirodnog plina i to na najekonomičniji i najsigurniji način. Sedamdesetih godina vruće valjanje i normalizacija zamijenjeni su termomehaničkim valjanjem što je omogućilo dobivanje gradacije X70 uz mikrolegiranje niobijem i vanadijem te uz smanjeni udio ugljika do 0,12%. Daljnjim mikrolegiranjem i unaprijeđenjem termomehaničke obrade uz ubrzano hlađenje dobiveni su čelici gradacije X80 povećane čvrstoće, ali je uz daljnju redukciju ugljika zadržana dobra zavarljivost.

Comment [T8]: Odgovor na pitanje br.8

Comment [T9]: Odgovor na pitanje br.8



Slika 11. Prikaz razvoja čelika za cjevovode tijekom vremena [2]?

Godišnja proizvodnja od 8 milijuna tona cijevi pri čemu su gradacije X70 i X80 najviše zastupljene govori o važnosti daljnjeg razvoja tehnologija zavarivanja i održavanja u eksploataciji. Pri zavarivanju čelika povišene i visoke čvrstoće posebno se mora paziti na kontaminaciju vodikom kako bi se izbjegla mogućnost pojave hladnih pukotina u zoni utjecaja topline. Za izgradnju magistralnog plinovoda Pula-Karlovac primijenjen je čelik API 5L X70 što je i prvi slučaj primjene tog čelika u RH. To je svakako zahtjevalo potpuno novi pristup planiranju izgradnje i zavarivanja cjevovoda što je i u konačnici rezultiralo primjenom automatskog zavarivanja.

Tablica 1. Kemijski sastav čelika X70 primijenjenog za izgradnju plinovoda Pula-Karlovac

Kemijski element	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	Ti	Nb	V
Udio, %	0,0713	1,58	0,016	0,001	0,216	0,027	0,023	0,001	0,019	0,024	0,057	0,056

5. Iskustva pri izgradnji magistralnog plinovoda Pula-Karlovac

Pri izgradnji magistralnog plinovoda Pula-Karlovac na tri dionice primijenjeno je automatsko elektrolučno zavarivanje u plinskoj zaštiti. Nazivni promjer plinovoda je 500mm, radni tlak 75bar a osnovni materijal je API 5L X70.

Primijenjen je MAG 135 postupak i dodatni materijal žica promjera 1mm. Položaj zavarivanja je bio PG, a zaštitni plin čisti CO_2 i mješavina Ar/CO_2 , ovisno o prolazu.

Ukupno je zavareno oko 21500 zavara, od kojih je samo na nekoliko detektirana pogreška što je zahtjevalo provedbu popravaka po propisanoj proceduri. Produktivnost zavarivanja se kretala oko 45-60 zavara na dan, ovisno o težini trase.

Iako su određene dionice prolazile izuzetno zahtjevnom trasom, što je i prikazano na slici 12., dobrom organizacijom i pripremom omogućena je primjena automatskog zavarivanja i u ovim složenim uvjetima. U tablici 2. prikazana je usporedba vremena zavarivanja za automatsko i ručno zavarivanje cijevi promjera 508mm, debljine stijenke 6,8mm.

Tablica 2. Usporedba vremena zavarivanja za automatsko i ručno zavarivanje pri izgradnji plinovoda Pula- Karlovac

Operacija		Automatsko zavarivanje, min	Ručno zavarivanje, min
Pripajanje		-	8
Predgrijavanje (130°C)		7	7
Zavarivanje	1-korijen	1,8	14,2
	2-vrući prolaz	2,2	12,5
	3-prolaz	4,4	16,5
	4-prolaz	-	14,0
	*5-prolaz (samo kod nagiba plinovoda tj. uspona ili spusta)	-	*14,0
Vrijeme zavarivanja		8,4	57,2 *(71,2)
Brušenje (čišćenje)	Nakon zavarivanja korijenskog prolaza	4	4
	Nakon zavarivanja vrućeg prolaza	5	5
Vrijeme za izvođenje 1 zavarenog spoja		24,4	81,2 *(95,2)

Automatsko zavarivanje se izvodilo istovremeno u paru i izvodi ga tim operatera od 1 do 3 zavarivača. Ovisno o konfiguraciji terena automatsko zavarivanje se izvodilo najčešće s dvije ili tri kabine pri čemu se za 1 sat zavarilo od 3 do 7 spojeva. Ručno zavarivanje se također provodilo u paru , tj. s 2 zavarivača.

Priprema spoja za automatsko zavarivanje se provodila strojnom obradom za što je bilo potrebno približno 5 minuta, dok se za ručno zavarivanje provodila brušenjem za što je trebalo približno 30 minuta.

Za automatsko zavarivanje koristio se unutarnji centralizer koji je ujedno i podloga za zavarivanje te je za centriranje bilo potrebno 3 do 5 minuta. Također, odstupanje od kružnosti nema značajan utjecaj na vrijeme potrebno za centriranje. Kod ručnog zavarivanja sa vanjskim stegama vrijeme centriranja iznosi 10 do 15 minuta pri čemu odstupanje od kružnosti ima značajan utjecaj.

Mobilnost prateće mehanizacije jako ovisi o konfiguraciji terena , tako da su se kod ekstremnih nagiba koristila kolica za transport cijevi, slika 13.

Slika 12. Detalji trase plinovoda Pula-Karlovac

Slika 13. Kolica za transport cijevi

Slika 14. Priprema za zavarivanje

6. Zaključak

Konvencionalne metode zavarivanja još uvijek predstavljaju značajnu tehnologiju spajanja cjevovoda. Međutim, poluautomatski i automatski postupci dolaze sve više do izražaja, posebno u slučajevima velike duljine cjevovoda, velike debljine stijenke ili ako se radi o specijalnim zahtjevima na unos topline, geometriju zavara i sl. Automatski postupci zavarivanja podižu produktivnost i efikasnost izgradnje cjevovoda, ali i zahtjevaju izuzetnu tehničku logistiku i kvalitetnu pripremu. Velika financijska ulaganja su nužna za nabavu i instalaciju opreme za automatsko zavarivanje. S druge strane, ručno i poluautomatsko zavarivanje se lako mogu prilagoditi raznim tehnološkim zahtjevima i ne zahtjevaju velika financijska ulaganja. Međutim, utjecaj ljudskog čimbenika i potrebe za specifičnom radnom snagom ponekad mogu predstavljati značajne probleme u realizaciji projekta, tako da sve intenzivnija automatizacija zavarivanja cjevovoda predstavlja realnu alternativu.

Primjena modernih materijala i kratki rokovi izgradnje postavili su visoke zahtjeve pri izgradnji magistralnog plinovoda Pula-Karlovac. Međutim, upotrebom automatskog elektrolučnog zavarivanja u plinskoj zaštiti zadovoljeni su svi ekonomsko tehnološki parametri uz završetak gradnje u izuzetno kratkom roku pri čemu se pokazalo da se uz adekvatno planiranje i primjenu modernih tehnologija zavarivanja mogu postići izvanredni rezultati.

7. Literatura

[1] Blackman, S. A., Yapp, D. " Recent developments in high productivity pipeline welding", IIW document XII-1786-2004.

[2] Dueren C., Niederhoff K., Recommended procedure for girth welding of large-diameter pipes, Mannessmann Forschungsinstitut, Duisburg-Huckingen, 1990.

[3] Kralj S., Radošević B., Garašić., Mogućnosti automatizacije pri zavarivanju cjevovoda, Zbornik radova savjetovanja Mehanizacija, automatizacija i robotizacija u zavarivanju i srodnim postupcima, pp 245-252, Zadar, 2005.

[4] .....Službena web stranica tvrtke Pipe Welding Technology, www.pwtspa.com, 2007.

[5]Hammond, J., Blackman, S. and Hudson,M., "Challenges of girth welding X100 linepipe for gas pipelines", Pipe Dreamer's Conference, Application and Evaluation of High-Grade Linepipes in Hostile Environments, Pacifico Yokohama, Japan, 7-8 November, 2002.

[6]Kralj S., Radošević B., Garašić I., Zavarivanje cjevovoda od čelika API 5L X70, Zbornik radova 3. međunarodnog znanstveno-stručnog skupa o naftnom gospodarstvu, Zadar, 2005.

[7] Kralj S., Garašić I., Stručna studija "Ispitivanje zavarljivosti čeličnih cijevi", Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2004/2005.

[8] Kitano,K., Shiraishi, H., Kasatani, T., "Development of Highly Efficient and Unmanned Welding System for Pipeline System", Automation Technology of Arc Welding, IIW Doc.XII-1471-96.

[9] ....Slike iz arhiva FSB, 2006.

INSTALACIJA CNC SUSTAVA ZA KOMBINIRANO REZANJE LASEROM I PLAZMOM

INSTALATION OF CNC SYSTEM FOR LASER AND PLASMA CUTTING

Slobodan Kralj Fakultet strojarstva i brodogradnje

Branko Bauer Zagreb, Ivana Lučića 1.

Toma Udiljak tel/fax 6157124

Ivica Garašić e-mail: fsb.zk@fsb.hr

Kristijan Mihoci

Ključne riječi: laser, plazma, cnc sustav, rezanje

Key words: *laser, plasma, cnc system, cutting*

Sažetak:

U radu je opisana instalacija cnc sustava za kombinirano rezanje laserom i plazmom u Laboratoriju za zavarivanje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Navedene su tehničke karakteristike Nd:YAG lasera konstantne snage 2 kW i impulsne snage 5 kW, koji se primjenjuje za rezanje limova do 4 mm debljine, te tehničke karakteristike 120 amperske plazme koja omogućuje rezanje limova do 20 mm debljine, a visokom preciznošću "high-definition" može rezati do 8 mm debljine. Također su navedene tehničke karakteristike cnc stola za rezanje s visokom dinamikom, koji omogućuje visoko precizno rezanje s brzinama do 20 m/min. Napravljena je provjera točnosti cnc stola pomoću "ballbar" metode te je napravljena usporedba s podacima proizvođača.

Abstract: *Paper describes instalation of cnc system for combined cutting with laser and plasma process. Cnc system is situated in Welding laboratory, at the Faculty for mechanical engineering and naval architecture in Zagreb. Technical data of Nd:YAG laser with continuous power 2 kW and pulse power 5 kW, and technical data of 120 A plasma suorce are mentioned. Laser is used for cutting of theen sheets up to 4 mm thickness, and plasma up to 20 mm. Plasma can also cutt in high-definition quality up to 8 mm thickness. Technical data of cnc cutting table with good dynamical characteristics are also described, which allows precise cutting with cutting speed up to*

20 m/min. Control of table acuracy was done using ball-bar method. Measured data were compared with data given by the manufacturer.

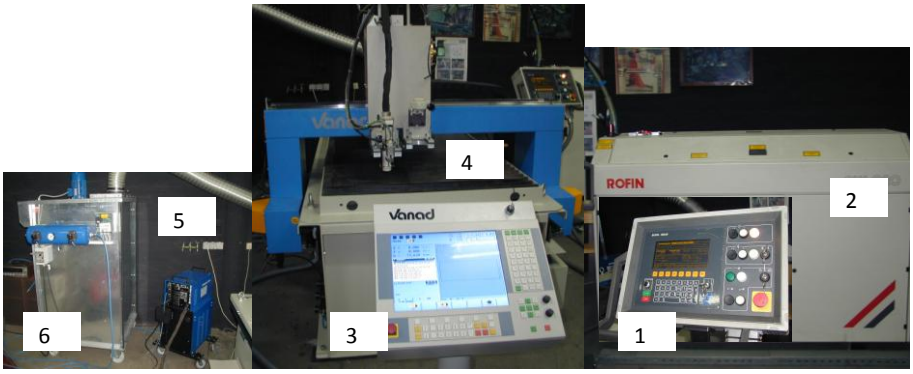
1. UVOD

Laserski izvor, plazma izvor i cnc stol povezani su u sustav kako bi se optimizirale performanse uređaja, nudeći veliku brzinu i pouzdanost. Rezačica je moderne tehnoligije s automatskim sustavom kontrole, kako bi se osigurale superiorne mogućnosti rezanja, te veća fleksibilnost i lakoća upravljanja.

Kada se traži jeftinija varijanta od rezanja laserom, korisnici se sve više okreću rezanju plazmom. Zahvaljujući napretku te tehnologije posljednih godina, danas je moguće rezati tanke materijale s izvrsnom kvalitetom.

2. LASERSKI IZVOR

Za rezanje laserom koristi se Nd:YAG laser ROFIN CW020, proizvođača ROFIN SINAR, slika 1. poz 2. Ručno upravljanje laserom izvodi se pomoću konzole prikazana slikom 1. poz. 1.



Slika 1. Prikaz cnc sustava za rezanje smještenog u Laboratoriju za zavarivanje na FSB-u , Zagreb. 1-upravljačka jedinica lasera, 2-Nd:YAG laser, 3-upravljačka jedinica cnc stola, 4-cnc stol, 5-plazma izvor, 6-odsisni sustav.

Tehničke karakteristike lasera ROFIN CW020

- Valna duljina: 1064 nm
- Nominalna snaga: 2000W

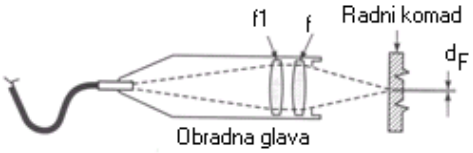
- Način rada:
  - kontinuirani cw, prosječna snaga: 2000 W
  - impulsni pw sa opcijom superpuls i opcijom oblikovanja impulsa, prosječna snaga: 2000 W, vršna snaga: 5000W, frekvencija: 10 - 500 Hz, najmanja dužina impulsa: 1ms

- Kvaliteta snopa
  - promjer snopa na izlazu iz rezonatora, d_0: 18 mm
  - kut divergencije, θ_0: ≤8 mrad
  - mod: multimod
  - polarizacija: snop nije polariziran
  - produkt parametara laserskog snopa $\frac{d_0}{2} \cdot \frac{\theta_0}{2}$ = 36 mm mrad
  - kvaliteta snopa M^2 = 106,3

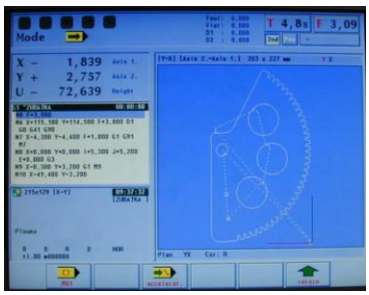
    M^2-mjera za kvalitetu snopa koja pokazuje koliko je izlaz laserskog snopa iz rezonatora blizu idealnog difrakcijom ograničenog izlaza snopa.

Laserski snop iz Nd:YAG lasera vodi se kroz optičko vlakno promjera 600 μm, do obradne glave u kojoj se fokusira na površinu radnog komada pomoću optike za fokusiranje, slika 2.:

- žarišna duljina leće kolimatora f_1 = 120 mm,
- žarišna duljina leće za fokusiranje snopa na radni komad f = 120 mm i 80 mm,
- promjer žarišne točke d_F = 0,6 mm i 0,4 mm.



Slika 2. Fokusiranje laserskog snopa u obradnoj glavi.



Slika 3. Kontrolni cnc sustav VANAD MEFI.

Manji promjer žarišne točke daje veću gustoću snage na površini, a time bolju kvalitetu i veću brzinu rezanja. Obradna glava pričvršćena je na Z os stola za rezanje, koji izvodi relativno gibanje u odnosu na radni komad.

3. PLAZMA IZVOR

Za rezanje plazmom koristi se izvor za visokoprecizna toplinska rezanja, SPARCIN 900M, proizvođača SPT Plasmateknik AB, slika 1. poz. 5.

Metali debljine od 1 do 20 mm mogu se rezati sa strujama od 20 to 120A, s intermitencijom 100%. Tanki limovi do 8 mm debljine mogu se rezati vrlo precizno u "high definition" klasi, dok je maksimalna debljina rezanja 28 mm.

Plazma sustav koristi tehničke plinove, kisik, dušik, argon, vodik i njihove mješavine, što daje optimalne rezultate kod svih vrsta metala. Također je moguće koristiti zrak. Izvor je konstruiran sa inverterskom tehnologijom i ima jedinstvene mogućnosti integriranja s robotiziranim i vrhunskim cnc sustavima. Upravljanje i kontrola glavnog luka, pilot luka, napona luka i struje rezanja izvodi se automatski, što omogućuje održavanje konstantne kvalitete reza. Na LCD ekranu, konzole za upravljanje i programiranje, prikazane su trenutno podešene vrijednosti, slika 1. poz. 3.

Comment [T10]: Odgovor na pitanje br.9

4. CNC STOL

Vođenje rezne glave lasera i plazma pištolja izvodi troosni pozicioni cnc sustav-stol, PROXIMA KOMPAKT 10/20 proizvođača VANAD, slika 1. poz. 4. PROXIMA KOMPAKT 10/20 je portalna rezačica s dvostranim sinkroniziranim pogonom, s tri pogonska servo motora. Dvostrani sinkronizirani pogon omogućava visoku točnost rezanja, dulji vijek trajanja i vrlo malo odstupanje od idealne geometrije rezanja. Maksimalna brzina pozicioniranja i rezanja iznosi 20 m/min. Radno područje stola iznosi 1050 x 2200 mm. Rezolucija iznosi 0,01 mm, a točnost ponavljanja i pozicioniranja iznosi +/- 0,05 mm. Za izvođenje vertikalnog gibanja brzinom do 8 m/min, postoje dvije Z osi, jedna za lasersku glavu, a druga za plazma pištolj. Svaka Z os opremljena je senzorikom za automatsko održavanje udaljenosti između sapnice i lima, s točnošću +/- 0,15 mm. S donje strane stola nalazi se segmentni odsis plinova pomoću filterskog sustava IPERJET, slika 1. poz. 6. [1]

5. CNC UPRAVLJANJE

Velikim brzinama i izvrsnim dinamičkim karakteristikama stola upravlja suvremen kontrolni cnc sustav VANAD-MEFI, slika 3. To je dvostruki 867 upravljački sustav s dva Intel procesora i zajedničkom sabirnicom. Kontrolni sustav osigurava optimalne tehničke parametre, kao i visoku točnost, preciznost i dinamiku prilikom promjene smjera ili brzine rezanja. Navedeni kontroler namjenjen je za upravljanje i kontrolu laserskih rezačica, a može se koristiti i kod visokopreciznih plazma rezačica. Visoka produktivnost rezanja podržana je značajno reduciranim vremenom podizanja obradne glave, te ubrzanim namještanjem početne visine bušenja što povećava produktivnost približno 30% u odnosu na klasične tipove upravljanja plazma pištoljem. Posebno je važno upravljanje na početku i kraju rezanja, posebno kod unutarnjih kontura, te upravljanje gibanjem po kutevima. Prihvat plazma pištolja i laserske glave izveden je sa zaštitom od kolizije, kako ne bi došlo do oštećenja u slučaju udara u radni komad. [2]

6. PRINCIP RADA

Programiranje kontura za rezanje

U memoriji računala postoje standardne konture odnosno ponuđeni programi najčešće korištenih oblika predmeta koje treba izrezati. Kada se izabere geometrijski oblik predmeta, potrebno je upisati brzinu rezanja, dimenzije predmeta, način započinjanja reza te da li se želi izrezati rupu ili vanjsku konturu. Kada se reže više jednakih komada, funkcija krojenja omogućava optimalno iskorištenje površine ploče. Također se mogu koristiti tehnološke tablice za automatsko podešavanje uvjeta rezanja. Za dobivanje točnih dimenzija potrebno je odrediti kompenzaciju širine reza. Kompenzacija rezanja u kutevima i radijusima sukladno debljini lima koristi se da ne dođe do propaljivanja, odnosno pada kvalitete rezanja na tim mjestima.

Kada se želi izrezati kontura složenog geometrijskog oblika koju je potrebno programirati, koristi se suvremeni programski paket proizvođača LANTEK za CAD/CAM pripremu programa za toplinsko rezanje. Programirana kontura može se pohraniti u računalu. Tako kreirana kontura, može se učitati u računalo cnc stola pomoću diskete ili preko mrežnog priključka.

Parametri rezanja plazmom

Prije početka rezanja potrebno je odabrati plinsku mješavinu ovisno o vrsti materijala koji se reže. Zatim je potrebno ovisno o debljini lima odabrati promjer sapnice za rezanje. Na raspolaganju su sapnice promjera od 0,7 do 1,4 mm. Potrebno je podesiti tlak plina za rezanje. Zatim treba podesiti visinu i trajanje bušenja početne rupe, te visinu i brzinu rezanja. Brzinu rezanja moguće je mijenjati u toku procesa rezanja okretanjem za to predviđenog gumba. Na kvalitetu reza još utječu istrošenost katode, a najviše istrošenost sapnice.

Comment [T11]: Odgovor na pitanje br.10

Parametri rezanja laserom

Fokusirani snop prolazi kroz sapnicu promjera ~1 mm. Položaj žarišta snopa z, nalazi se na površini radnog komada ili malo ispod (z= od 0 do –0,5 mm). Udaljenost sapnice od radnog komada iznosi 0,5 do 1 mm. Mlaz plina iz sapnice sudjeluje u procesu rezanja ispuhujući rastaljeni metal, te štiti optiku za fokusiranje od štrcanja i dima. Fokusna optika ujedno je gornji dio komore kroz koju se stlačeni plin dovodi do sapnice, slika 4.

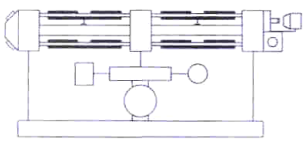
Comment [T12]: Odgovor na pitanje br.11

Položaj žarišta u odnosu na površinu materijala z, mm

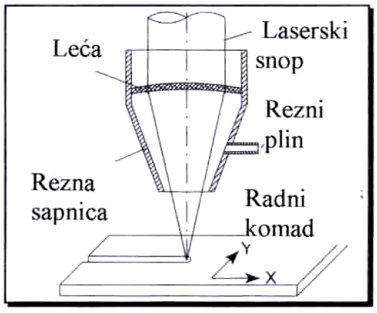
Položaj žarišta i razmak sapnice od radnog komada imaju kod rezanja laserom najznačajniju ulogu. Svaki pomak od namještene vrijednosti odražava se na pogoršanju kvalitete reza, zato je upotreba senzori za kontrolu položaja žarišta, odnosno udaljenosti sapnice od radnog komada, od presudnog značenja. Na slici 5. prikazani su položaji žarišta u ovisnosti o vrsti i debljini materijala.

Na slici 4, prikazani su najvažniji utjecajni parametri na proces laserskog rezanja.

rezonator



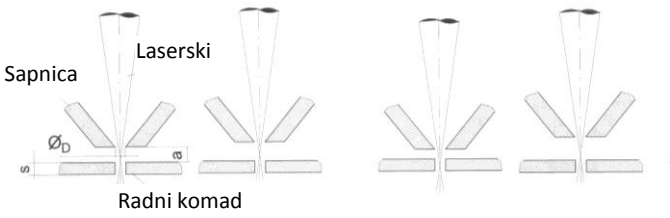
obradna glava



Nazivna snaga lasera, P_L W	vrsta materijala
Struktura snopa, TEM mod	debljina materijala, s mm optika za fokusiranje (promjer žarišta, d_F mm)
Polarizacija snopa	**položaj žarišta u odnosu na površinu materijala z, mm**
Način rada- kontinuirani ili	
impulsni	**promjer sapnice za rezanje (0,5 do 2 mm), $Ø_D$ mm**
	centriranost snopa u sapnici **udaljenost sapnice od radnog komada (0,3 do 1 mm), a mm**
	plin za rezanje (vrsta – O_2, N_2, zrak, čistoća, tlak)
	v (m/min) – brzina rezanja

Slika 4. Pasivni i **aktivni** procesni parametri u sustavu za lasersko rezanje.

Materijal	nelegirani čelik	nelegirani čelik	INOX 1.4301 Al - legure	Drvo PMMA
s mm	do ~ 10	više od ~ 10	do ~ 6	do ~ 50
a mm	0,8 do 1,2	1,0 do 1,5	0,7 do 1,0	1,0 do 2,0
±z mm	0,0	+0,5 do +1,0	~ -s + (~10%·s)	~ -1/2 ·s
Plin za rezanje	O_2	O_2	N_2	N_2 / zrak
$Ø_D$ mm	1,0 do 1,5	1,2 do 2	1,0 do 2,0	1,5 do 2,0



Slika 5. Pregled procesnih parametara ovisno o vrsti i debljini materijala.

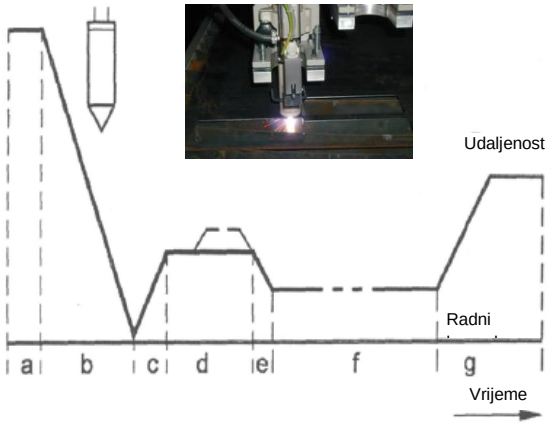
Postupak rezanja

Kada je startan program za rezanje, stroj se pomiče do prvog reza odnosno rupe koju mora probušiti u materijalu da bi od nje rezanje moglo započeti. Rezna glava lasera ili plazme, ovisno s kojom se reže, primiče se materijalu, slika 6. Na Z osi nalazi se pneumatski senzor. Kada senzor dotakne površinu materijala, zatvara se električni krug i računalo je obavješteno da je rezna glava postavljena na visinu bušenja, koja je viša od visine rezanja kako bi se spriječilo štrcanje vrućeg metala direktno u sapnicu. Kad završi bušenje, glava se pomiče na visinu rezanja i započinje rezanje. Optimalna visina bušenja odnosno rezanja, te optimalna brzina rezanja ovise o vrsti plinske mješavine i materijalu koji se reže.

Kad jednom započne rezanje plazmom, udaljenost između vrha pištolja i površine materijala održava se očitavanjem napona prenesenog električnog luka, u procesu koji se zove automatska regulacija visine. U pravilu, limovi nisu potpuno ravni, a pogotovo tanki limovi. Za postizanje visoke kvalitete reza važno je održavati konstantnu udaljenost između pištolja i površine materijala pomoću odgovarajućeg sustava automatske regulacije. Napon u luku se stalno provjerava, a očitanja se koriste za podešavanje Z osi prema gore ili dolje ovisno o očitanom naponu. Rezultat je kvalitetan rez koji ne zahtijeva intervenciju korisnika.

Comment [T13]: Odgovor na pitanje br.12

Kod rezanja laserom koristi se posebni senzor za kontrolu udaljenosti između pištolja i površine materijala, jer u laserskom snopu nema napona, a postupak odnosno koraci rezanja jednaki su kao kod rezanja plazmom.



Legenda:

a – početni položaj pištolja

b – taktilno pronalaženje površine lima

c – podizanje na visinu uspostavljanja luka

Slika 6. Tijek gibanja pištolja kod cnc upravljanog rezanja plazmom ili laserom.

8. POVEZIVANJE LASERA S CNC STOLOM

Laserom se može upravljati ručno ili automatski pomoću vanjskog cnc sustava. Kad se izabere automatska kontrola, ručno upravljanje laserovom konzolom više nije moguće. Uključivanje lasera i sigurnosnog prekidača izvodi se ručno pritiskom na tipku na konzoli cnc stola. Kada se snaga stabilizira, nakon približno 5 s, starta se program za rezanje, pritiskom na tipku start. Nadalje, cnc sustav izvođenjem naredbi iz programa za rezanje upravlja laserskim izvorom. Kad rezna glava dođe u položaj za bušenje, po shemi prikazanoj slikom 6., otvara se ventil plina za rezanje i procesni prekidač. U tom trenutku laserski snop udara u radni komad i počinje bušenje. Z os se spušta na visinu rezanja i započine gibanje po konturi namještenom brzinom rezanja. Na kraju konture, isključuje se plin i procesni prekidač, kako bi se rezna glava pomaknula do slijedeće konture. Nakon što su izrezani svi predviđeni komadi, na cnc konzoli ručno se isključi laser, ali ne potpuno već laser ostaje raditi u praznom hodu, sa snagom 0 W "simmer mode". Sada se može promijeniti ploča.

Laser ima nekoliko sučelja preko kojih se može povezati s cnc sustavom. Najvažnije je sučelje X52, na kojem se nalaze kontakti na koje je potrebno dovesti signale za paljenje lasera i upravljanje prekidačima.

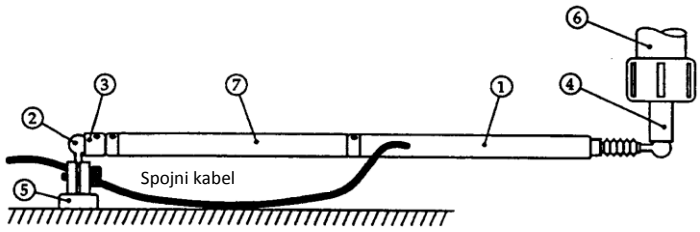
Također je važno sučelje X40, koje služi za odabir impulsnih programa i programa s kontinuiranom regulacijom snage lasera sa cnc konzole odnosno iz programa za rezanje. Laserski programi pišu se na laserovoj konzoli, gdje ostaju memorirani pod brojem, a cnc sustav ih poziva u toku rezanja. Pod laserskim programom podrazumjeva se režim rezanja.

U toku procesa rezanja moguće je automatski pozivati različite laserske programe ovisno o tome na kojoj se poziciji nalazi rezna glava. Tako npr. kod rezanja pravokutnika trebamo tri laserska programa, jedan za bušenje, drugi za rezanje stranica pravokuta i treći za rezanje kutova. Prilikom bušenja važno je da rastaljeni metal ne špricne na sapnicu, pa se obično odabire manja snaga nego za rezanje stranica. Također je u kutu potrebno aktivirati laserski program s manjom snagom, kako ne bi došlo do propaljivanja lima, uslijed zaustavljanja i ponovnog ubrzavanja rezne glave. Za kompliciranije konture imamo na raspolaganju maksimalno 64 programa iz memorije lasera.

9. PROVJERA TOČNOSTI CNC SUSTAVA POMOĆU "ballbar" METODE

Mjerenja točnosti stroja za plazma i lasersko rezanje provedeno je mjernim sustavom "Ballbar". Ovim sustavom točnost se ispituje tako da se stroj kreće po kružnici zadanog promjera pri čemu sustav preko mjernog pretvarača zapisuje vrijednosti promjera te zapisuje određene koordinate [3].

Najvažniji čimbenik u Renishaw postupku s kružnim testom je precizni linearni pretvarač, koji se može rastezati i stezati u području oko ± 2,5 mm, s mjernim područjem od ± 1 mm. "Ballbar" sustav daje električni signal koji je moguće snimati i obrađivati. "Ballbar" mjerna šipka ima nominalnu duljinu 150 mm, a može se prilagoditi za veće područje pomoću produžnih nastavaka. U ovom testu su korištene duljine od 150, 300 i 450 mm. Prikaz postavljanja sustava s objašnjenjem je prikazan na slici 7.



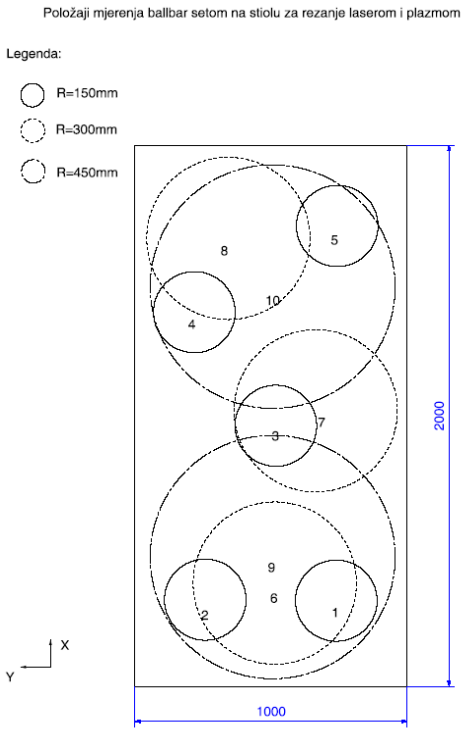
Dijelovi sustava:

1. Ballbar mjerni pretvarač
2. Kuglični zglob (nosač vrha)
3. Magnetska šalica vrha
4. Magnetska šalica alata
5. Magnetski držač vrha
6. Držač alata
7. Produžna šipka

Slika 7. Način postavljanja sustava za mjerenje

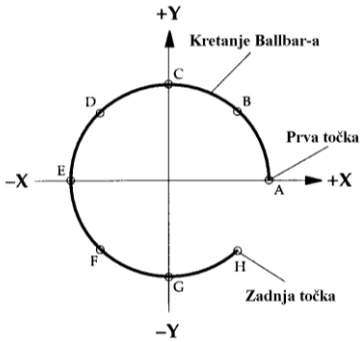
Slika 8. Ballbar mjerni sustav montiran na stol za rezanje plazmom i laserom.

Zbog velikog radnog prostora stroja (radni prostor u XY ravnini 1000X2000 mm) izvršena su mjerenja na više pozicija radnog stola zbog točnosti podataka. Prikaz pojedinih pozicija je prikazan na slici 9.



Slika 9. Položaji mjerenja na radnom stolu stroja za rezanje plazmom i laserom.

Ispitivanje točnosti ponavljanja prema normi ISO 230-2 [4] izvedeno je kretanjem sustava prema slici 10. Mjerenja su izvršena snimanjem podataka u smjeru od točke A do točke H i nazad.



Slika 10. Način snimanja statičkih podataka radi utvrđivanja točnosti ponavljanja prema normi ISO230-2 (prikazana su oba smjera jednom linijom).

Rezultati mjerenja prikazani su u tablici 1. Vrijednosti mjerenja u točkama od A do H označene su brojevima od 0 do 7. Smjer mjerenja od A do H označen je brojem 1, a suprotni smjer od H do A brojem –1.

Tablica 1. Rezultati mjerenja statičkih podataka za promjer kružnice 150mm.

Direction: 1	Direction: -1
Sample Rate: 0.0000	Sample Rate: 0.0000
Best R: 149.68943750	Best R: 149.69150000
Best X: 0.04233421	Best X: 0.04221216
Best Y: -0.00769124	Best Y: -0.00538561
Data-count: 8	Data-count: 8
Gauge Temperature: 20.00000000	Gauge Temperature: 20.00000000
Machine Temperature: 20.00000000	Machine Temperature: 20.00000000
Point Raw-data:	Point Raw-data:
0 -0.3526	0 -0.3982
1 -0.2516	1 -0.3763
2 -0.3619	2 -0.1727
3 -0.3036	3 -0.2503
4 -0.2597	4 -0.3410
5 -0.2099	5 -0.3660
6 -0.3752	6 -0.2140
7 -0.3700	7 -0.3495
Direction: 1	Direction: -1

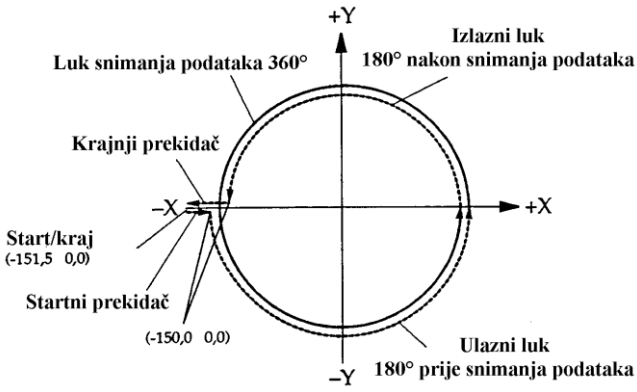
Razlika izmjerenih vrijednosti u svakoj točki pokazuje kolika je točnost ponavljanja, što je prikazano u tablici 2.

Tablica 2. Točnost ponavljanja.

TOČKA	SMJER 1 mm	SMJER –1 mm	RAZLIKA mm
A	0,3526	0,3495	0,0031
B	0,2516	0,214	0,0376
C	0,3619	0,366	-0,0041
D	0,3036	0,341	-0,0374
E	0,2597	0,2503	0,0094
F	0,2099	0,1727	0,0372
G	0,3752	0,3763	-0,0011
H	0,37	0,3982	-0,0282

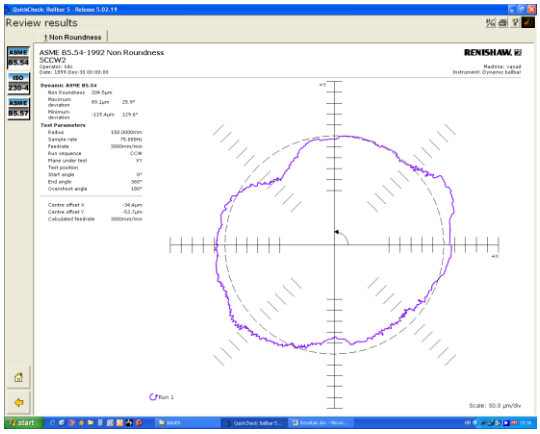
Točnost ponavljanja je ispod deklarirane vrijednosti od +/- 0,05 mm što potvrđuje dane karakteristike stroja od strane proizvođača.

Dinamička snimanja su provedena u položajima prema slici 11. s tri mjerne duljine odnosno radijusa, od 150, 300 i 450 mm prema normama ISO 230-1 [5] i ASME B5.54. [6].



Slika 11. Dinamičko snimanje odstupanja od kružnosti prema normama ISO 230-1 i ASME B5.54

Ispitivanja su provedena dva puta za svaku poziciju u smjeru suprotno od kazaljke na satu i svi rezultati pokazuju oblik snimljene kružnice u obliku "kikirikija" (tzv. "peanut"), slika 12., što upućuje na pogrešku pravokutnosti između osi X i Y. Zbog mjerenja na više položaja utvrđena je pogreška pravokutnosti osi općenitom geometrijskom pogreškom, što znači da nema značajnije pogreške na servodinamičkom sustavu stroja. S obzirom na dobivene rezultate dinamička točnost stroja bi se mogla poboljšati samo poboljšanjem same montaže stroja i dobivanjem točnije geometrije samih osi, ali s obzirom na deklarirane vrijednosti proizvođača stroja i zahtjevima norma stroj udovoljava kriterijima.



Slika 12. Grafički prikaz rezultata mjerenja Ballbar sustavom; promjer kružnice 150mm

10. ZAKLJUČAK

Točnost sustava za rezanje plazmom i laserom bitan je preduvjet iskorištenja tehničkih mogućnosti i kapaciteta plazme i lasera kao izvora energije. Tanke debljine limova, osjetljivi materijali i visoka preciznost izradaka zahtjevaju najbolju moguću radnu karakteristiku sustava za rezanje. S druge strane, visoka točnost stola za rezanje značajno podiže cijenu i troškove održavanja tako da optimalizacija i definiranje sustava kod nabave određuju eksploataciju i uporabu uređaja. Stol za rezanje Vanad koji je instaliran u Laboratoriju za zavarivanje, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu posjeduje optimalne dinamičke i statičke karakteristike koje omogućavaju korištenje istog sustava za rezanje plazmom i laserom. Pomoću «ballbar» sustava izmjerena su odstupanja kod kružnog gibanja, te je ustanovljeno da su izmjerene vrijednosti odstupanja ispod graničnih vrijednosti što potvrđuje deklarirane tehničke karakteristike proizvođača kao i opravdanost primjene za rezanje plazmom i laserom.

11. LITERATURA

[1] ..., Tehnička dokumentacija tvrtke Vanad, PROXIMA COMPACT 10/20, 2005.

[2] ..., Tehnička dokumentacija tvrtke Mefi, Programska aplikacija za kontrolu CNC sustava, 2004/2005.

[3] ..., Tehnički propisi za «Ballbar» mjerni susutav.

[4] ..., ISO 230-2 Test code for machine tools ; Part 2-Determination of accuracy and repeatibility of positioning numerically controled axes, 1997.

[5] ..., ISO 230-1 Test code for machine tools ; Part 1-Geometric accuracy of machines operating under no load for finishing conditions, 1996.

[6] ..., ASME B5.54 Methods for performance evaulation of computer numerically controled machining centers,1998.

PRIMJENA IZMJENIČNE STRUJE KOD MAG NAVARIVANJA LEGURE INCONEL 625

APPLICATION OF ALTERNATING CURRENT FOR MAG CLADDING OF INCONEL 625

Garašić I., Kožuh Z., Kralj S., 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 energetskim objektima koji koriste otpad i biomasu kao gorivo te kao posljedicu generiraju korozijski agresivne dimne plinove, definiraju slož ene proizvodne i tehnološke okvire za navarivanje nikl legurama pri č emu je potrebno zadovoljiti stroge metalurške i gometrijske značajke navarenih slojeva. U praksi se često primjenjuje legura Inconel 625 pri čemu se apliciraju impulsni 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 dijelu načinjena obrada uzoraka navarenih HC-MAG postupkom izmjeničnom strujom u zaštiti plinske mješavine argona i ugljičnog dioksida. Ovaj rad ostvaren je u suradnji s tvrtkama Servus d.o.o. i ĐĐ-TEP d.o.o.

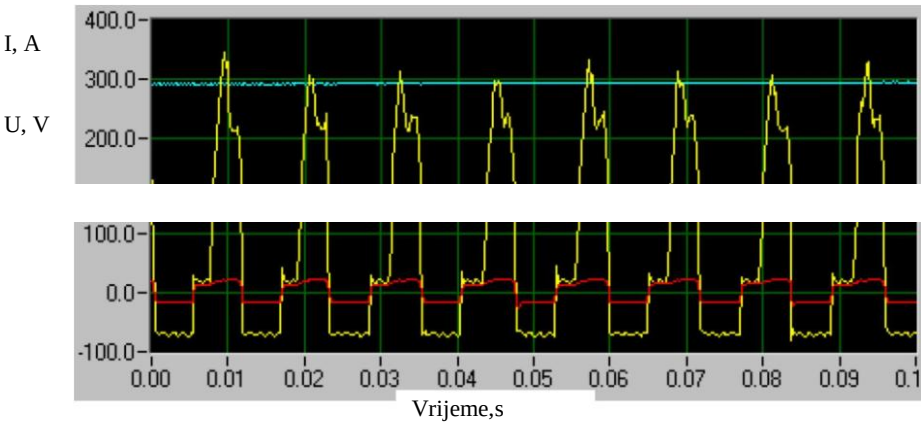
Abstract:
Objects that use waste and biomass as fuel and, as a consequence, generate corrosion aggressive gasses must fulfill intensive requirements and define complex products and technological frames for cladding nickel alloys where strict metallurgical and geometrical requirements have to be completed. 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 CO_2. This paper is a result of a cooperation with the companies Servus d.o.o. and ĐĐ – TEP d.o.o.

1. Uvod

Složeni korozijski mehanizmi kod kotlova za izgaranje otpada i biomase koji su dodatno ubrzani povišenom temperaturom zahtjevaju navarivanje nikal legurama uglavnom serija Inconel 625, 686 i 825 kako bi se povećala korozijska 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 količ ina 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 uobi čajena je primjena pozitivnog polariteta na žici pri čemu se postiže stabilan električni luk u svim područjima prijenosa metala; od kraktih spojeva do štrcajućeg luka te impulsnih struja. Primjena negativnog polariteta na žici uobi čajena 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 za štiti plina nije moguća zbog nestabilnog električ nog luka, štrcanja te loše penetracije i kvašenja š to 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 povr šini 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.

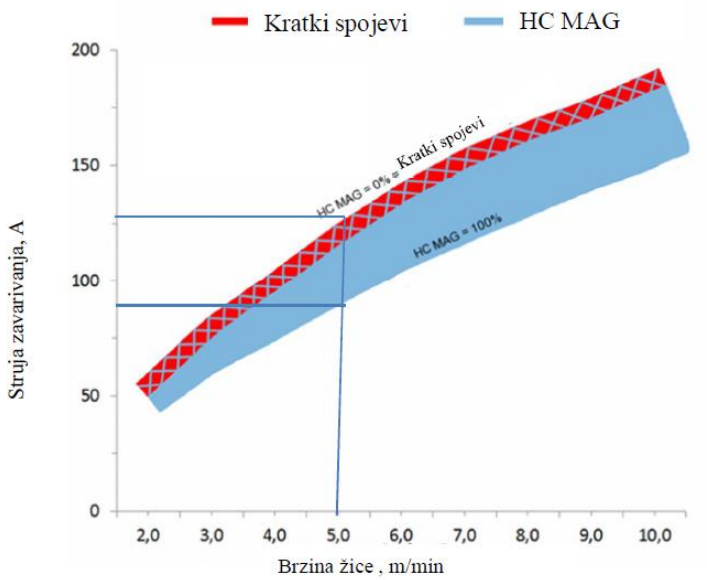


Slika 1. Oscilogram struje i napona kod MAG zavarivanja promjenjivim polaritetom (žuti signal I=f(t), crveni signal U=f(t)) [2]

1.1. 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 izmjenič nom 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 š to znači da uz bitno niži unos topline postižemo 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].

Comment [T14]: Odgovor na pitanje br.13



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%CO_2) [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.

1.2. 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 CO_2 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 CO_2 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 CO_2. Ponovna rekombinacija kemijskih elemenata u CO_2 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 spriječ iti 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 CO_2 ujedno znače i veći oksidacijski potencijal, a time i više troske na površ ini zavara. U suprotnom 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 mikrolegirnih 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 CO_2 rezultiraju bitnim odstupanjima u ponašanju električnog luka i kvaliteti navarenog sloja.

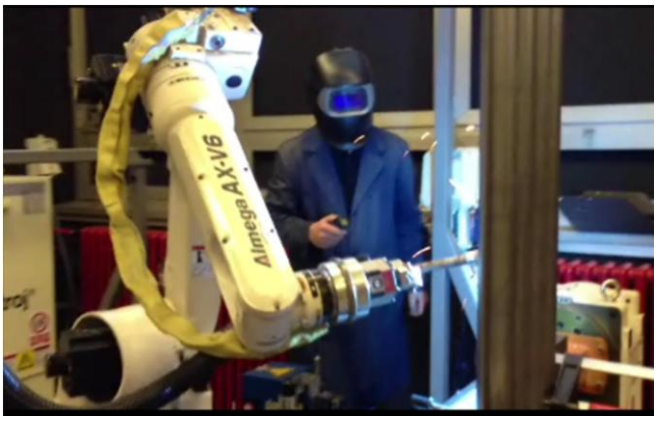
2. Eksperimentalni rad

Obzirom na navedene zahtjeve odabran je izvor struje ESS E2 4000 sa HC –Heat Controled Technology verzijom koja omogućuje primjenu izmjenične struje u kombinaciji sa dodavačem žice ESS DVK 2. Za zaštitni plin odabrana je mješavina argona sa udjelom CO_2 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 izmjenjiva č topline sa zatvorenim sustavom. Navarivanje je provedeno u PG položaju pri čemu su redoslijed i broj prolaza zadržani identično proizvodnim uvjetima. Bitno je napomenuti da je provedeno dorađivanje originalno ugrađene sinergijske upravljačke krivulje kako bi se postigao š to 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 posti žu 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.

Comment [T15]: Odgovor na pitanje br. 15

Tablica 1. Parametri navarivanja na uzorku FSB-04

Prolaz	Jakost struje A	Napon V	Brzina pištolja cm/min	Amplituda njihanja mm	Balans %	Unos topline prema HRN EN 1011-1 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 njihanja na način da budu što sličniji predloženim parametrima jer se bitnim promjenama frekvencije, brzine i širine utječe na stabilno formiranje taline.

Comment [T16]: Odgovor na pitanje br. 14
Osnovni parametri su:
Jakost struje, I, A
Napon, U, V
Brzina pištolja, cm/min
Amplituda njihanja, mm
Balans, %
Napomena: ne treba pamtiti vrijednosti, samo navesti popis parametera kao prikazano.

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,

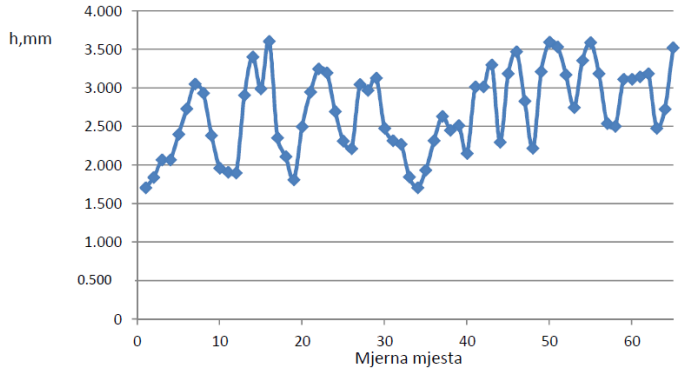
Slaganje površine zavara je uredno, bez oštrih prijelaza i površinskih ugorina. Nerazorna ispitivanja ultrazvukom te ispitivanje penetrantima nije rezultiralo nedozvoljenim indikacijama. Na površini navara nema intenzivne oksidacije niti zacrnjenja. Nije primijećeno naljepljivanje većih kapljica na slobodnu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

Slika 5. Izgled navarene povšine 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 HV 10. Zona utjecaja topline je relativno uska. Nisu primijećene veće nehomogenosti u samom metalu navara, slika 6.

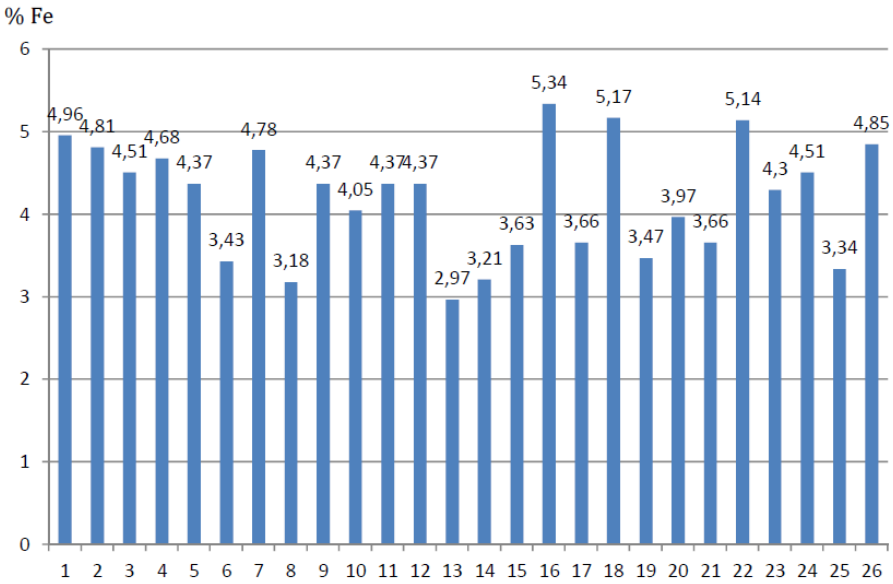
Slika 6. Makroizbrusak uzorka FSB-01

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

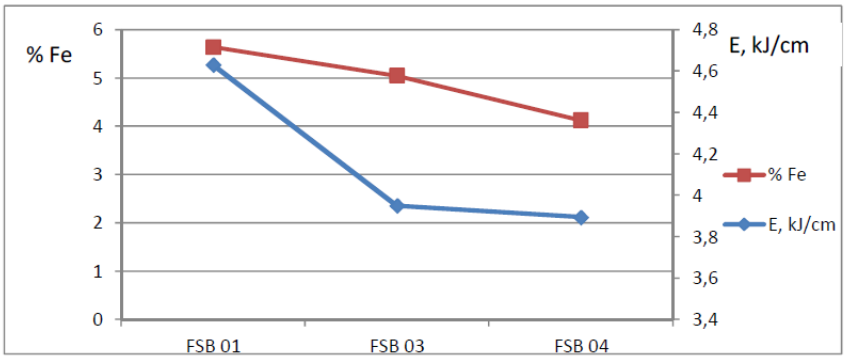
Analizom rezultata određivanja masenog udjela željeza na površini vidljivo je da je samo na tri mjesta na uzorku FSB-04 izmjerena vrijednost viš a od 5 % (i to maksimalno 0,34 %), slika 8. Time je dokazan minimalan unos topline i optimalno miješanje uz relativno pouzdan proces kojim moguće uz kontrolu 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 na čin 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 obuhvać eni 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 HC MAG za navarivanje membranskih stijena žicom Inconel 625 može se zaključiti kako slijedi:

1. 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.

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

3. 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 preklopima 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.

4. 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.

5. Literatura

[1]Adamiec J., High temperature corrosion of power boiler components cladded 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 Controled MAG, 05.09.2013.
[9]Tomi ć 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.

SUVREMENI POSTUPCI MIG/MAG ZAVARIVANJA

MODERN PROCESSES OF MIG/MAG WELDING

Ivica Garašić, Slobodan Kralj, Zoran Kožuh

Fakultet strojarstva i brodogradnje, Katedra za zavarene konstrukcije, I. Lučića 1, HR 10000 Zagreb

Ključne riječi: MIG/MAG zavarivanje, kontrola prijenosa metala, STT, FastROOT, CMT, AC MIG, RMT

Key word: MIG/MAG welding, metal transfer control, STT, FastROOT, CMT, AC MIG, RMT

Sažetak:

U radu su analizirani zahtjevi koji se javljaju u modernoj zavarivačkoj proizvodnji te mogućnosti rješavanja istih uz primjenu modificiranih prijenosa metala u električnom luku a koji se intenzivno javljaju kod suvremenih MIG/MAG postupaka. Ukratko se objašnjeni mehanizmi kojima se realiziraju različiti koncepti prijenosa i razvojne inačice. Predstavljeno je nekoliko karakterističnih suvremenih MIG/MAG postupaka koji koriste modificirane načine prijenosa metala i to u području kratkih spojeva i štrcajućem luku uz opis postupka i specifičnu primjenu.

Abstract:

In this paper requirements in modern welding manufacturing are analysed as well as solution possibilities by means of application modified metal transfer in electric arc. This option is very often used in design of modern MIG/MAG welding processes. Basic physical mechanismes which are being employed in order to establish different metal transfer concepts are briefly described. Several characteristic modern MIG/ MAG welding processes which use modified metal transfer solutions, in short and spray arc modes, are presented as well as their typical applications.

1. Uvod

U proteklih desetak godina kontinuirano se na tržištu i u industrijskoj primjeni pojavljuju „novi“ postupci MAG zavarivanja koji su nastali na temelju zahtjeva za povećanjem produktivnosti, uvođenjem zahtjevnih vrsta osnovnih materijala (visokočvrsti čelici, duplex čelici, pocinčani limovi, nikl legure, aluminijske legure), smanjenjem deformacija, kontroliranim unosom topline, korozijskom postojanošću zavarenog spoja, smanjenjem prskanja, potrebom spajanja tankih limova te mogućnošću za povezivanjem s robotskim stanicama. Ovi zahtjevi rezultirali su pojavom više alternativa MIG/MAG zavarivanja koji se vrlo često deklariraju kao posebni postupci zavarivanja iako se u osnovi radi o postupku MAG (135) ili MIG (131).

Teško bi bilo ne primijetiti da i kod drugih elektrolučnih postupaka, poglavito EPP-a (zavarivanje s više žica, aplikacija AC izvora), TIG-a (posebno oblikovani valni oblici izmjenične struje, automatsko dodavanje dodatnog materijala), plazme (upotreba prašaka) i praškom punjene žice također bilježimo razna poboljšanja. Međutim MIG/MAG postupak je u tom kontekstu u bitnoj prednosti iz razloga što je novim izvorima struje i opreme omogućeno vrlo precizno i detaljno upravljanje prijenosom metala u eletričnom luku. S druge strane, sve intenzivnije uvođenje automatskog i robotiziranog zavarivanja zahtjeva i stabilan električni luk i kvalitetan prijenos materijala pri čemu se traži visoka intermitencija. Zbog visokih radnih opterećanja potrebno je i hlađenje pištolja za zavarivanje kao i robustan i pouzdan sustav za dovod žice. Time se postavlja novi niz kriterija na izvore struje za zavarivanje, dodavače žice, sustave hlađenja i ostalu opremu [1].

2. Prijenos metala pri zavarivanju

Prijenos metala u električnom luku rezultat je interakcije više fizikalnih fenomena od koji elektromagnetska sila ima dominantnu ulogu. Zbog malog promjera žice moguće je kvalitetno i trenutačno upravljanje cijelim procesom odvajanja sferne kapljice rastaljenog metalnog materijala što se može dogoditi u kratkom spoju ili slobodnim letom kapljice.

Kod konvencionalnih izvora struje za zavarivanje ostvaruju se različiti načini prijenosa metala u električnom luku ovisno o jačini narinute struje i napona, promjeru žice i vrsti zaštitnog plina. Pri tome, prema gruboj podjeli, razlikujemo područje kratkih spojeva, područje mješovitog luka te područje štrcajućeg luka. Impulsno zavarivanje predstavlja kontrolirani prijenos materijala slobodnim letom i to u području niskih i visokih parametara zavarivanja zahvaljujući visokim razinama impulsne struje. Klasifikacija IIW-a [2] definira tri glavna područja prijenosa metala kod elektrolučnog

Comment [T17]: Odgovor na pitanje br.16

zavarivanja metalnom taljivom elektrodom: prirodni prijenos, kontrolirani prijenos i modificirano (prošireno) područje prijenosa.

Comment [T18]: Odgovor na pitanje br.17

Ono što omogućuju novi koncepti MIG/MAG zavarivanja je svojevrsna interakcija različitih opcija prijenosa materijala u području parametara i energijskog nivoa gotovo neprimjenjivog kod konvencionalnih postupaka i izvora struje za zavarivanje. Suvremeni postupci MAG zavarivanja se odlikuju modificiranim načinima prijenosa metala kojih je uvijek osnova kratki spoj, štrcajući luk i impulsna struja. To se postiže kontinuiranim upravljanjem i regulacijom struje i napona zavarivanja (tzv. waveform control), indirektnom kontrolom drugih sila koje sudjeluju u prijenosu metala (površinska napetost), kombinacijom impulsa i kratkih spojeva u istom radnom ciklusu, promjenom balansa polariteta i uvođenjem izmjenične struje te uvođenjem mehaničkog upravljanja odvajanja kapljice koja kompenzira vrlo mali unos topline koji je u konvencionalnom sustavu nedostatan za odvajanje dodatnog materijala. Danas se zahvaljujući razvoju uređaja moguće integracije dvije impulsne razine u istom procesu. Važno je naglasiti da se kontrola procesa provodi u svakom trenutku diskretizacijom vrijednosti tj. primjenom digitalne tehnologije.

Suvremeni postupci MAG zavarivanja primjenjuju sve nabrojene mehanizme kako bi se olakšalo zavarivanje tankih materijala, smanjio unos topline i deformacije, omogućilo lakše zavarivanje korijenskog prolaza, raznorodnih materijala te povećenih razmaka između limova. Međutim, osim ovih prednosti koje u biti predstavljaju zavarivanje u području razine parametar kratkih spojeva razvijeni su i sustavi modifciranog štrcajućeg luk koji se odlikuju znatno poboljšanom penetracijom.

Relativno niski unos topline omogućuje primjenu MIG lemljenja pocinčanih čeličnih limova. Kako cink (Zn) ima nisku temperaturu taljenja 420°C i isparava na 910°C postoje veliki problemi pri zavarivanju pocinčanih čeličnih limova jer pare cinka uzrokuju prskanje, loš prijenos metala, slabo protaljivanje, porozitet i pukotine. Jedno od rješenja je primjena dodatnog materijala s niskom temperaturom tališta na bazi legure bakra npr. CuSi ili CuAl. Tu MAG postupci s modificiranim prijenosom metala u području kratkog spoja postižu izvrsne rezultate jer ne dolazi od uništavanja cinčanog sloja a kako se većinom radi o tankim materijalima nema deformacija [3].

3. Analiza suvremenih postupaka MAG zavarivanja

U današnjoj praksi postoji dvadesetak postupaka MAG zavarivanja koji koriste modificirane prijenose metala i to prvenstveno u području niskog unosa topline kombinirajući kratki spoj i strujni puls ali postoje i varijante koje apliciraju modificirani štrcajući luk. Karakteristični postupci koji integriraju specifične koncepte prijenosa metala jesu kako slijedi :

- STT- Surface Tension Transfer®
- FastROOT®
- CMT-Cold Metal Transfer®
- AC MIG-Alternating Current MIG®
- RMT –Rapid MIG/MAG Technology®

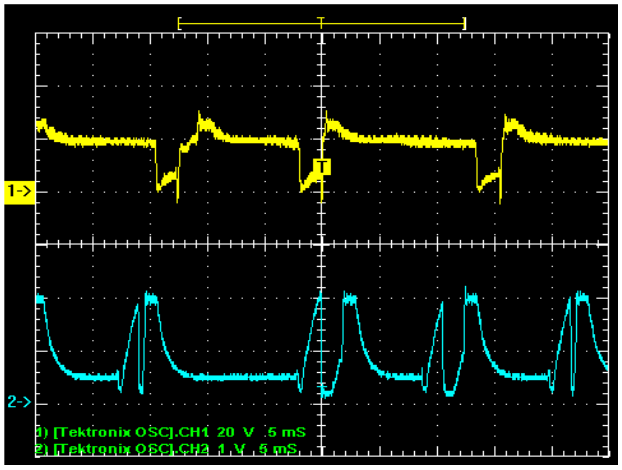
Comment [T19]: Odgovor na pitanje br. 18

Navedeni postupci primjer su kako proizvođači primjenjuju neka od modernih rješenjia kod MAG zavarivanja ali treba naglasiti da postoji još niz aplikacija koje se baziraju na sličnim principima poput inačica Cold Arc®, Force Arc®, Cold Weld®, Cold MIG@, RMD-Regulated Metal deposition ®, SP MAG®, MicroMIG®, Cold Pulse ® , IntelliArc ®itd.

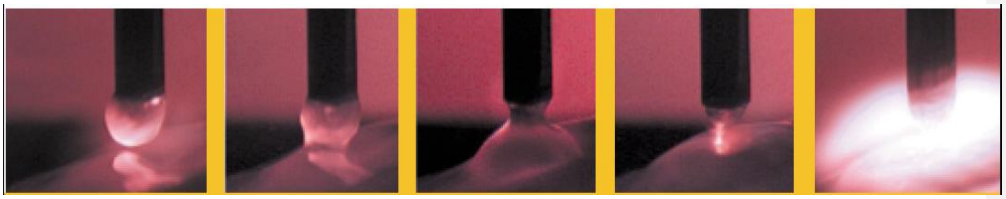
3.1. STT- Surface Tension Transfer ®

STT postupak za finu regulaciju odvajanja rastaljene kapljice koristi mehanizam površinske napetosti. Porast struje u kratkom spoju se zaustavlja kada se ostvare uvjeti za prijenos rastaljenog metala samo uz djelovanje površinske napetosti [4]. Upravo ta kontrola spriječava porast struje koji uzrokuje rasprskavanje kapljice rastaljenog metala te istovremeno maksimalizira utjecaj površinske napetosti. Međutim, nakon tog odvajanja slijedi strujni impuls koji priprema i zagrijava vrh žice za novi ciklus odvajanja kapljice. Završna struja tog impulsa, tj. njen nagib bitno utječe na unos topline te se kao parametar posebno regulira [5]. Rezultat je vrlo nizak unos energije uz eliminaciju štrcanja. Na slici 1. prikazana je dinamička karakteristika STT postupka dok je slijed odvajanja kapljice prikazan je na slici 2.

Comment [T20]: Odgovor na pitanje br. 19
NAPOMENA – ovo je pitanje za ocjenu izvrstan

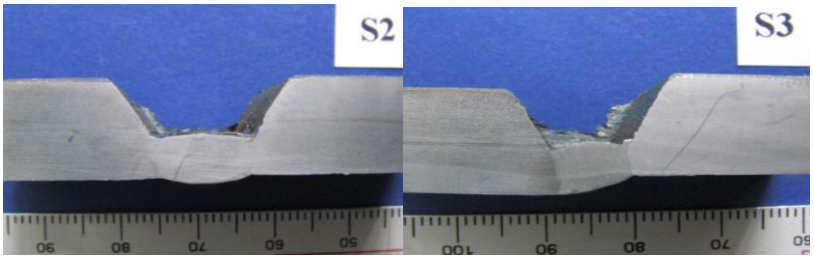


Slika 1. Dinamička katakteristika 1-u=f(t); 2-i=f(t) STT postupka [6]



Slika 2. Slijed odvajanja kapljice pri STT zavarivanju [4]

Glavna primjena STT postupka je za zavarivanje korijenskog prolaza jer kvalitetno odvajanje kapljice bez prskanja uz mali unos topline olakšava rad. Uz to, primjena MAG postupka tj. pune žice kod zavarivanja čelika visoke čvrstoće umanjuje rizik od nastanka hladnih pukotina zbog vrlo niske količine difundiranog vodika i eliminira potrebu zavarivanja tzv. „vrućeg“ sloja kod izgradnje cjevovoda. Još jedna karakteristika je i mogućnost zavarivanja pripreme s većim smaknućem i razmakom, slika 3. Zbog malog unosa topline postupak je pogodan za zavarivanje tankih materijala i to nelegiranog i visokolegiranog čelika, legura nikla itd.



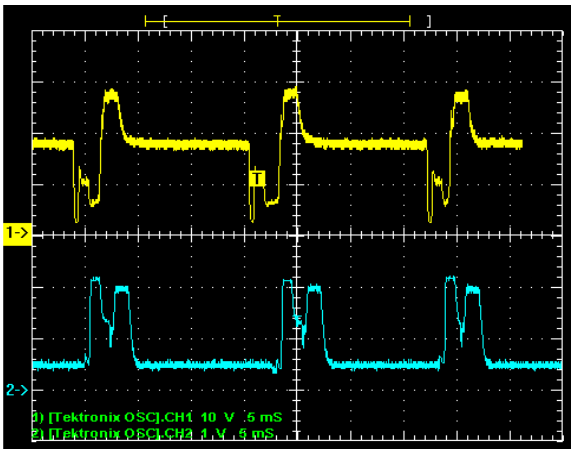
a) b)

Slika 3. Provar korijena STT postupkom kod a) većeg razmaka i b) smaknuća [6]

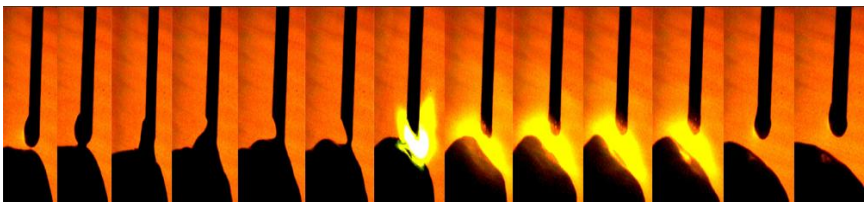
3.2. FastROOT®

Osnovni koncept FastROOT postupka zasniva se na modificiranom prijenosu metala kratkim spojevima što rezultira niskim unosom energije. Pri zavarivanju ovim postupkom napon i struja zavarivanja su digitalno kontrolirani. Obrazac kombinacije struje kratkog spoja i sekundarnog strujnog pulsa za zagrijavanje javlja se i ovom slučaju. Naime, nakon prvog stanja kratkog spoja u kojem dolazi do odvajanja kapljice aktivira se drugi strujni interval koji zagrijava osnovni materijal i vrh žice te ga priprema za novi ciklus. Ovim sekundarnim strujnim pulsom dovodi se značajna količina topline koja utječe na oblikovanje zavarenog spoja. Nakon toga održava se osnovna struja koja osigurava energijsko stabilno stanje električnog luka i taline do slijedećeg kratkog spoja. Da bi se realizirao ovako sofisticirani prijenos metala u električnom luku potrebna je izrazito brza regulacija jačine struje i napona u svakom trenutku odvajanja kapljice što rezultira prijenosom metala bez štrcanja [7]. Dinamička karakteristika FastROOT postupka prikazana je na slici 4. dok slika 5. prikazuje slijed odvajanja kapljice u električnom luku.

Comment [T21]: Odgovor na pitanje br. 20
NAPOMENA: Ovo je pitanje za ocjenu izvrstan

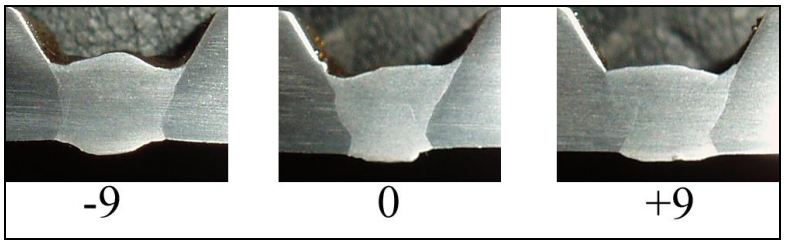


Slika 4. Dinamička katakteristika 1-u=f(t); 2-i=f(t) FastROOT postupka [6]



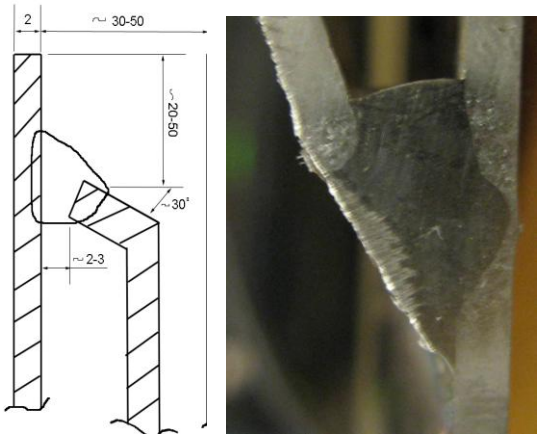
Slika 5. Slijed odvajanja kapljice pri FastROOT zavarivanju [7]

Glavna primjena FastROOT postupka je zavarivanje korijenskog prolaza gdje se regulacijom parametara sekundarnog strujnog pulsa može precizno utjecati na oblik provara, slika 6. Brzo zavarivanje korijenskog prolaza čak i u uvjetima većeg razmaka i smaknuća bez štrcanja u PG položaju karakteristika je ovog postupka koja je vrlo često aplicirana u praksi.



Slika 6. Utjecaj sekundarnog strujnog pulsa na oblik provara kod FastROOT postupka [7]

Osim za korijenski prolaz, FastROOT je zbog niskog unosa energije pogodan za zavarivanje tankih limova (nelegirani i visokolegirani čelik, Ni legure) poglavito u situacijama većeg razmaka između komada, slika 7. Isto tako moguća je primjena za tvrdo MIG lemljenje.



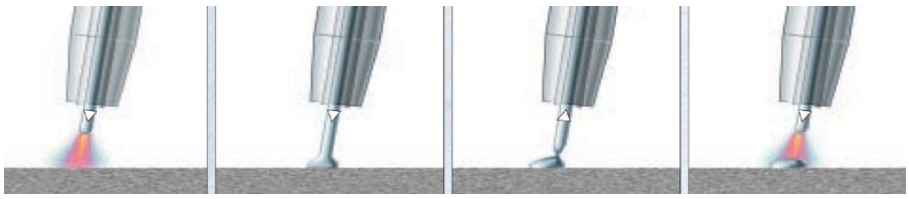
Slika 7. Zavarivanje duplex i superaustenitnog čelika debljine 2mm uz razmak 2 do 3mm[7]

3.3. CMT-Cold Metal Transfer ®

CMT postupak predstavlja modificirani način prijenosa metala kratkim spojevima pri čemu se primjenjuje „mehaničko“ rješenje tj. povratno gibanje žice. Karakteristično je da se odvajanje kapljice odvija u uvjetima jako niskog unosa topline koji kod klasičnog prijenosa kratkim spojevima jednostavno ne bi bio dovoljan. U ovom slučaju povratno gibanje žice kompenzira nedostatak toplinske energije i elektromagnetske sile jer se prijenos metala odvija pri vrlo niskoj jačini struje. Digitalna tehnologija omogućuje precizno upravljanje gibanjem žice a specifična je i vrlo precizna regulacija duljine električnog luka pomoću mehaničkog gibanja. Frekvencija povratnog gibanja žice je najčešće između 60 i 80 Hz što zahtjeva vrlo sofisticiranu kontrolu gibanja žice i primjenu određenih rješenja poput ugradnje dodatnog servomotora u pištolj za zavarivanje i ugradnju međuspremnika žice tzv. „wire buffer“ koji kompenzira povrat žice elastičnom deformacijom [8].

Comment [T22]: Odgovor na pitanje br. 21

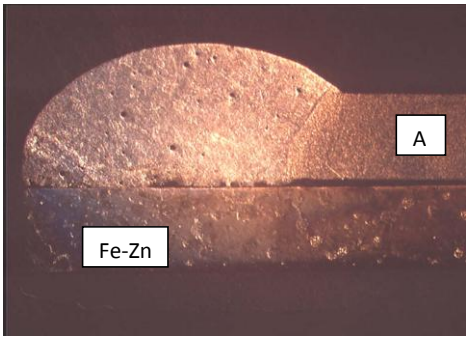
Comment [T23]: Odgovor na pitanje br. 22
NAPOMENA: Ovo je pitanje za ocjenu izvrstan



Slika 8 . Shematski prikaz povratnog gibanja žice (treći kadar) [8]

Slika 9 . Slijed odvajanja kapljice kod CMT postupka [8]

U graničnim slučajevima kada se zahtjeva veći unos topline od onog koji može ostvariti CMT proces postoji mogućnost ubacivanja strujnih impulsa koji daju više topline i bolju penetraciju i to između ciklusa odvajanja kapljice. Primjena CMT postupka prvenstveno se odnosi na područje MIG tvrdog lemljenja, zavarivanje tankih limova (aluminij, nelegirani i nehrđajući čelik) kao i spajanje aluminija i pocinčanog lima. Ovaj potonji slučaj posebno je zanimljiv jer integrira zavarivanje (na strani aluminija) i tvrdo lemljenje (na strani pocinčanog lima), slika 10. CMT također odlikuje dobra mogućnost premošćivanja zazora pri spajanju tankih materijala.

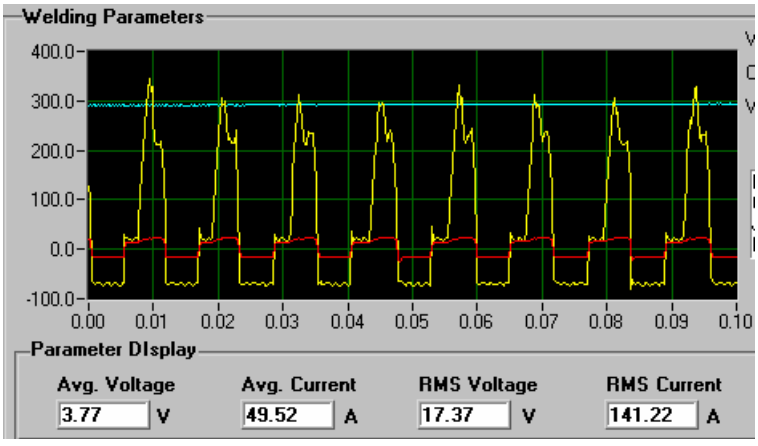


Slika 10 . Makroizbrusak spoja aluminijskog i pocinčanog lima izvedenog CMT postupkom [8]

3.4. AC MIG®

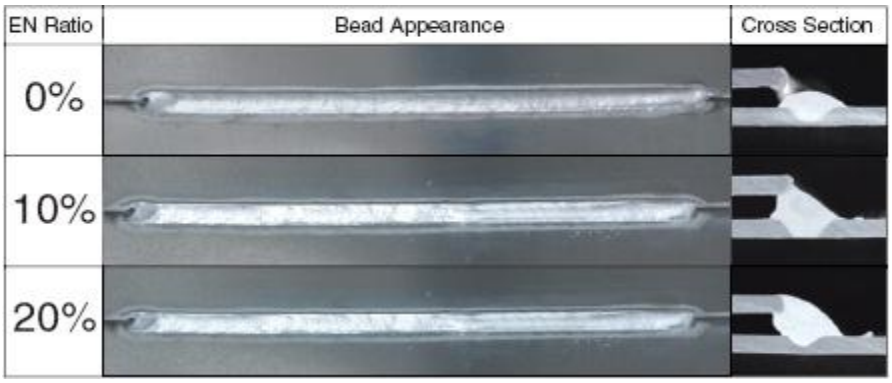
Kod MAG postupka se pretežito primjenjuje pozitivan polaritet na žici i to kod konvencionalnih i modernih postupaka. Negativan polaritet kod EPP daje veću brzinu taljenja i veći depozit uz manju penetraciju. Isti efekt postiže se i kod MAG postupka ali je ponašanje električnog luka na negativnoj elektrodi nepravilno i ima dosta prskanja. Primjena negativnog polariteta je česta kod praškom punjenih žica. Primjena promjenjivog polariteta na žici kod MAG zavarivanja tj. izmjena pozitivnog i negativnog ciklusa na žici omogućuje bolju kontrolu procesa i premošćivanje većih zazora kod tanjih materijala. Izmjenom polariteta postiže se precizna kontrola distribucije topline u električnom luku tj. balansom pozitivnog i negativnog pola na elektrodi i radnom komadu [3]. Međutim, treba napomenuti da su izvori struje za AC MIG su dosta složeni i kompleksni. Tipična dinamička karakteristika AC MIG postupka prikazana je na slici 11 .

Comment [T24]: Odgovor na pitanje br. 23
NAPOMENA: Ovo je pitanje za ocjenu izvrstan



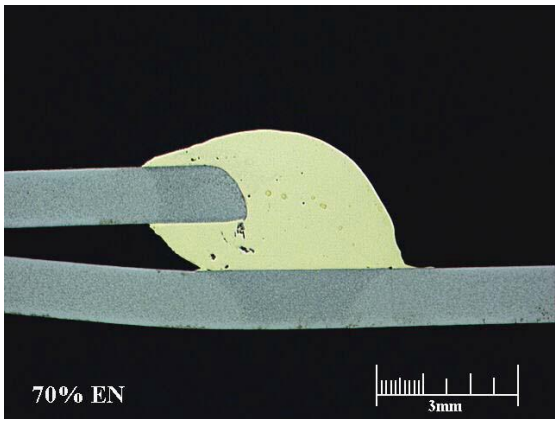
Slika 11 . Dinamička karakteristika i=f(t) (žuti oscilogram) i u=f(t) (crveni oscilogram) kod AC MIG postupka [3]

Ovisno o primjeni negativnog polariteta na žici (EN ratio) mijenja se oblik penetracije kao i mogućnost premošćivanja pri zavarivanju tankih limova. Na slici 12. prikazan je utjecaj negativnog polariteta pri spajanju aluminijske legure AlMg4,5Mn debljine 1,5mm.



Slika 12 . Utjecaj balansa negativnog polariteta na oblik zavara i geometriju spoja [10]

AC MIG moguće je, kao i sve niskoenergijske postupke, primijeniti i za tvrdo lemljenje pri čemu balans negativnog polariteta na žici zanatno utječe na mogućnost premošćivanja između radnih komada, slika 13.

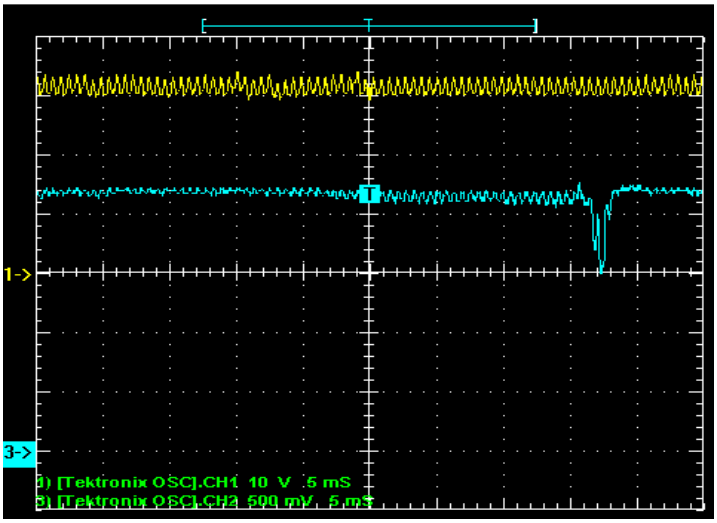


Slika 13. Makroizbrusak tvrdo lemljenog spoja žicom ER-CuSi A na pocinčanom čeliku, udio negativnog polariteta EN=70% [3]

3.5. RMT-Rapid MIG/MAG Technology®

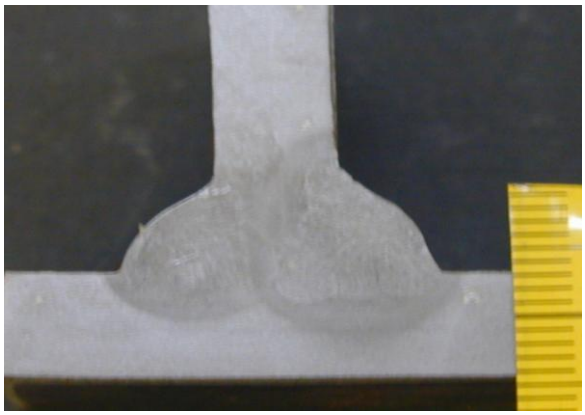
RMT postupak ne spada u skupinu niskoenergijskog MIG/MAG zavarivanja koje se realizira u području kratkih spojeva već se bazira na štrcajućem prijenosu metala. Kod konvencionalnog štrcajućeg luka prijenos metala se realizira u neprekinutom nizu kapljica malog promjera. Prijelazna struja kod koje dolazi do stabilnog štrcajućeg luka ovisi o vrsti i promjeru žice te zaštitnom plinu. Optimalan prijenos štrcajućim lukom postiže se u mješavinama bogatim argonom a prijelazna struja pada kako udio argona raste. Kod RMT MAG postupka prijenos materijala zbiva se u jako sitnim kapljicama pri čemu je frekvencija prijenosa oko 2-3 kHz. Tim mehanizmom se još sužava jezgra luka, snizuje napon i visina luka u odnosu na klasični štrcajući luk što rezultira većom koncetracijom energije i znatno intenzivnijom penetracijom.

Comment [T25]: Odgovor na pitanje br. 24
NAPOMENA: Ovo je pitanje za ocjenu izvrstan



Slika 14. Dinamička katakteristika 1-u=f(t); 3-i=f(t) RMTpostupka [6]

Primjena RMT postupka omogućuje reviziju pripreme spoja u kontekst smanjenja otvora kuta ili potpune eliminacije izrade žlijeba kod zahtjeva za npr. potpunim kutnim provarom, slika 15. Isto tako, relativno u odnosu na štrcajući luk postižu se veće brzine zavarivanja tako da je u konačnici unos topline niži.



Slika 15 . Makroizbrusak kutnog spoja s potpunom penetracijom; S355 debljine 8mm; visina kutnog spoja 4mm; I=265A; Unos topline 11 kJ/cm [6]

4. Zaključak

Vidljiv je intenzivan razvoj na području realizacije postupaka koji integriraju nekoliko opcija za prijenos metala u električnom luku, što se prvenstveno odnosi na kombinaciju kratkih spojeva i strujnih impulsa (STT, FastROOT) uz upravljanje valnim oblicima struje i napona. Pri tom se još može sniziti količina potrebne energije ako se implementira mehanički rad poput povratnog gibanja kod CMT postupka. Uvođenjem izmjenične struje i promjenom balansa polariteta na žici i radnom komadu postiže se precizna raspodjela topline (AC MIG). Isto tako, modifikacije u području štrcajućeg luka omogućavaju bitno bolju penetraciju i veću brzinu zavarivanja (RMT).

Uza sve svoje prednosti, potrebno je naglasiti da nabrojeni postupci zahtjevaju znatno složeniju i sofisticiraniju opremu što se očituje u cijeni iste. Osim toga, za kvalitetnu primjenu potrebno je definirati i odrediti područja gdje će se rad s takvim postupcima isplatiti preko povećanja produktivnosti i postizanja određenih komparativnih karekteristika poput smanjenja deformacije. Isto tako, da bi se optimalno iskoristila npr. veća penetracija potrebno je napraviti reviziju pripreme žlijeba. Suvremeni postupci MAG zavarivanja imaju velike mogućnosti samo ako se točno odredi područje u kojem imaju bitno bolje karakteristike od konvencionalne opreme. U protivnom kupnja skupe opreme može se pokazati neisplativom i promašenom investicijom. Određena područja aplikacije u poveznici s automatiziranim i robotiziranim zavarivanjem omogućuju produktivnost i postizanje kvalitete zavara kakva s konvencionalnom opremom nije bila moguća.

5. Literatura

[1] Garašić I., Suvremeni postupci MAG zavarivanja, nastupno predavanje, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2011.

[2] Norrish J., A Review of Metal Transfer Classification in Arc Welding, IIW doc XII-1769-03, 2003.

[3] Joseph A., Webb C., Haramia M., Yapp D., Variable Polarity (AC) Arc Weld Brazing of Galvanized Sheet, IIW doc XII-1779-03, 2003.

[4] Neessen F., Naber F., The GMAW – STT process – An advance welding process.Lincoln Smitweld B.V, Lincoln Electric Europe B.V. The Niederland, October 2003.

[5] Cuiuri D., Norrish J., Cook C.D., Droplet size regulation in short circuit GMAW process using a controlled current waveform, Proc. AWS Conf. Gas Metal Arc Welding for the 21st Century, Orlando, Florida,6-8th December 2000.

[6]. Arhiva Laboratorija za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje,Sveučilište u Zagrebu, 2011.

[7] Uusitalo J., FastROOT™ – a new welding process for root pass and thin sheet welding, Kemppi Pro News, Vol. 2, 2006.

[8] Staufer, H., Bruckner, J.; Himmelbauer, K., The CMT – Process – A Revolution in Welding Technology, Fronius International, Wels, 2005.

[9] Ou Z., Wuang Y., Ushio M., Tanaka M., New concept for the characteristic of an arc welding power source (Report II) – New development of arc control system for CO_2 welding, Trans. JWRI 28, 1999.

[10] ....., Highly advanced AC MIG technology for input heat control, www.nachirobotics.com/media/applications_autogen/DW300.pdf

AUTOMATIZIRANO TIP TIG ZAVARIVANJE

AUTOMATED "TIP TIG" WELDING

Prof.dr.sc. Slobodan Kralj

Prof.dr.sc. Zoran Kožuh

Dr.sc.Ivica Garašić

Vladimir Panjković

Fakultet strojarstva i brodogradnje, I. Lučića 5, HR 10000 Zagreb, e-mail:fsb.zk@fsb.hr

Ključne riječi: TIP TIG, vruća žica, depozit, automatizacija

Key words: TIP TIG, hot wire, deposit, automation

Sažetak:

Zavarivanje TIG postupkom s automatskim dodavanjem materijala uz njegovo dodatno zagrijavanje rezultira većim depozitom ali i zahtjeva adekvatnu pripremu i poznavanje tehnologije. U ovom radu analiziran je TIP TIG koncept zavarivanja pri čemu je detaljno razmatran i utjecaj topline dobivene predgrijavanjem žice. Opisan je osnovni mehanizam TIP TIG zavarivanja kao i specifična oprema. U eksperimentalnom radu načinjena je komparativna analiza pri zavarivanju cijevi debljine stijenke 14mm od duplex čelika i to automatiziranim TIP TIG i konvencionalnim ručnim TIG postupkom. U konačnici su dani i adekvatni zaključci na temelju kojih je moguće odabrati područje primjene TIP TIG postupka.

Summary:

Application of TIG process with automated feeding of filler material and additional heating of filler wire, results in a higher deposit rate, but on the other hand, calls for appropriate preparation and knowledge of technology. Concept of TIP TIG welding has been considered in this contribution, particular attention being focused to effect of heat imported through wire preheating. Basic mechanism of TIP TIG has been depicted, as well as the specific equipment needed. Within the scope of experimental work, a comparative analysis between automated TIP TIG welding and conventional manual TIG process for the case of pipe made of duplex steel with 14 mm wall thickness has been

made. Certain conclusions that can be used as a basis for selection of appropriate field of application for TIP TIG process are offered.

1. Osnovni koncept TIP-TIG zavarivanja

TIG postupak ima mnogobrojne prednosti u odnosu na ostale postupke zavarivanja, no primjena konvencionalnog TIG postupka zavarivanja upitna je sa stanovišta produktivnosti i mogućnosti automatizacije. Primijenjena tehnološka rješanja kod TIP TIG postupka omogućavaju povećanje produktivnosti i integraciju u automatizirane sustave.

TIP TIG zavarivanje je modernizirana varijanta TIG postupka zavarivanja uz primjenu automatskog dodavanja žice tj. dodatnog materijala koje se sastoji od dvije komponente. Žica za zavarivanje se primarno giba kontinuirano prema naprijed u smjeru zavara (kao kod MIG/MAG postupka) te se na to gibanje integrira sekundarno linearno gibanje „naprijed-nazad“ koje proizvodi dodavač žice preko mehaničkog sustava. Kinetička energija tog dinamičkog gibanja umanjuje utjecaj površinske napetosti taline što omogućava bolje spajanje i miješanje osnovnog i dodatnog materijala dok nečistoćama i plinovima omogućava izlaz iz rsataljenog metala. Depozit dodatnog materijala može se povećati i do 50% kad se radi o varijanti s vrućom tj. predgrijanom žicom. Dinamički efekti gibanja žice osiguravaju stabilan i upravljiv zavarivački proces. Brzina žice i oscilatorno gibanje naprijed-nazad su kontinuirano podesivi i njima je moguće nezavisno upravljati.

Comment [T26]: Odgovor na pitanje br. 25
NAPOMENA: Ovo je pitanje za ocjenu izvrstan

Primjenom TIP TIG postupka zavarivanja mogu se vrlo efikasno zavarivati konstrukcijski čelici, nehrđajući čelici (feritni, austenitni i austenitno-feritni),aluminij i njegove legure, titan itd.

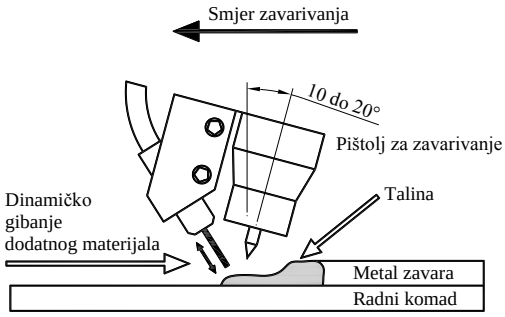
Primjenom TIP TIG postupka zavarivanja dobiva se slijedeće:

- u odnosu na klasični TIG znatno veći depozit,
- visoka kvaliteta zavara,
- dobar estetski izgled i geometrija zavara bez potrebe za naknadnom obradom,
- smanjeni unos topline u radni komad što rezultira smanjenjem deformacija radnog komada te manji negativni utjecaj na mikrostrukturu.

Comment [T27]: Odgovor na pitanje br. 26

TIP TIG postupak se zbog svojeg koncepta vrlo lako automatizira, a efikasnost mu raste uporabom varijante s vrućom žicom. Zbog relativno nižeg unosa topline minimalizirano je i stvaranje metalnih para i plinova.

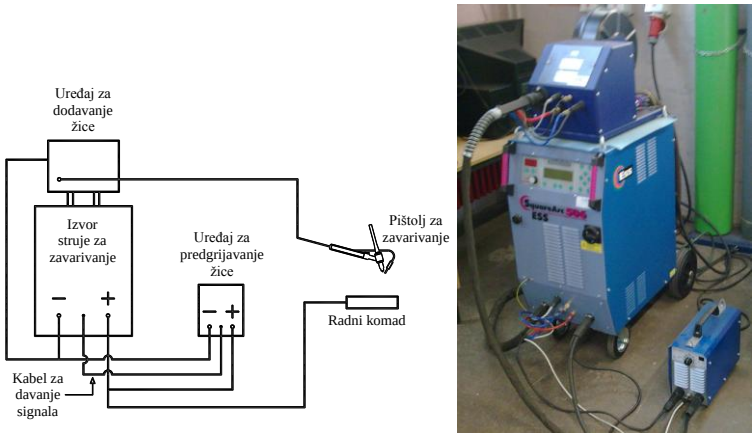
Najčešće primjenjivana tehnika rada kod TIP TIG zavarivanja prikazana je na slici 1. Pištolj za zavarivanje je nagnut unazad za 10 do 20°, a dodatni materijal se dodaje u prednji rub taline .



Slika 1. Koncept i tehnika rada kod TIP TIG zavarivanja

2. Uređaj za TIP TIG zavarivanje

TIP TIG uređaj za zavarivanje sastoji se od mikroprocesorom upravljanog uređaja za dodavanje dodatnog materijala, izvora struje za predgrijavanje dodatnog materijala (predgrijač žice), pištolja za zavarivanje s cijevnim paketom i izvora struje za zavarivanje, slika 2.



a) b)

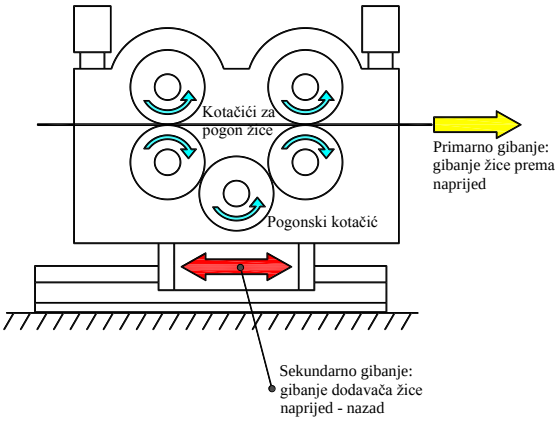
Slika 2. Shematski prikaz spajanja komponenti a) i oprema za TIP TIG zavarivanje b)

2.1 Uređaj za dodavanje dodatnog materijala

Na slici 3. prikazan je uređaj za dodavanje dodatnog materijala kojeg je 1999. godine osmislio i patentirao inženjer Plasch. Unutar samog uređaja za dodavanje dodatnog materijala nalazi se elektronička tiskana ploča s mikroprocesorom koja upravlja dodavanjem dodatnog materijala.

Sustav za dobavu dodatnog materijala sastoji se od četiri kotačića sa zaobljenim utorima (oblik utora ovisi o vrsti dodatnog materijala), a razlika u odnosu na dodavač žice kod MIG/MAG zavarivanja jest u tome što ovaj sustav proizvodi dva različita gibanja čiji zbroj daje konačno dinamičko gibanje žice. Unutrašnjost dodavača žice, tj. sustav s četiri kotačića prikazan je na slici 3., a elementarni prikaz gibanja prikazan je slikom 4.

Slika 3. Unutrašnjost dodavača žice, sustav s četiri kotačića



Slika 4. Shematski prikaz gibanja koje ostvaruje dodavač žice

Primarno gibanje čini žica svojim kontinuiranim linearnim gibanjem prema naprijed. Sekundarno gibanje čini dodavač žice svojim oscilatornim gibanjem naprijed-nazad. Parametri gibanja tj. brzina dovoda žice kod primarnog i frekvencija osciliranja kod sekundarnog pomaka mogu se podešavati neovisno jedno o drugome. Ovakvo dinamičko gibanje dodatnog materijala omogućava smanjivanje površinske napetosti taline metala zavara, uslijed čega je moguće izvođenje zavarivanja uz primjenu nižih parametara nego što je to uobičajeno primjenom postupka zavarivanja koji nema dinamičko dodavanje dodatnog materijala. Također se dinamičkim dodavanjem dodatnog materijala postiže veći depozit dodatnog materijala.

Uređaj za dodavanje dodatnog materijala za TIP TIG zavarivanje ima mogućnost podešavanja parametara preko upravljačke ploče kako slijedi :

- brzina dodavanja dodatnog materijala,
- frekvencija osciliranja dodatnog materijala,
- početna brzina dodatnog materijala,
- povrat dodatnog materijala.

Svaki od navedenih parametara utječe na oblik i geometriju zavara te na stabilnost procesa.

Comment [T28]: Odgovor na pitanje br. 27

2.2 Izvor struje za predgrijavanje dodatnog materijala

Kako je već ranije opisano postoje dvije varijante TIP TIG zavarivanja, zavarivanje s hladnom žicom i zavarivanje s vrućom žicom. Kod zavarivanja s vrućom žicom potrebno je žicu predgrijati na određenu temperaturu, koja ovisi o položaju zavarivanja, pripremi i vrsti osnovnog materijala. Predgrijavanje dodatnog materijala provodi se pomoću posebnog izvora struje, odnosno uređaja za predgrijavanje dodatnog materijala za zavarivanje.

Comment [T29]: Odgovor na pitanje br. 28

Dodatni materijal zagrijava se primjenom Jouleovog efekta, odnosno Jouleove topline čija se vrijednost izračuna prema sljedećoj formuli:

$$Q_{DM} = I_{DM}^2 R_{DM} t_z \quad [\mathrm{J}] \qquad (1)$$

gdje je:

Q_{DM} – toplina dodatnog materijala [J],

I_{DM} – jakost struje predgrijavanja dodatnog materijala [A],

R_{DM} – otpor dodatnog materijala [Ω],

t_z – vrijeme zavarivanja [s].

Predgrijavanje dodatnog materijala provodi se prilikom zatvaranja strujnog kruga između negativnog pola izvora struje predgrijača i radnog komada, pri čemu je pozitivni pol predgrijača spojen preko stezaljke na radni komad. Uređaj za predgrijavanje dodatnog materijala koristi napon praznog hoda od 11,5 V. Polaritet izvora struje za zavarivanje i predgrijavanje je isti te je na taj način smanjena mogućnost pojave proboja električnog luka s volfram elektrode na dodatni materijal. Jakost struje predgrijavanja moguće je podešavati u rasponu do 160 A.

3. Varijante TIP TIG postupka zavarivanja-usporedba

Postoje dvije varijante TIP TIG postupka zavarivanja:

- TIP TIG zavarivanje s hladnom žicom i,
- TIP TIG zavarivanje s vrućom žicom.

Zavarivanje s hladnom žicom je jednostavnija varijanta TIP TIG postupka. Zavarivački sustav se sastoji od mikroprocesorom upravljanog dodavača žice s dinamičkim efektom, cijevnog paketa pištolja za zavarivanje i izvora struje za zavarivanje. Energija unosa tj. količina unešene topline u zavareni spoj je niža nego u usporedbi s varijantom koja koristi predgrijavanje žice, pa je stoga i efikasnost i brzina postupka manja.

Bitno je napomenuti da se primjenom ove varijante TIP TIG postupka mogu ostvariti brzine zavarivanja kao i primjenom impulsnog MIG zavarivanja. Primjenom TIP TIG postupka zavarivanja s hladnom žicom dobija se zavar izvrsne kvalitete i izgleda koji posjeduje izvrsna mehanička i metalurška svojstva, a također smanjeni su troškovi jer nema prskanja kapljica nataljenog metala pa niti nema potrebe za naknadnom obradom zavarenog spoja.

Osnovna razlika između TIP TIG postupka zavarivanja s vrućom žicom i TIP TIG postupka zavarivanja s hladom žicom jest u predgrijavanju žice tj. dodatnog materijala. Žica se predgrijava efektom nastanka Joulesove topline, odnosno prolaskom električne struje, koju proizvodi dopunski izvor struje, kroz dodatni materijal (žicu). Predgrijavanjem se dodatnom materijalu povisuje temperatura pa je za njegovo taljenje potrebna manja energija električnog luka. Temeljna prednost ovog postupka u odnosu na druge postupke zavarivanja s taljivom elektrodom jest mogućnost odvojenog upravljanja unosom energije i unosom dodatnog materijala u talinu zavara. Ova prednost se u praksi najviše očituje u potpunoj kontroli početne i završne faze zavarivanja. TIP TIG postupak

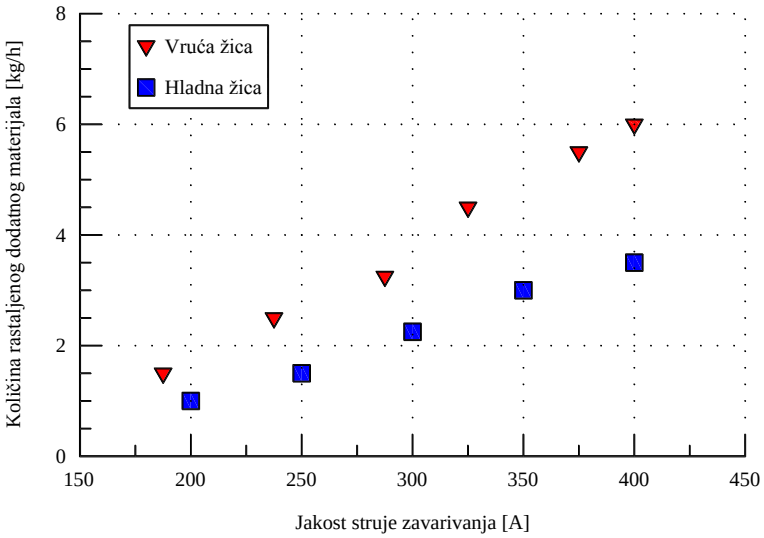
zavarivanja s vrućom žicom primjenjuje se za zavarivanje svih faza spoja (korijenski prolaz, popuna, završni prolaz).

Značajke TIP TIG postupka zavarivanja s vrućom žicom su slijedeće:

- velika količina nataljenog materijala do 4,5 kg/h,
- relativno niži unos topline uslijed čega dobivamo usku zonu ZUT-a,
- minimalne deformacije radnog komada i minimalno odgaranje legirnih elemenata uslijed niskog unosa topline,
- mogućnost primjene tehnologije uskog žlijeba i za veće debljine stijenki.

Comment [T30]: Odgovor na pitanje br. 29

Kod TIG zavarivanja veći dio topline električnog luka koristi se za taljenje osnovnog materijala. Ukoliko se u talinu zavarenog spoja dovodi prethodno zagrijan dodatni materijal tada je za njegovo taljenje potrebna manja količina energije električnog luka nego kada se u talinu spoja dovodi dodatni materijal koji nije prethodno zagrijan. To znači da je za zavarivanje s dodavanjem prethodno zagrijanog dodatnog materijala moguće koristiti niže parametre zavarivanja, ili je uz primjenu istih parametara zavarivanja moguće postizanje veće količine nataljenog dodatnog materijala. Usporedba količine nataljenog dodatnog materijala korištenjem TIG zavarivanja s hladnim i vrućim dodatnim materijalom prikazana je slikom 5.



Slika 5. Usporedba količine nataljenog dodatnog materijala pri

TIG zavarivanju s hladnom i vrućom žicom –promjer žice 1,6 mm, PA položaj [10]

Upotrebom TIG zavarivanja s vrućom žicom postiže se količina nataljenog materijala od 6 kg/h pri jakosti struje zavarivanja od 400 A, dok se upotrebom hladne žice postiže depozit do 3,5 kg/h. Količina nataljenog materijala kod zavarivanja s hladnom žicom, pri određenoj jakosti struje zavarivanja i određenoj brzini dobave žice, je konstantna, dok se kod zavarivanja s vrućom žicom količina nataljenog materijala može mijenjati promjenom jakosti struje predgrijavanja žice.

4. Analiza unosa topline

Unos topline Q kod TIG zavarivanja vrućom žicom može se analizirati kao zajednički unos topline električnog luka i topline dobivene predgrijavanjem na vrućoj žici:

$$Q = Q_{EL} + Q_{DM} \qquad (2)$$

gdje je:

Q – ukupna toplina [kJ/mm],

Q_{EL} – toplina električnog luka [kJ/mm],

Q_{DM} – toplina dodatnog materijala, tj. toplina predgrijane žice [kJ/mm].

Za izračunavanje energije električnog luka Q_{EL} koristi se sljedeća formula:

$$Q_{EL} = \frac{I_z \times U}{v_z \times 1000} \times 60 \times \eta \qquad \text{[kJ/mm]} \qquad (3)$$

gdje je:

Q_{EL} – toplina električnog luka [kJ/mm],

I_z – jakost struje zavarivanja [A],

U – napon električnog luka [V],

v_z – brzina zavarivanja [mm/min],

η – stupanj iskoristivosti električnog luka prema HRN EN – 1011-1.1998.

Za izračunavanje energije unešene u radni komad preko dodatnog materijala, odnosno za izračunavanje topline koju stvara predgrijavanje dodatnog materijala koristi se izraz (1).

Prema (4) računa se vrijednost otpora R_{DM} koja ovisi o vrsti, duljini slobodnog kraja i promjeru dodatnog materijala, a računa se prema izrazu:

$$R_{DM} = \frac{\rho_{DM} \times l_{DM}}{S_{DM}} \quad [\Omega] \qquad (4)$$

gdje je:

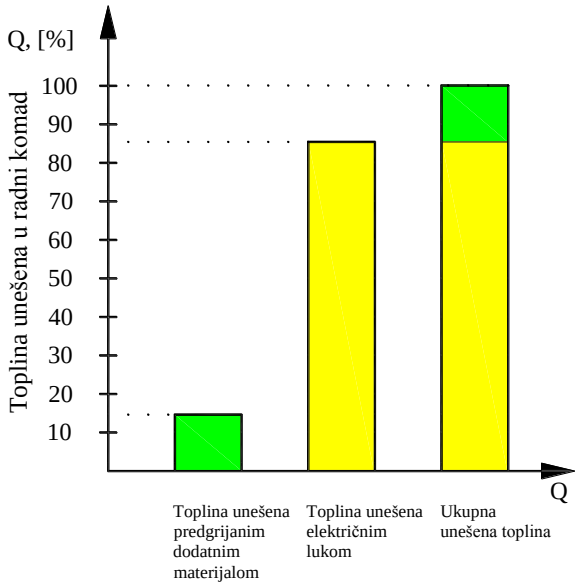
R_{DM} –otpor dodatnog materijala [Ω],

ρ_{DM} – specifični električni otpor dodatnog materijala [Ω mm^2/m],

l_{DM} – duljina slobodnog kraja žice [m],

S_{DM} – površina poprečnog presjeka žice [mm^2].

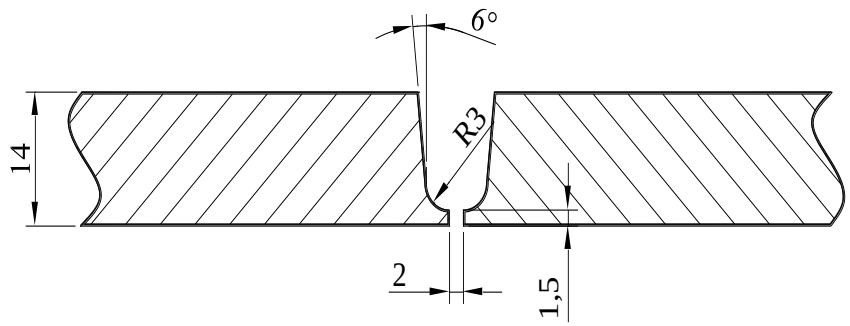
Na slici 6. prikazan je omjer toplina koje su unešene u radni komad preko dodatnog materijala i preko električnog luka za parametre zavarivanja u eksperimentalnom dijelu. Iz slike je uočljivo da udio topline nastala predgrijavanjem dodatnog materijala iznosi i do 15 % od ukupne topline koja je unešena u radni komad što dovodi do zaključka da predgrijavanje dodatnog materijala ima značajan utjecaj na ukupan unos topline . Svakako treba naglasiti da udio ovisi o jačini struje i parametrima dodavanja žice.



Slika 6. Omjer unešene topline pri TIP TIG zavarivanju

5. Eksperimentalni rad

U eksperimentalnom radu provedeno je zavarivanje TIP TIG i TIG postupkom cijevi od duplex čelika X2 CrNiMoN 22-5-3 debljine stijenke 14mm i vanjskog promjera 115 mm. Upotrijebljen je dodatni materijal promjera 0,8mm. Zbog činjenice da je TIP TIG postupak zavarivanja poluautomatizirani postupak zavarivanja moguća je priprema spoja uskim žljebom kako je prikazano slikom 7. dok je za ručni TIG primjenjena klasična V priprema spoja. Glavna prednost pripreme spoja uskim žljebom je smanjenje broja potrebnih prolaza, čime se skraćuje vrijeme izradbe proizvoda, smanjuju troškovi izradbe uslijed manje potrošnje dodatnog materijala. No, priprema spoja uskim žljebom ima i nedostataka a to je nemogućnost njihanja pištolja za zavarivanje u žljebu, pa je stoga potrebno pažljivo odabrati parametre za zavarivanje da ne bi došlo do naljepljivanja.



Slika 7. Priprema spoja cijevi za TIP TIG zavarivanje

Prije samog početka zavarivanja cijevi su očišćene i odmašćene te pripojene na 4 mjesta. Zavarivanje cijevi provedeno je na okretaljci u PA položaju. Zbog načina pripreme rubova cijevi udaljenost između vrha volfram elektrode i sapnice iznosila je 7 mm, dok je udaljenost između volfram elektrode i radnog komada iznosila 4 mm, slika 8. Za zaštitu zone električnog luka i korijenske strane zavara korišten je plin argon.

Slika 8. TIP TIG zavarivanje-radno mjesto za zavarivanje cijevi i detalj pripreme žlijeba.

Parametri zavarivanja korijenskog prolaza dani su u tablici 1. dok su parametri popune dani u tablici 2.

Tablica 1. Parametri zavarivanja korijenskog prolaza na cijevi.

Jakost struje zavarivanja, [A]	Napon električnog luka, [V]	Jakost struje predgrijavanja, [A]	Frekvencija osciliranja, [Hz]	Brzina dobave žice, [m/min]	Količina unesene topline, [kJ/mm]
110	12	80	16	1,48	0,5487

* Protok zaštitnog plina q = 11 l/min,

** Protok korijenskog zaštitnog plina q_k = 3 l/min,

*** Brzina zavarivanja v_z = 70 mm/min.

Tablica 2. Parametri zavarivanja 2. prolaza zavara na cijevi.

Jakost struje zavarivanja, [A]	Napon električnog luka, [V]	Jakost struje predgrijavanja, [A]	Frekvencija osciliranja, [Hz]	Brzina dobave žice, [m/min]	Količina unesene topline, [kJ/mm]
180	14	80	16	1,82	1,2075

* Protok zaštitnog plina q = 11 l/min,

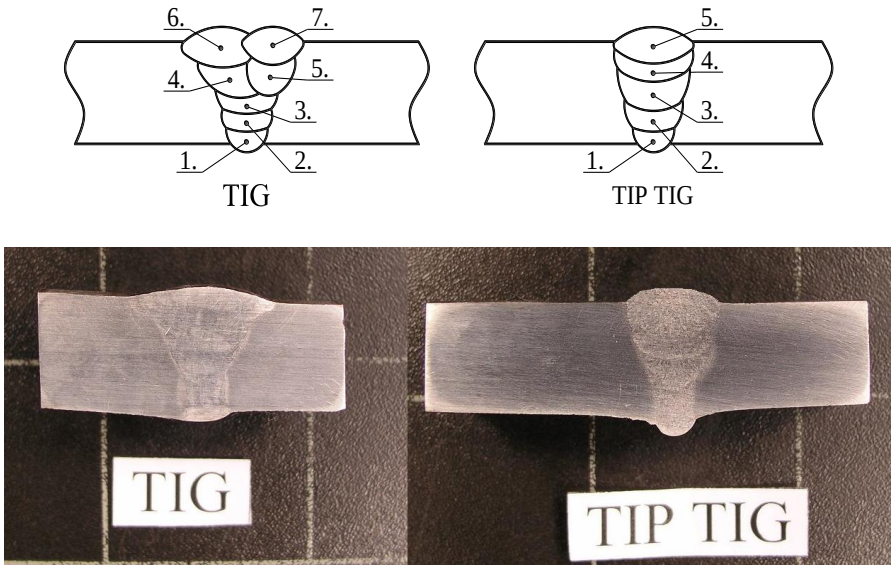
** Protok korijenskog zaštitnog plina q_k = 3 l/min,

*** Brzina zavarivanja v_z = 80 mm/min.

Za zavarivanje 2. prolaza zavara na cijevi povećana je jakost struje zavarivanja i brzina dodavanja dodatnog materijala. Svrha povećanja parametara zavarivanja u odnosu na parametre zavarivanja koji su korišteni za zavarivanje korijena jest u tome da se dobije što je moguće veća količina nataljenog dodatnog materijala u jednom prolazu, a samim time i da se smanji ukupno potrebni broj prolaza zavara.

6. Analiza rezultata-usporedba TIP TIG i konvencionalnog TIG-a

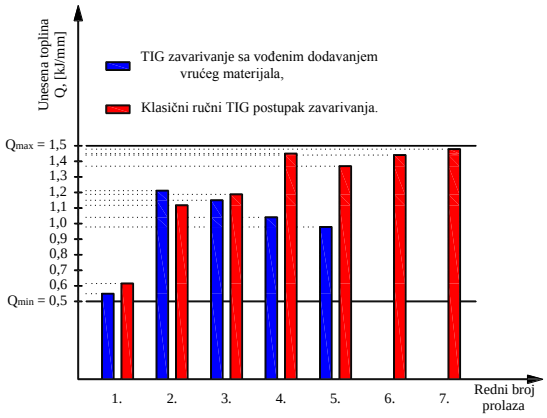
Na slici 9. prikazani su redoslijed zavara i makroizbrusci za TIG i TIP TIG postupak dobiveni iz zavarenih cijevi promjera 115mm i debljine stijenke 14mm. Oba zavara su homogena , uz prihvatljivo nadvišenje lica i korijena.



Slika 9. Usporedba poprečnih presjeka zavara.

Za TIG postupak upotrijebljeno je 7 dok je za TIP TIG bilo dostatno 5 prolaza. Na dijagramu na slici 10. dana je usporedba unosa topline po pojedinom prolazu. Vidljivo je da se za TIP TIG ukupno

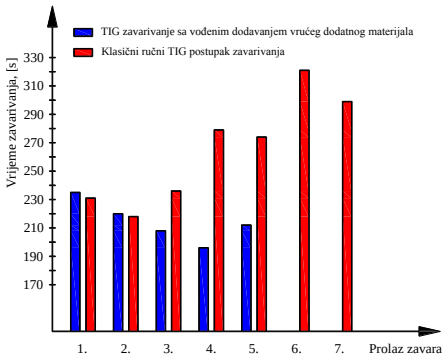
toplinsko opterećenje radnog komada značajno smanjuje. Uz to, samo u 2. prolazu (popuna) unos topline je viši kod TIP TIG-a za približno 6% .



Slika 10. Usporedba količine unesene topline tijekom zavarivanja.

Iz rezultata dobivenih eksperimentom vidljivo je da je korištenjem TIP TIG postupka zavarivanja moguće ostvariti niže količine unosa topline u radni komad, što je od značajne važnosti za zavarivanje materijala koji su osjetljivi na veliki unos topline. Bitno je napomenuti da se ovdje ne radi o značajnom snižavanju parametara zavarivanja već se radi o povećanju brzine zavarivanja uslijed čega je smanjen unos topline u radni komad. Povećanje brzine zavarivanja omogućeno je automatskim dodavanjem vrućeg dodatnog materijala što nije moguće kod klasičnog ručnog TIG zavarivanja.

Na slici 11. dana je usporedba vremena zavarivanja potrebnih za pojedini prolaz.



Slika 11. Usporedba vremena potrebnih za zavarivanje pojedinih prolaza zavara.

Iz dobivenih rezultata vidljivo je da je primjenom TIP TIG zavarivanja potrebno 5 prolaza za zavarivanje materijala debljine stjenke 14 mm, dok je kod klasičnog TIG zavarivanja s ručnim dodavanjem dodatnog materijala potrebno 7 prolaza. Također, za zavarivanje pojedinog prolaza upotrebom TIP TIG potrebno je manje vremena nego što je to potrebno za zavarivanje s klasičnim ručnim TIG postupkom zavarivanja. Smanjenjem broja prolaza smanjuje se i potrebno vrijeme izrade proizvoda, što u konačnici dovodi do smanjenja troškova.

7. Zaključak

TIP TIG zavarivanjem s vrućom žicom postiže se velika količina nataljenog dodatnog materijala čime se smanjuje potreban broj prolaza. Veliku količinu nataljenog dodatnog materijala moguće je ostvariti zahvaljujući zagrijavanju dodatnog materijala zasebnim uređajem.

TIP TIG zavarivanje je postupak koji ima velik broj parametara za podešavanje (jakost struje zavarivanja, brzina dodavanja dodatnog materijala, frekvencija osciliranja dodatnog materijala, jakost struje predgrijavanja dodatnog materijala) za koje je nužno poznavati pojedinačni utjecaj na geometriju spoja i dinamiku zavarivanja. Posebno je važno naglasiti relativno smanjenje unosa topline uz zadržavanje produktivnosti što dolazi do izražaja kod zavarivanja teže zavarljivih materijala.

Provedena analiza TIP TIG postupka pokazala je da je provedba automatskog zavarivanja ekonomski i tehnološki opravdana ali uz potpunu kontrolu procesa i poznavanje utjecajnih parametara.

8. Literatura

[1] Panjković, V., Zavarivanje visokolegiranih nehrđajućih čelika TIG postupkom s vrućom žicom, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2009.

[2] Kralj S.; Andrić Š.: Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka, Fakultet Strojarstva i Brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 1992.

[2] Garašić I.: Predavanja iz kolegija „Postupci zavarivanja“, Fakultet Strojarstva i Brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2006.

[4] Grubić K.; Juraga I.; Šimunović V.: Zavarivanje i korozijska postojanost visokolegiranih nehrđajućih čelika, Zbornik radova, Spajanje korozijski postojanih materijala, Opatija, 2003., str. 25- 33.

[5] Wegst C.; Wegst M.: Stahlschlüssel, Herausgabe und Vetrieb, Verlag Stahlschlüssel Wegst GmbH, 2004.

[6] Ammann T.: Zavarivanje dupleks čelika u zaštiti plinova, Zbornik radova (proceedings), 4th European conference on welding, joining and cutting, Dubrovnik, 2001., str. 443 do 452.

[7] Novosel M.; Juraga I.: Austenitno-feritni čelici otporni na djelovanje korozije (čelici DUPLEX), dio prvi i dio drugi, Časopis „Zavarivanje“, 1992. g., str. 31 do 35 i 85 do 96.

[8] . . . Zaštitni plinovi za zavarivanje, Odabrane tablice, Messer.

[9] Hori K.; Watanabe H.; Myoga T; Kusno K.: Development of hot wire TIG welding methods using pulsed current to heat filler wire – research on pulse heated hot wire TIG welding processes, Welding International, No. 18 (6), 2004. g., str. 456 do 468.

[10] ....www3.fronius.com/worlldwide/us/products/paper_tig_hotwire_ surfacing_bochum_germany_gb.pdf.

[11] ....www.dvs-ev.de/bvrostock/downloads/schemadarstellung.pdf.

[12] ....www.plasch.at/index.php?option=com_docman&task=cat_view &gid=17&Itemid=45&lang=en

[13] ....www.servus.hr, Karakteristike uređaja za zavarivanje.

[14] . . . Böhler katalog dodatnih materijala za zavarivanje.

TRENDOVI U RAZVOJU POSTUPAKA ZAVARIVANJA

Pripremio:
doc.dr.sc. I. Garašić

Intenzivan razvoj postupaka zavarivanja

- Produktivnost i kvaliteta
- Energetska učinkovitost i zaštita okoliša
- Zaštita na radu
- Osnovni materijali-zahtjevi obzirom na mehanička svojstva, korozijsku postojanost, puzanje itd.
- Dodatni materijali, prašci i zaštitni plinovi
- Automatizacija i mehanizacija
- Zavarivanje i spajanje raznorodnih materijala
- Proširenje broja varijacija postupaka u HRN EN ISO 4063

Područja razvoja

5. Izvori struje
6. Specifični dodatni materijali
7. Osjetilni sustavi (senzorika)
8. Programski sustavi za modeliranje i simulacije
9. Adaptivna kontrola procesa i praćenje parametara
10. Razvoj i inovacije samih postupaka zavarivanja-nove alternative koje su sada uz stanje razvoja tehnike ostvarive

Kronologija - od ideje do primjene

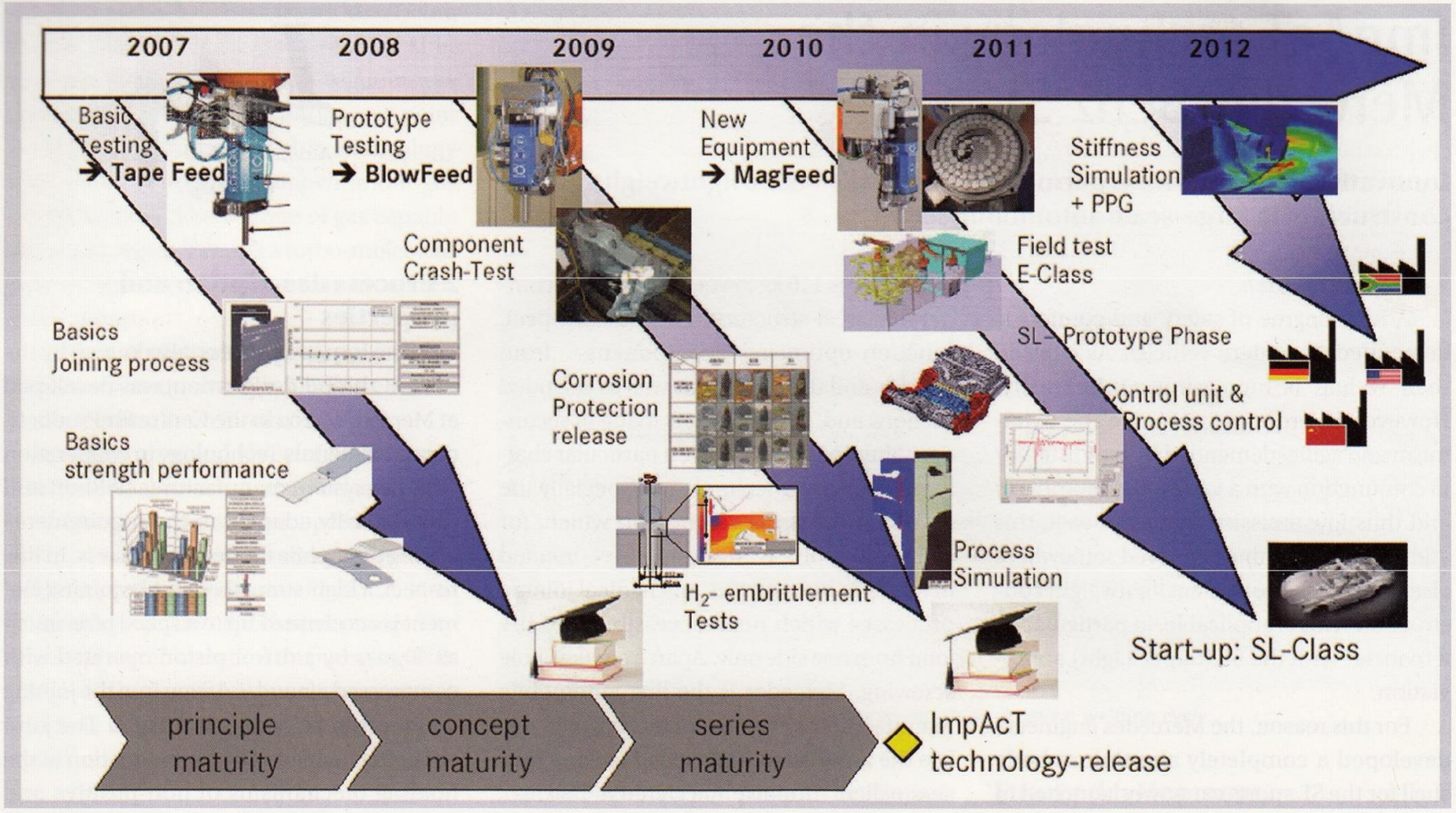
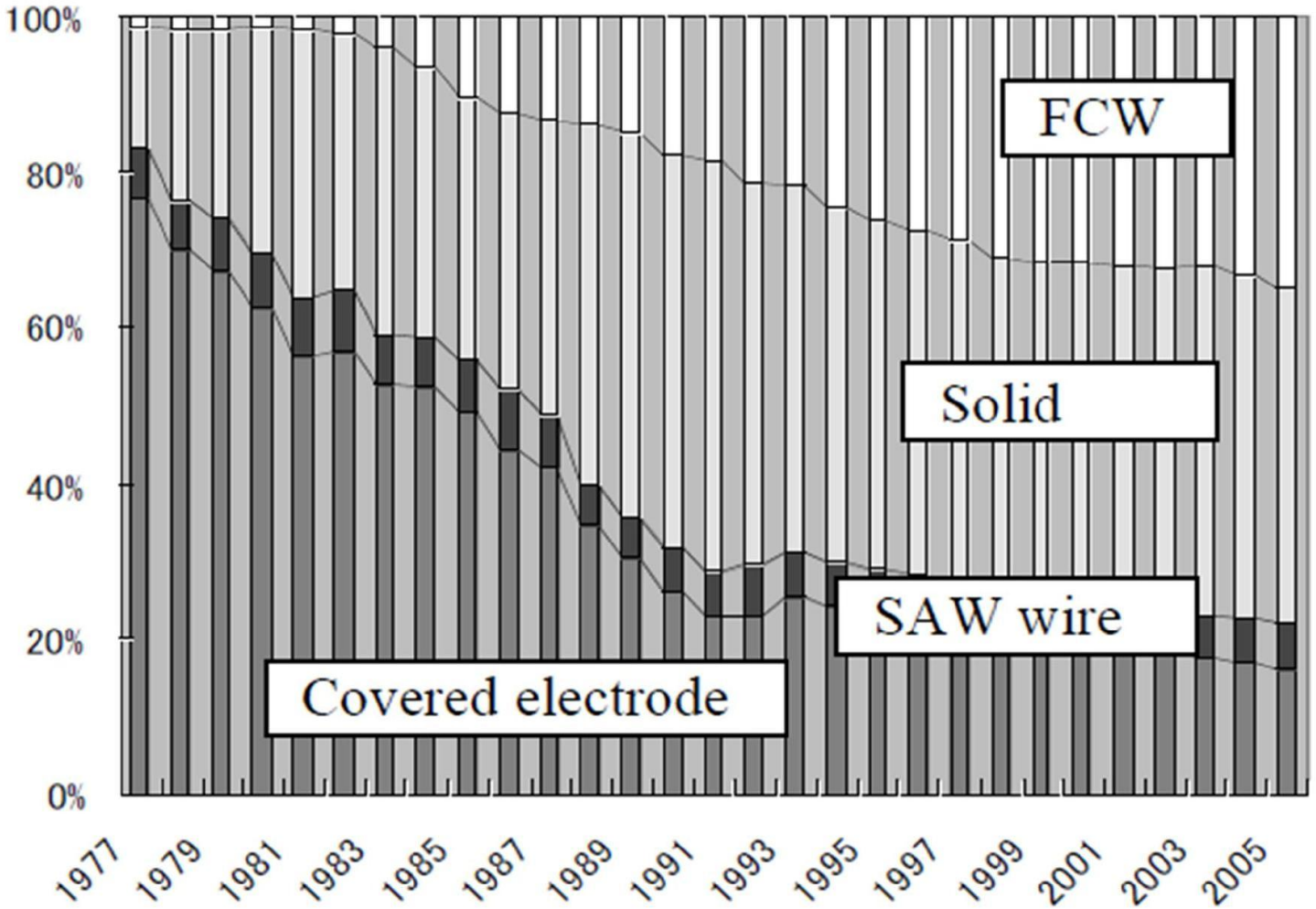


Fig. 3 • Validation of the ImpAcT technology in the Centre for Production and Materials Technology (source: Daimler AG).

Kako potrošnja dodatnih materijala ukazuje na trendove razvoja?



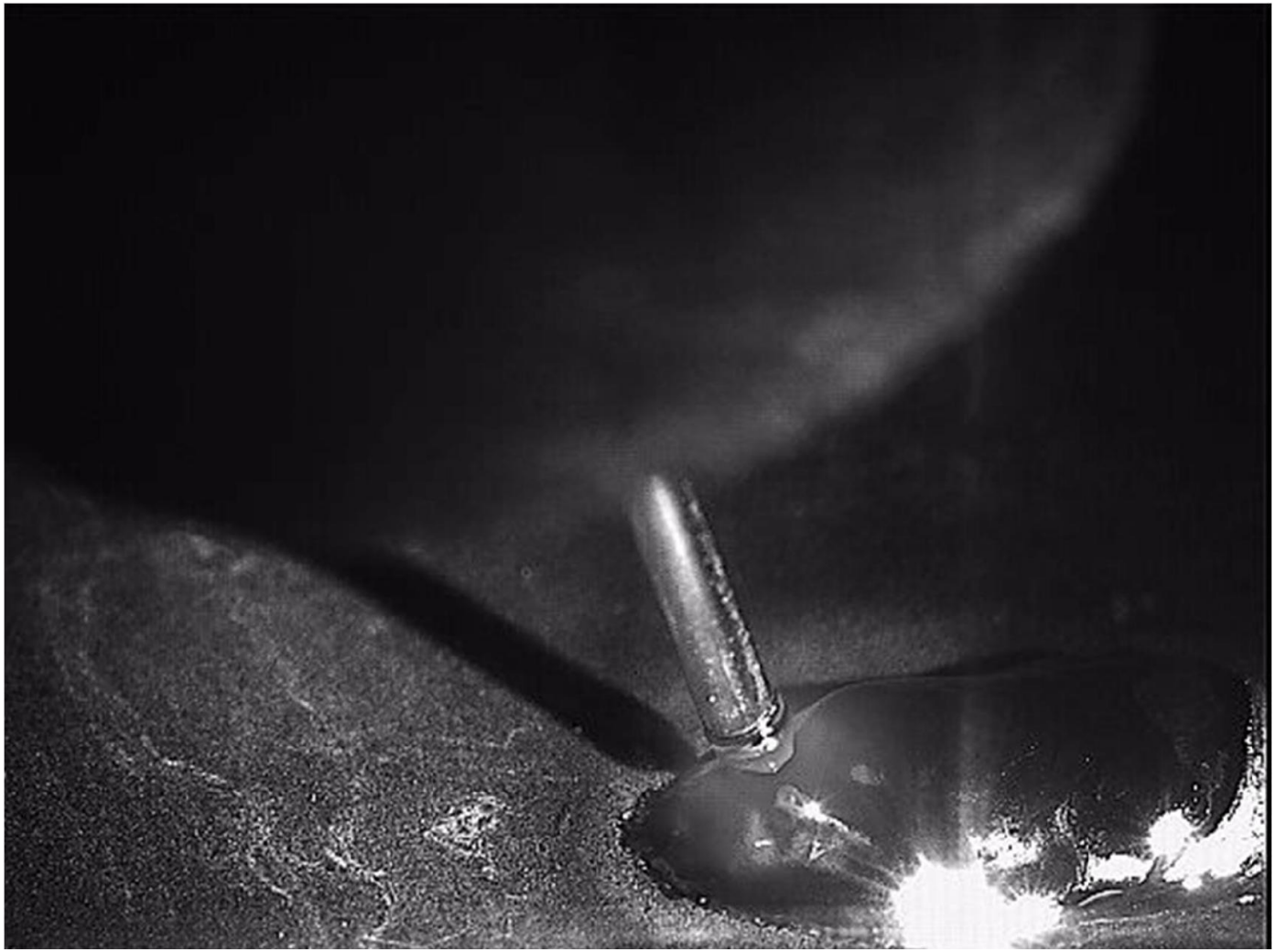
MIG/MAG

6. Modificirani postupci uz minimalne izmjene u konceptu MAG zavarivanja
7. Izuzetna kontrola prijenosa materijala u električnom luku
8. „niskoenergijski” postupci
9. povećana penetracija
10. „prepoznavanje” dužeg slobodnog kraja žice
11. MIG lemljenje-CuSi, CuAl žice

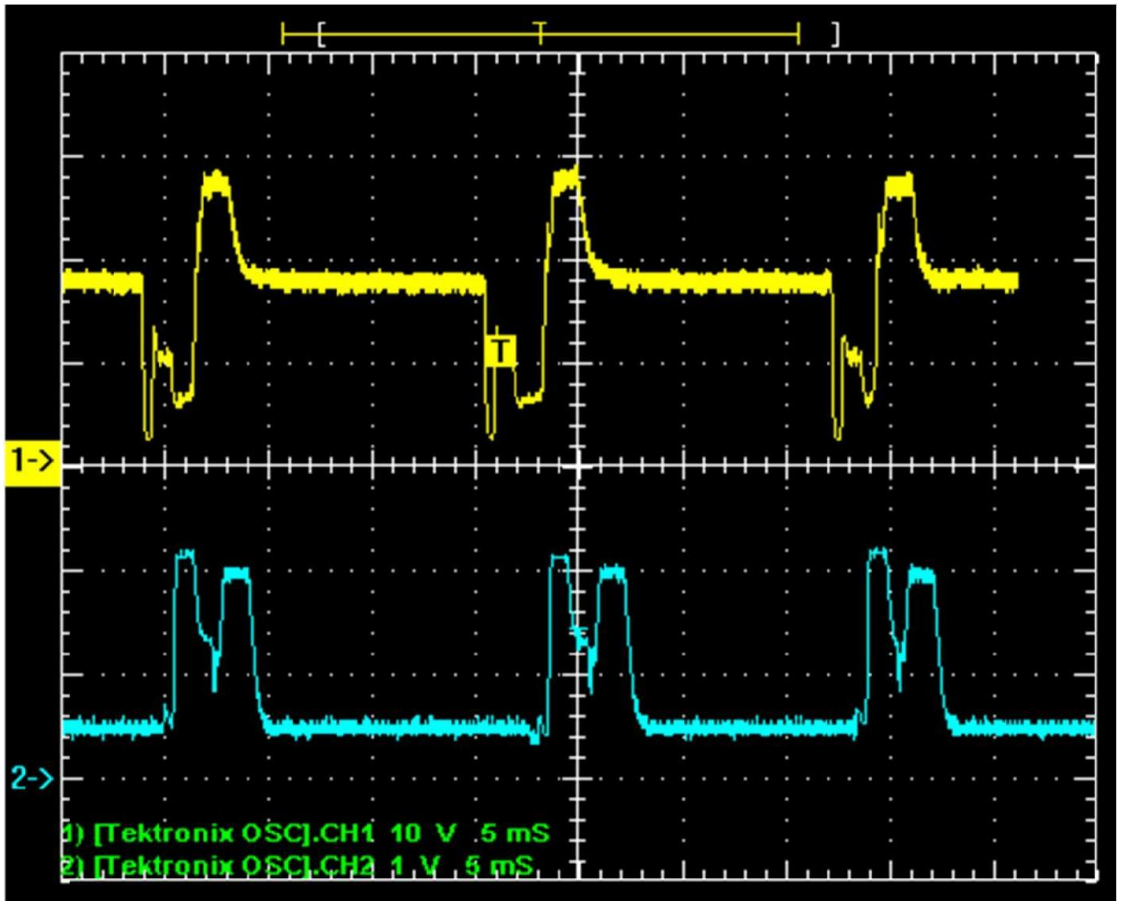
Kako se postižu takve karakteristike?

- Kratki spoj i štrcajući luk - osnovni koncept, samo ga treba "kontrolirati"
- Primjena kontroliranog prijenosa metala u električnom luku-mehanički ili elektronički reguliranim upravljanjem
- Balans polaritetom između elektrode i osnovnog metala-AC MIG
- Kombinacija impulsnog zavarivanja i kratkih spojeva-optimalizacija unosa topline
- Mogućnost kontrole parametara u svakom trenutku odvajanja kapljice

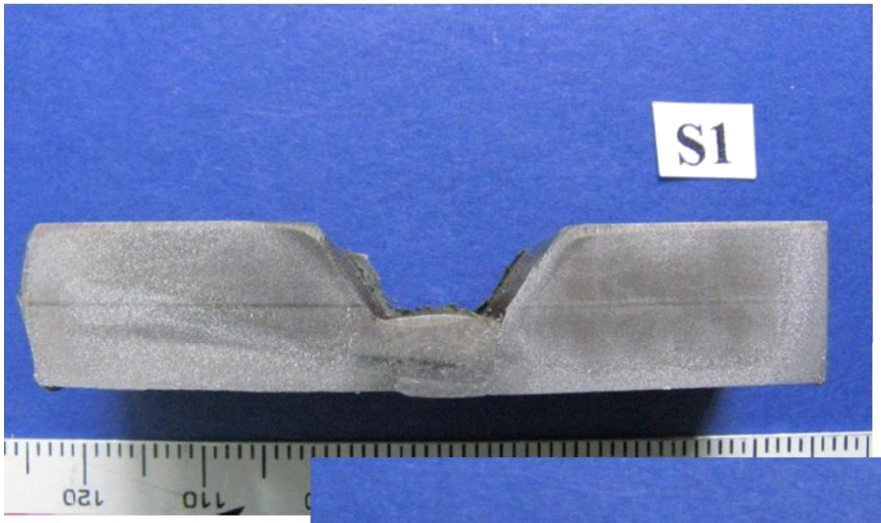
Prijenos metala u električnom luku- snimljeno u laboratoriju FSB-ZK



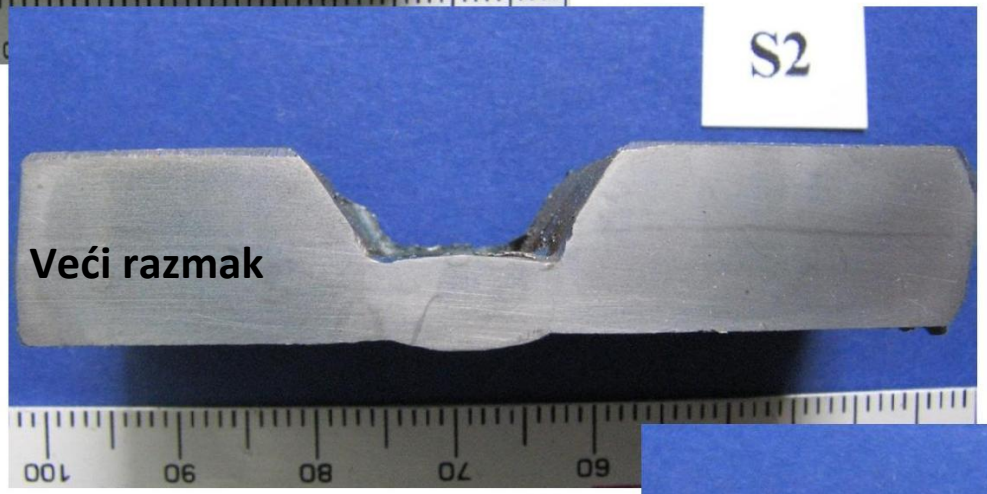
„Waveform control”- upravljanje izlaznom strujom i naponom izvan okvira „prirodnih „ načina prijenosa metala

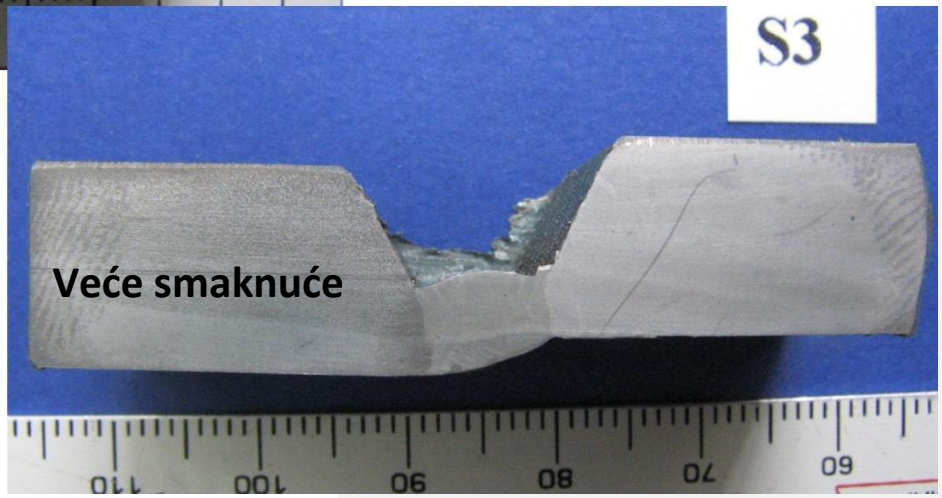


Provar korijena

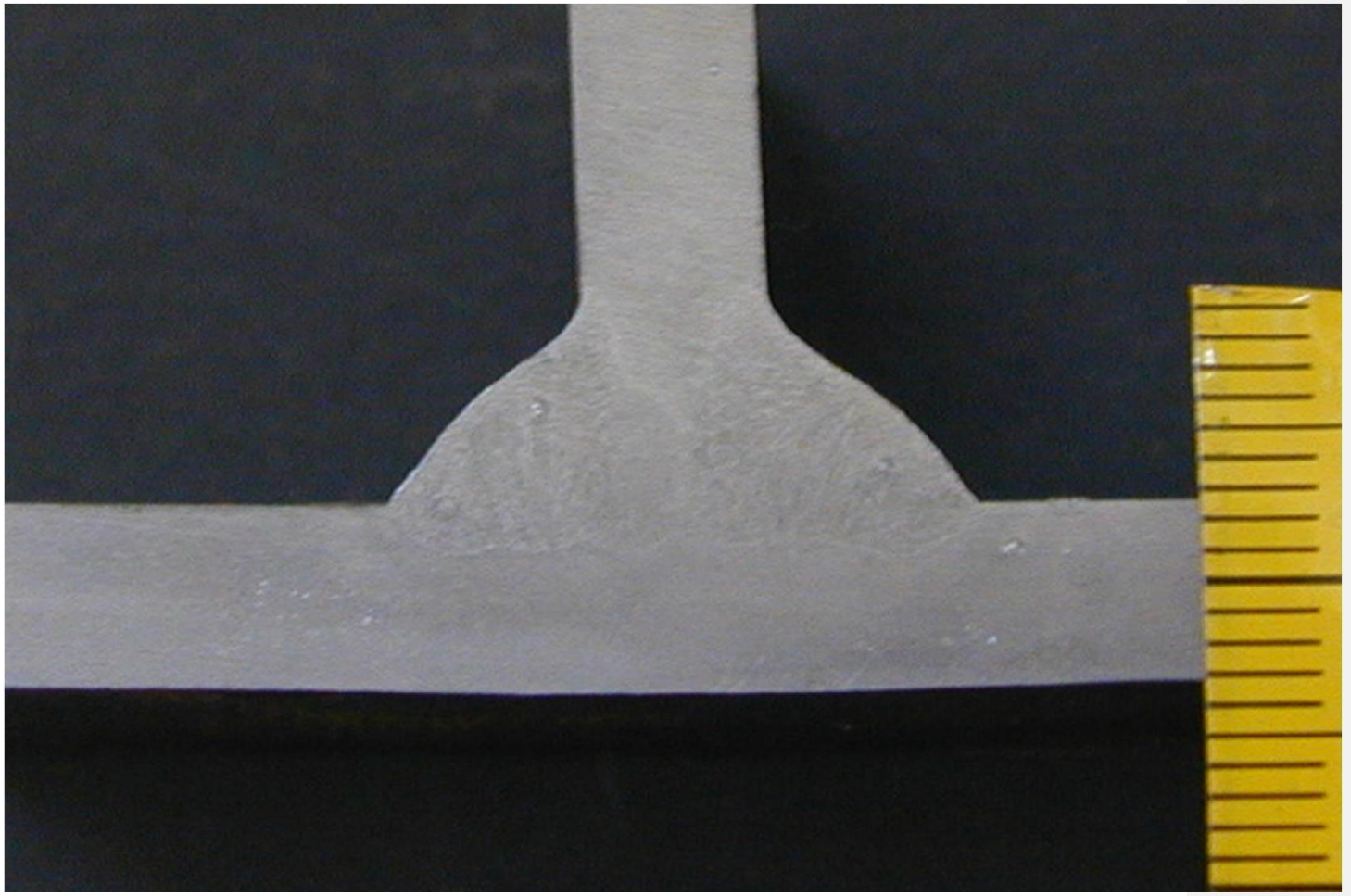


Kvalitetna priprema

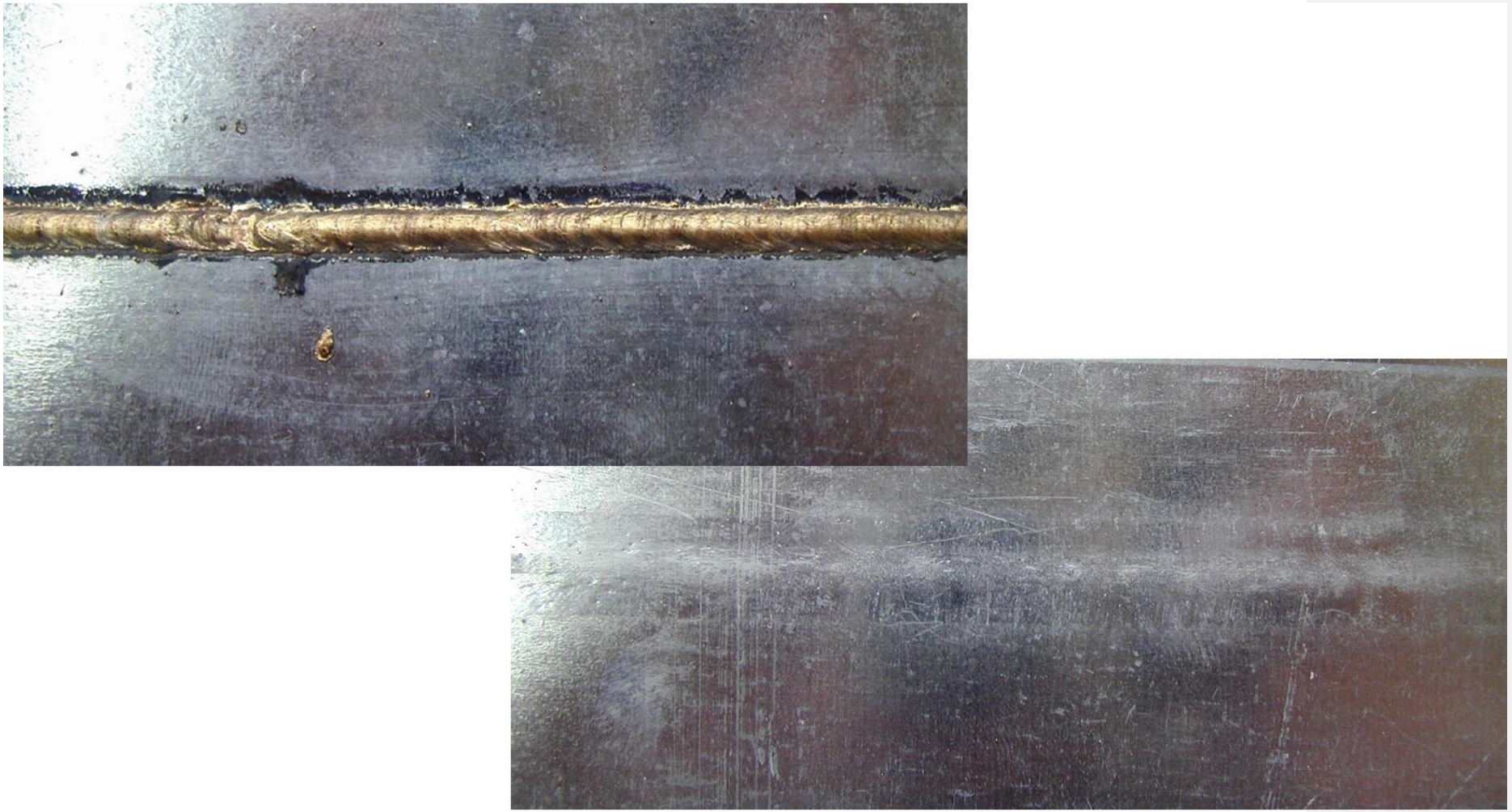




Povećana penetracija



Primjena za tvrdo lemljenje-bez izgaranja cinka na drugoj strani



EPP

- Izvori struje sa AC izlazom
- Primjena kvadratnih oblika izlazne struje i napona
- Prašci i dodatni materijali- kombinacije za čelike visoke čvrstoće
- Zavarivanje u vertikalnom položaju?
- Sustavi sa više žica („multi wire”)- stupovi vjetroelektrana

Zašto EPP u vertikalnom položaju?

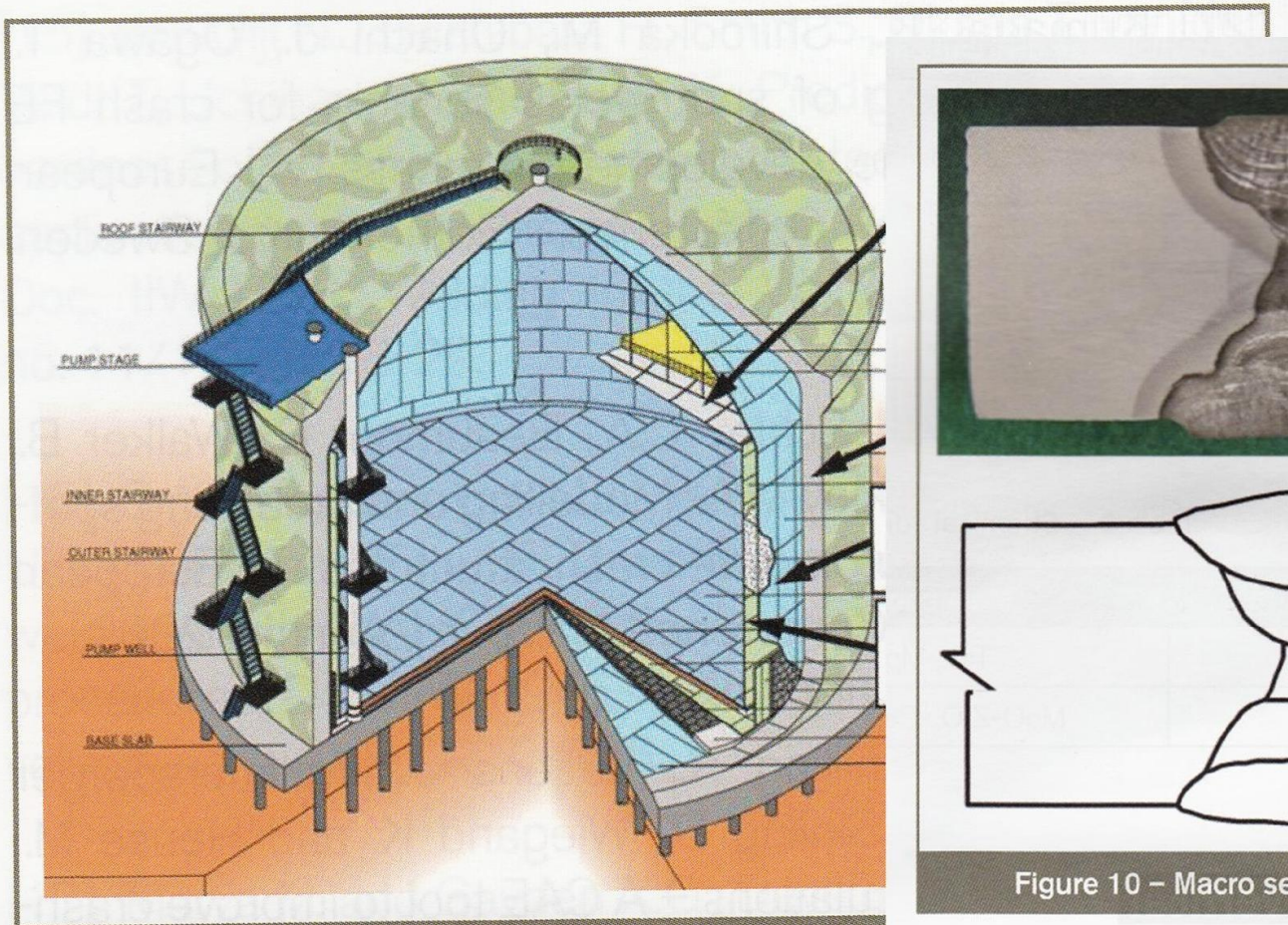


Figure 1 – PCLNG storage tank

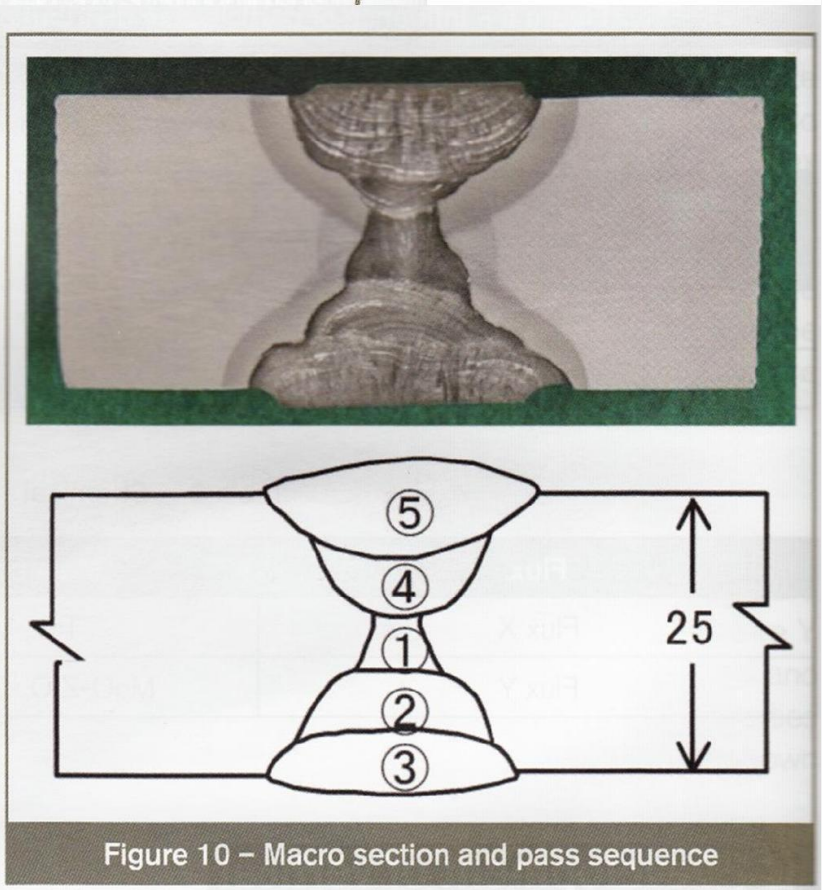


Figure 10 – Macro section and pass sequence

Izvedba opreme za EPP vertikalno zavarivanje

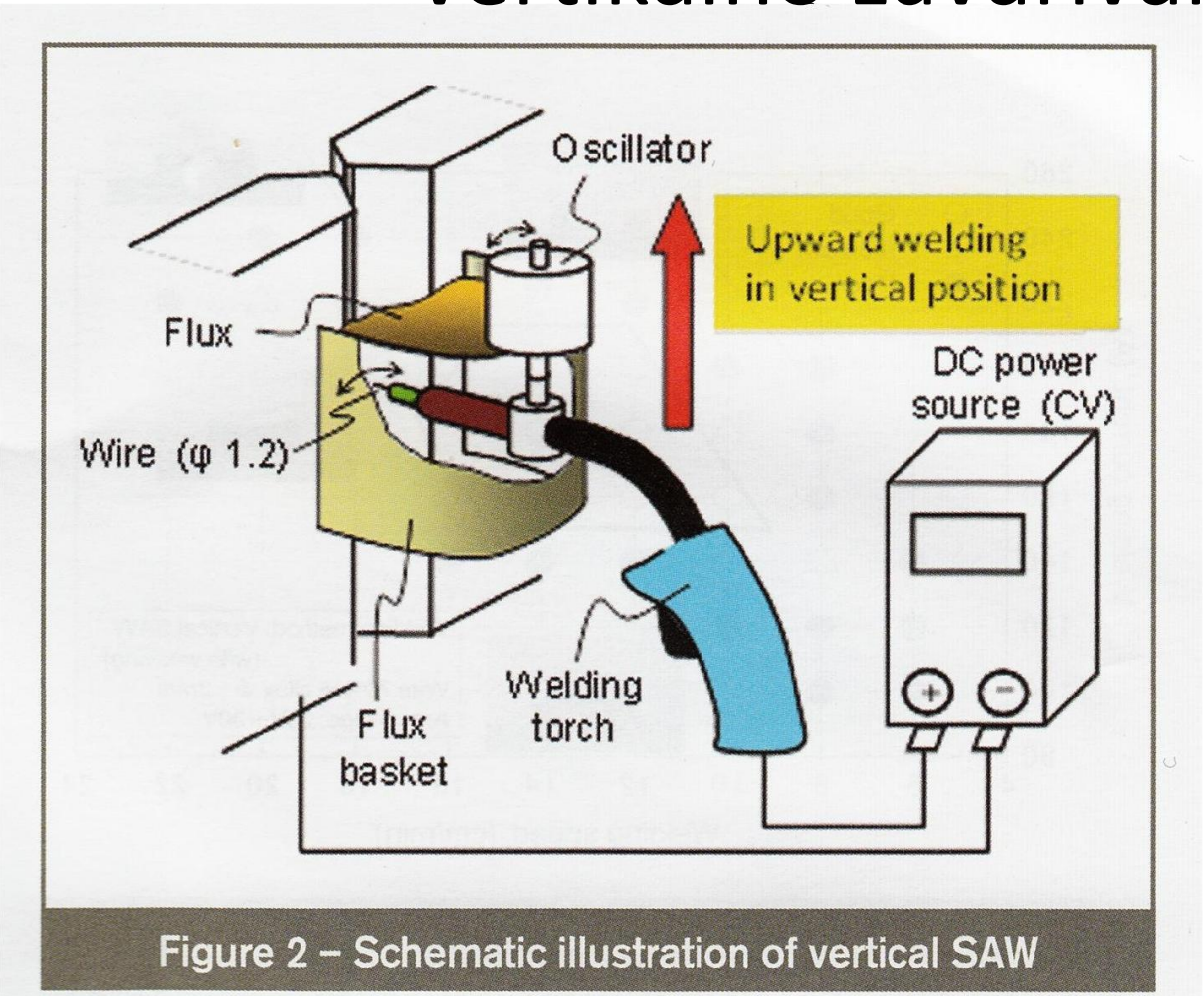
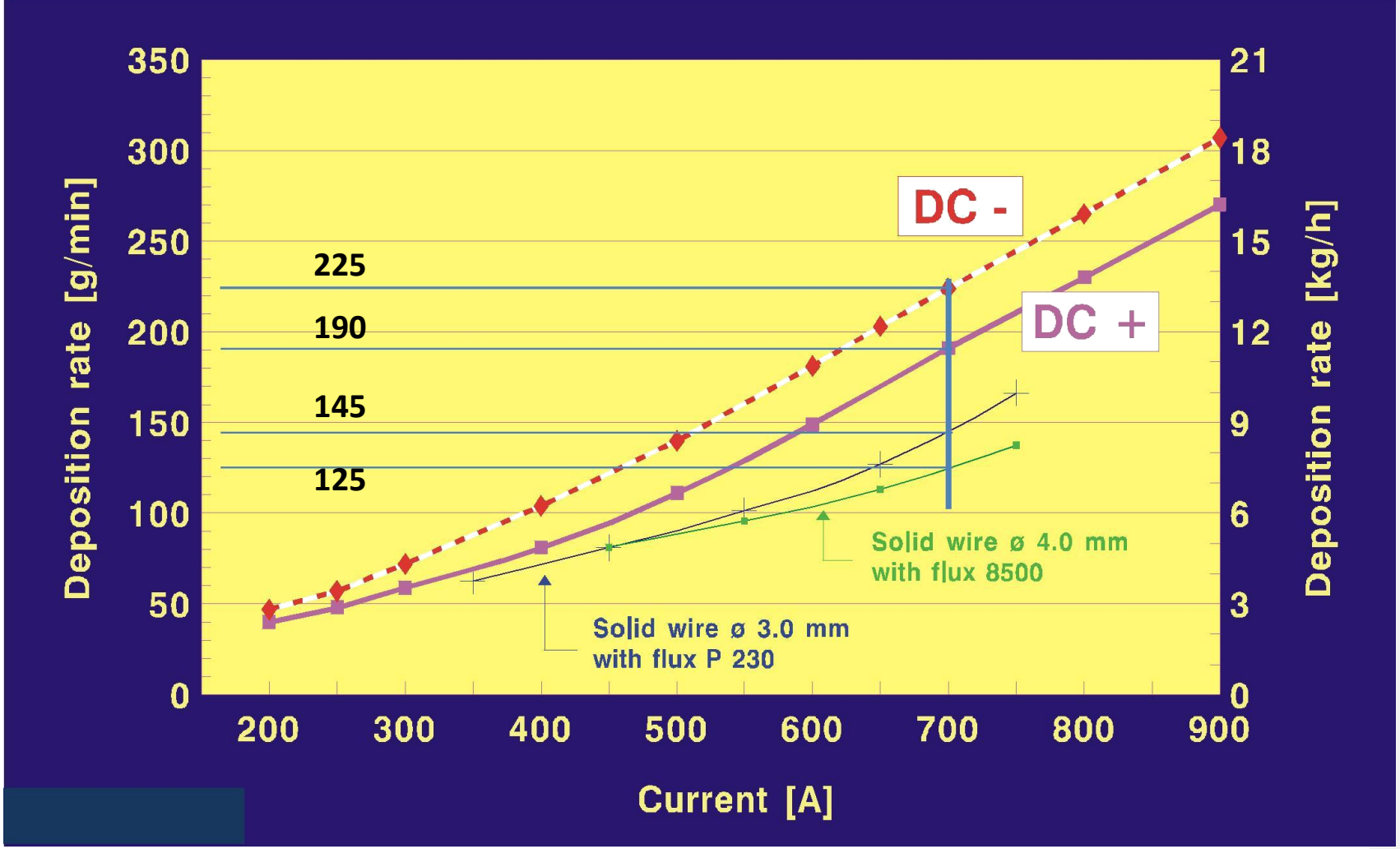


Figure 2 – Schematic illustration of vertical SAW

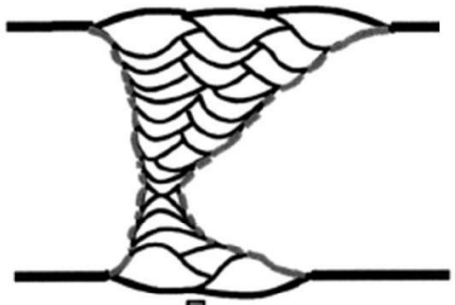
Utjecaj polariteta na količinu nataljenog metala- žica 860and promjera 2,8mm nfrompoarity

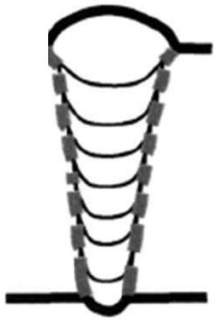


Povećanje depozita-utjecaj na mehanička svojstva?

Primjena zavarivanju u uskom žlijebu

Uski ZUT



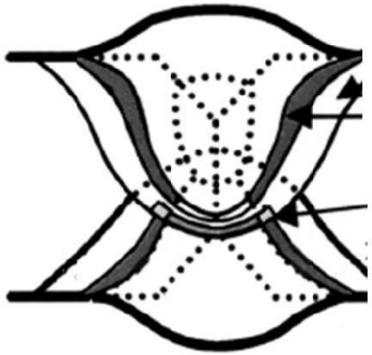


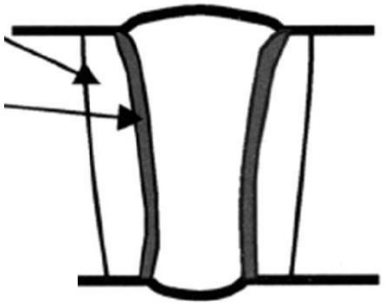
Povećanje unosa topline radi većeg depozita

Uski žlijeb i visoki depozit

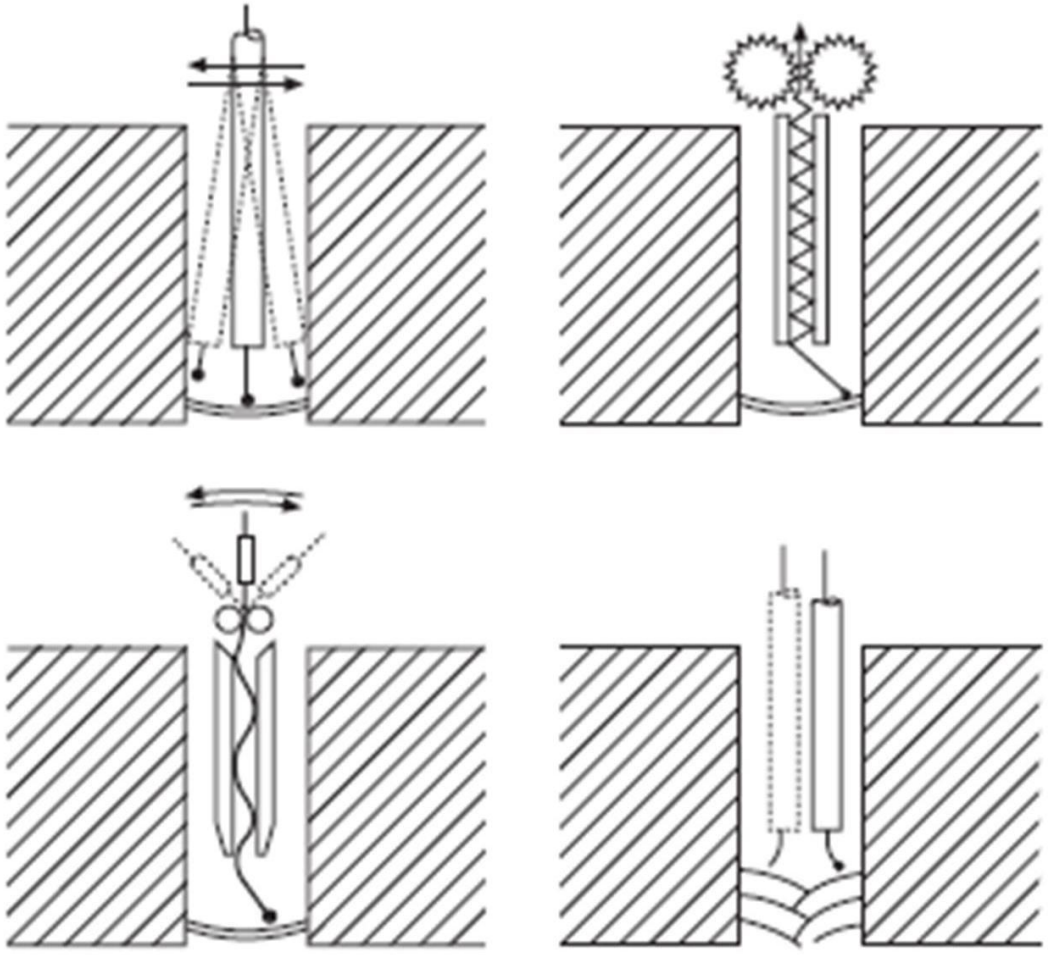
Omekšana zona
Grubozrnata zona
Grubozrnata zona ponovno pregrijana zona

Široki ZUT

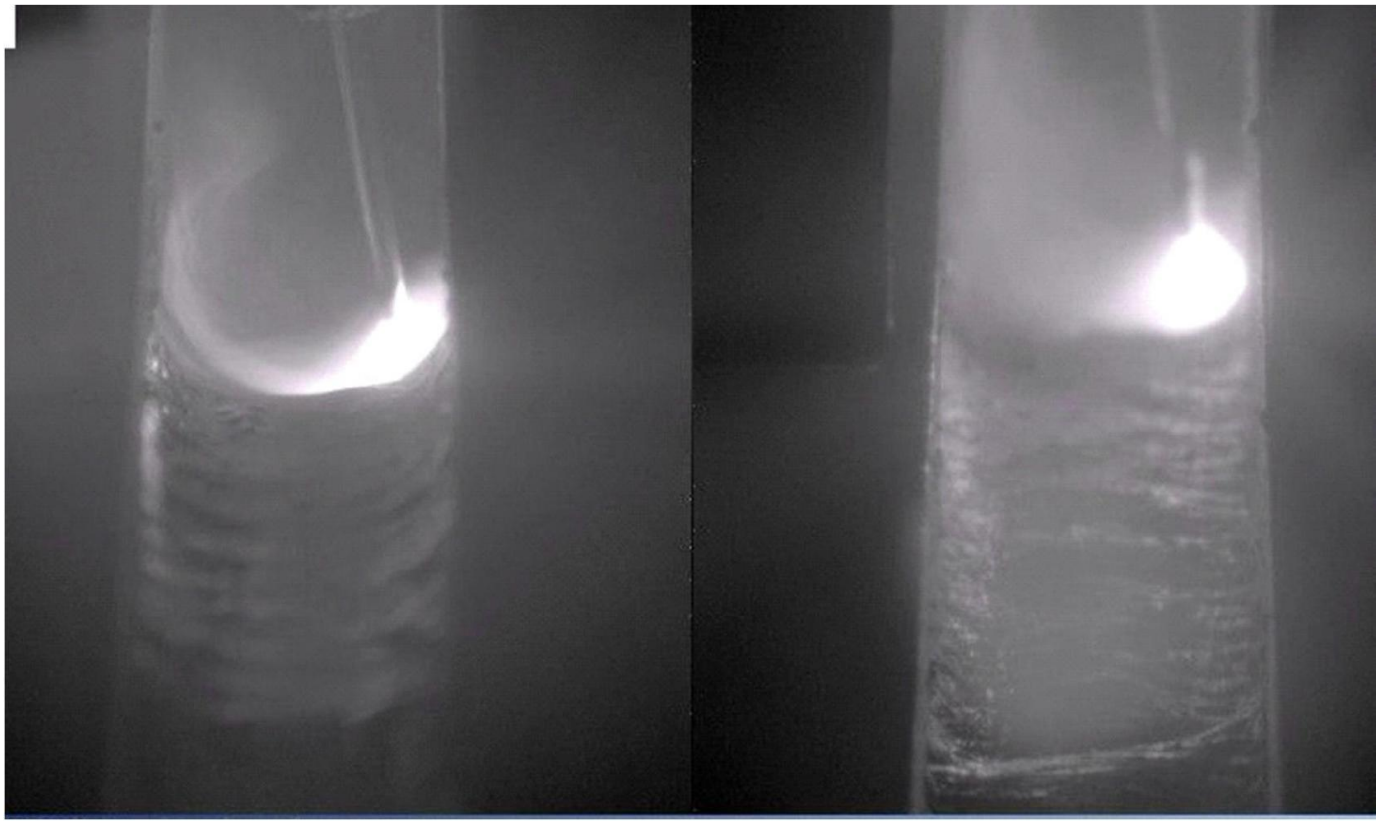




Zavarivanje u uskom žlijebu- kako kontrolirati proces?



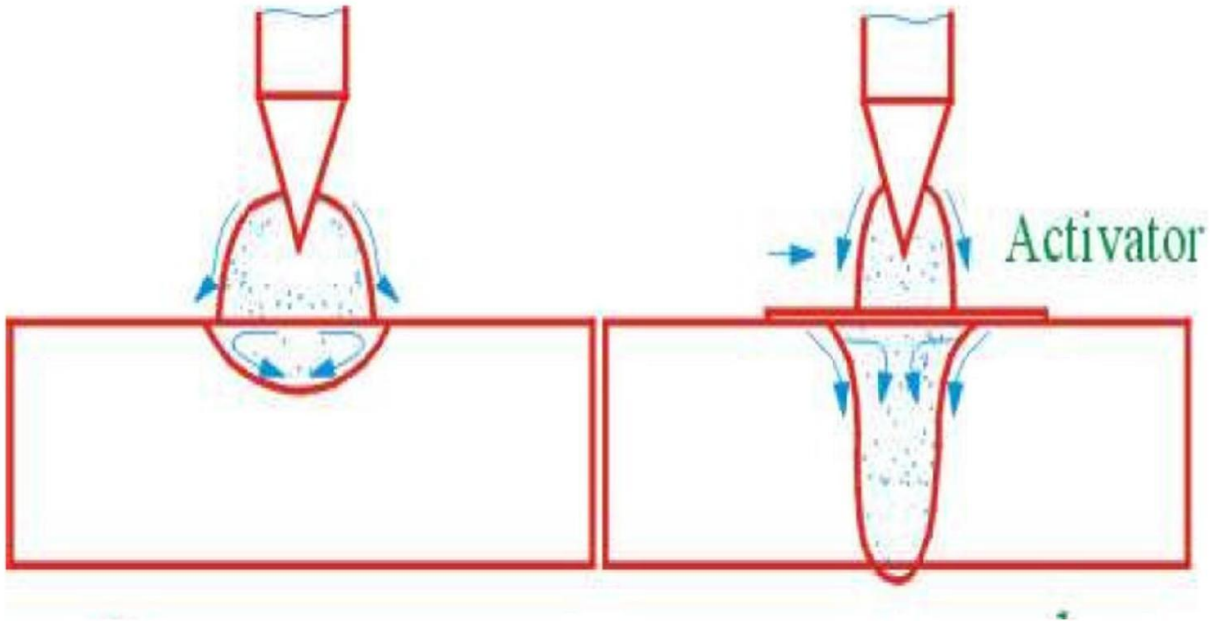
Praćenje zavarivanja u uskom žlijebu kamerom



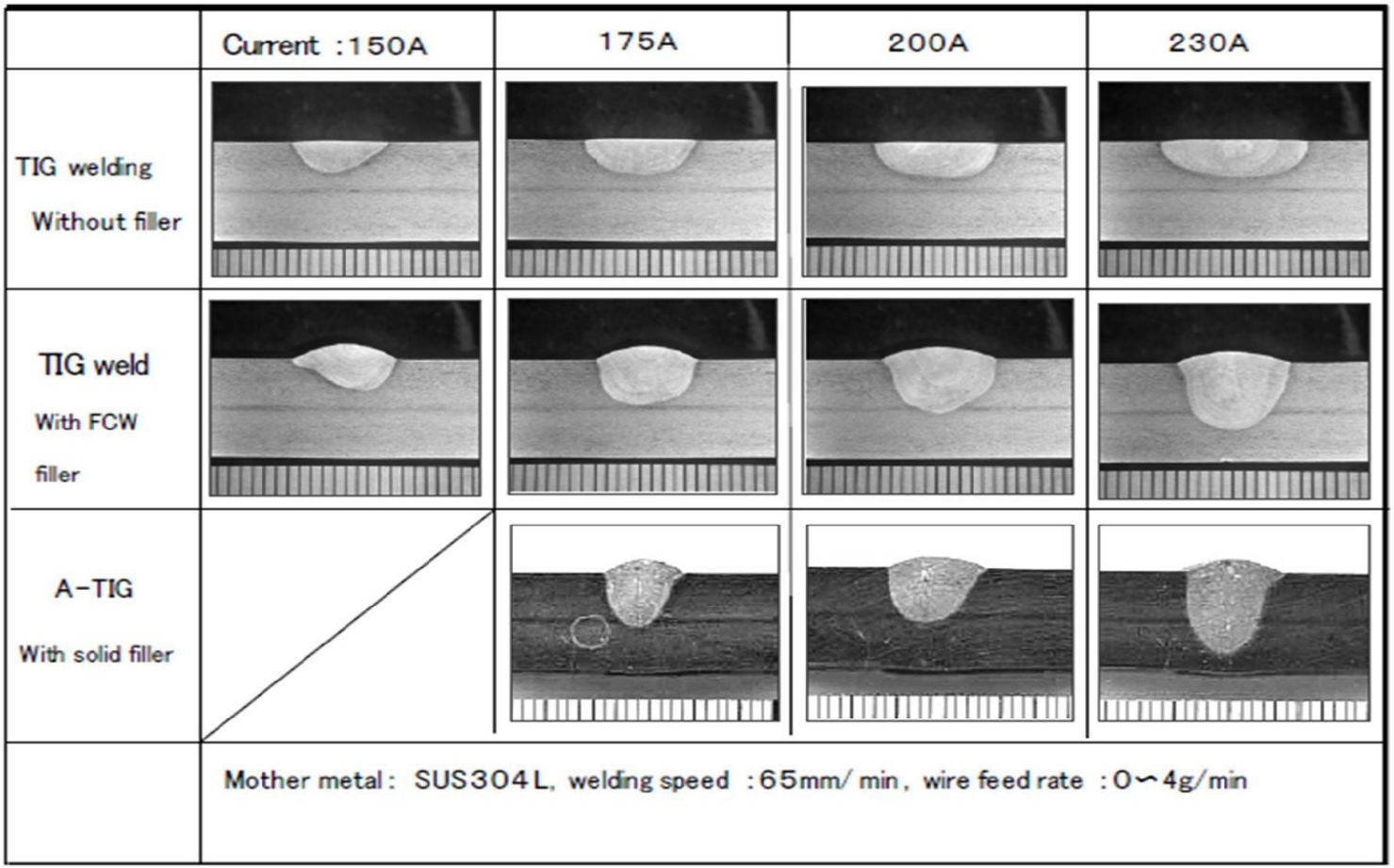
TIG

- Uspostava el. luka i razvoj elektroda (lantanov oksid)-zamjena za torij
- Dodatni materijali-praškom punjene žice-nema zaštite korijena
- A-TIG-primjena aktivatora
- K-TIG -visoko penetracijski postupak- „keyhole”
- Automatsko dodavanje materijala-vruća i hladna žica
- Impulsna struja kvadratnog oblika
- Visoke frekvencije impulsnog zavarivanja
- „dual-gas” sustav
- oznake prema HRN EN ISO 4063-više opcija!!

Primjena aktivatora -razlika u penetraciji kod TIG i A-TIG postupka



Utjecaj na penetraciju- TIG, TIG sa PPŽ i A-TIG sa punom žicom



Hibridni postupci

- Laser MAG (52+135)
- Laser plazma (52+15)
- Laser TIG (52+141)
- Plazma MIG (151)-poseban postupak
- Postizanje bolje penetracije uz kompenzaciju lošije pripreme i dodavanje dodatnog materijala-metalurški bolje opcije
- Prvenstveno automatski postupci

Robotizirano hibridno laser MAG zavarivanje

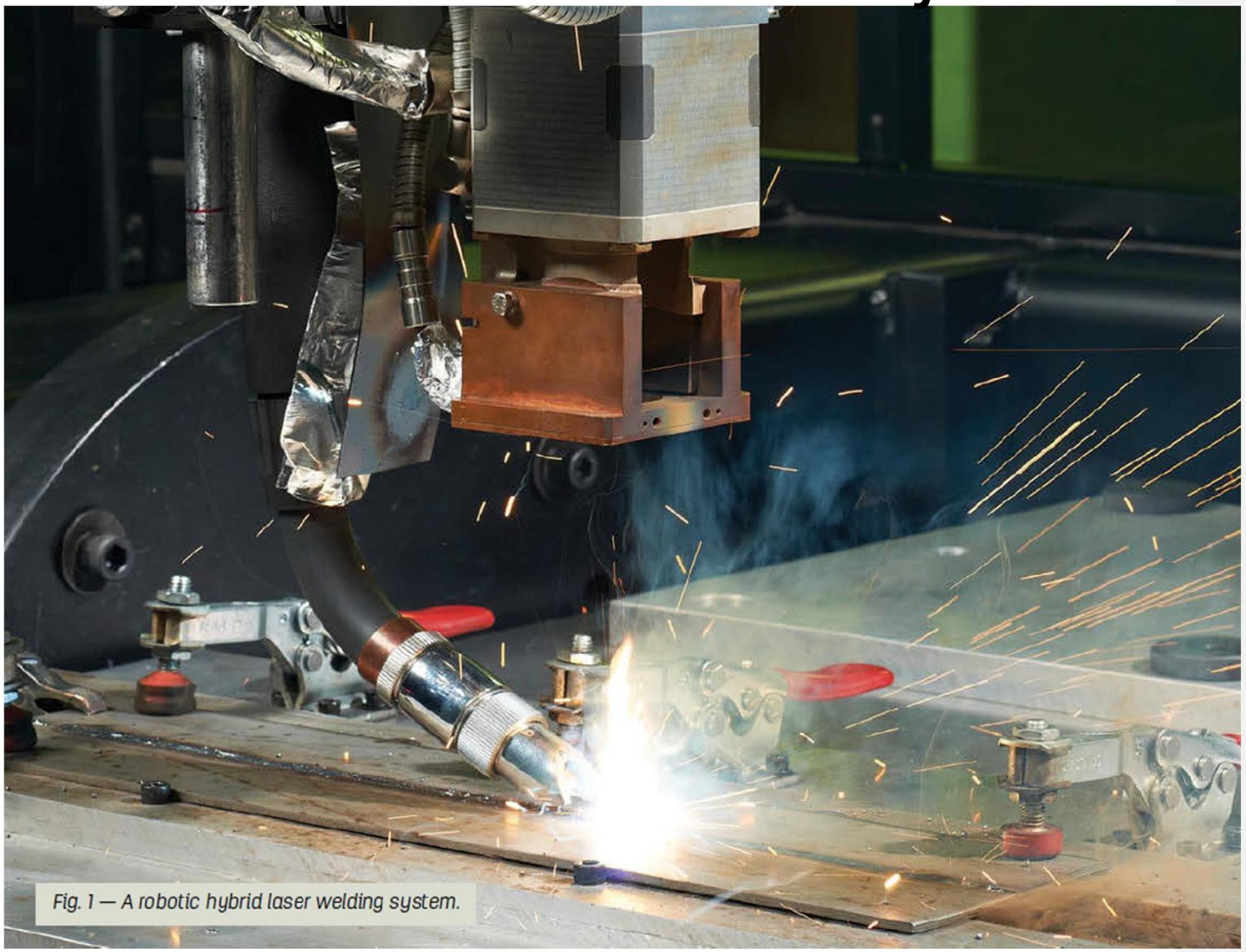
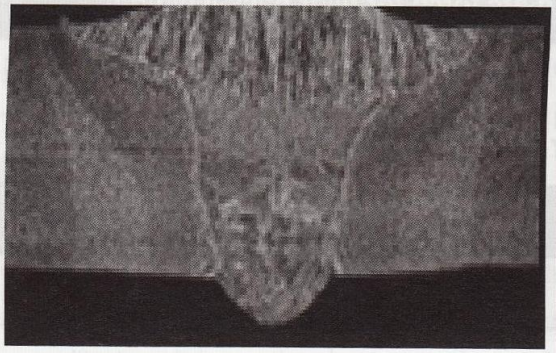
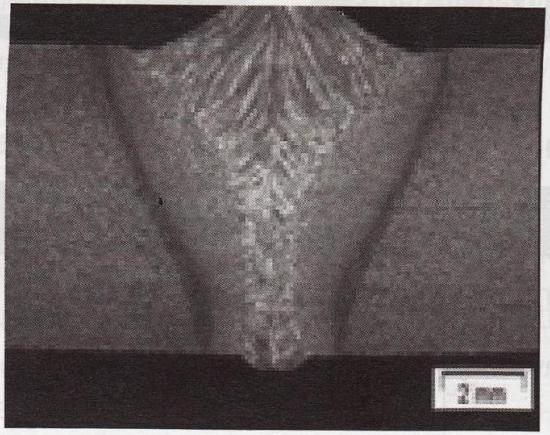
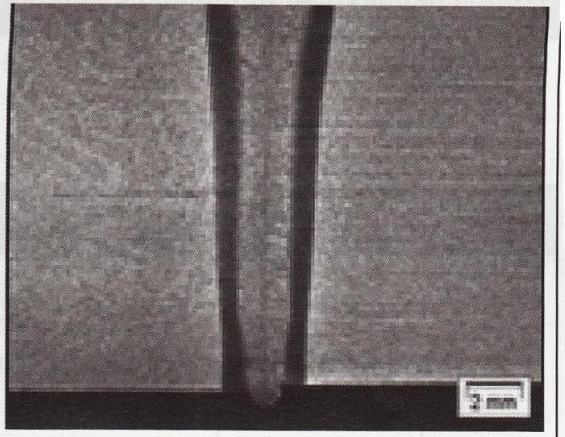
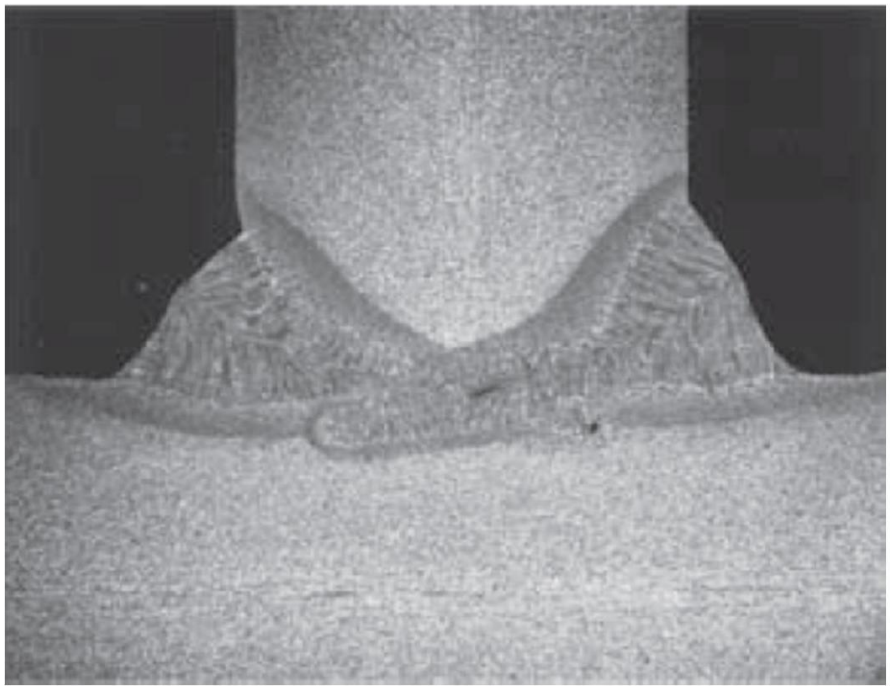


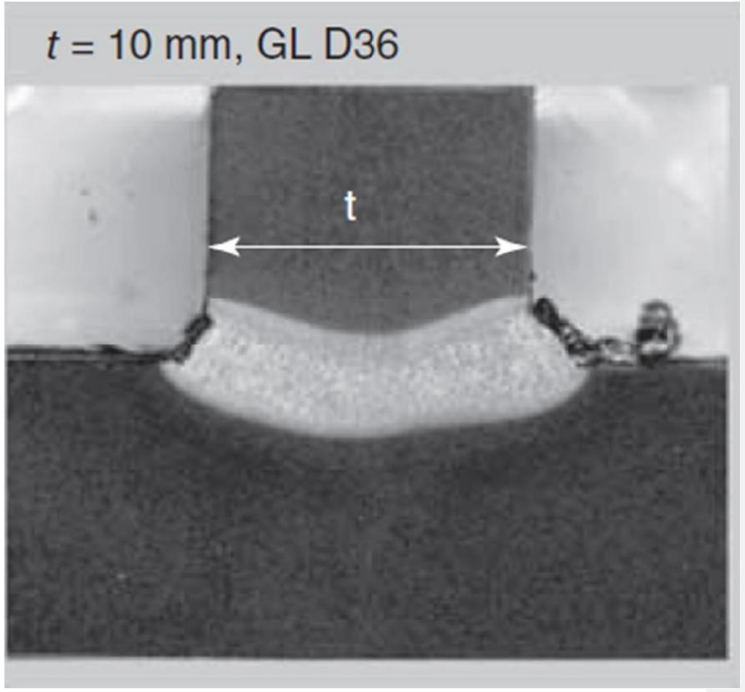
Fig. 1 — A robotic hybrid laser welding system.

Raspodjela unosa energije-MAG i laser

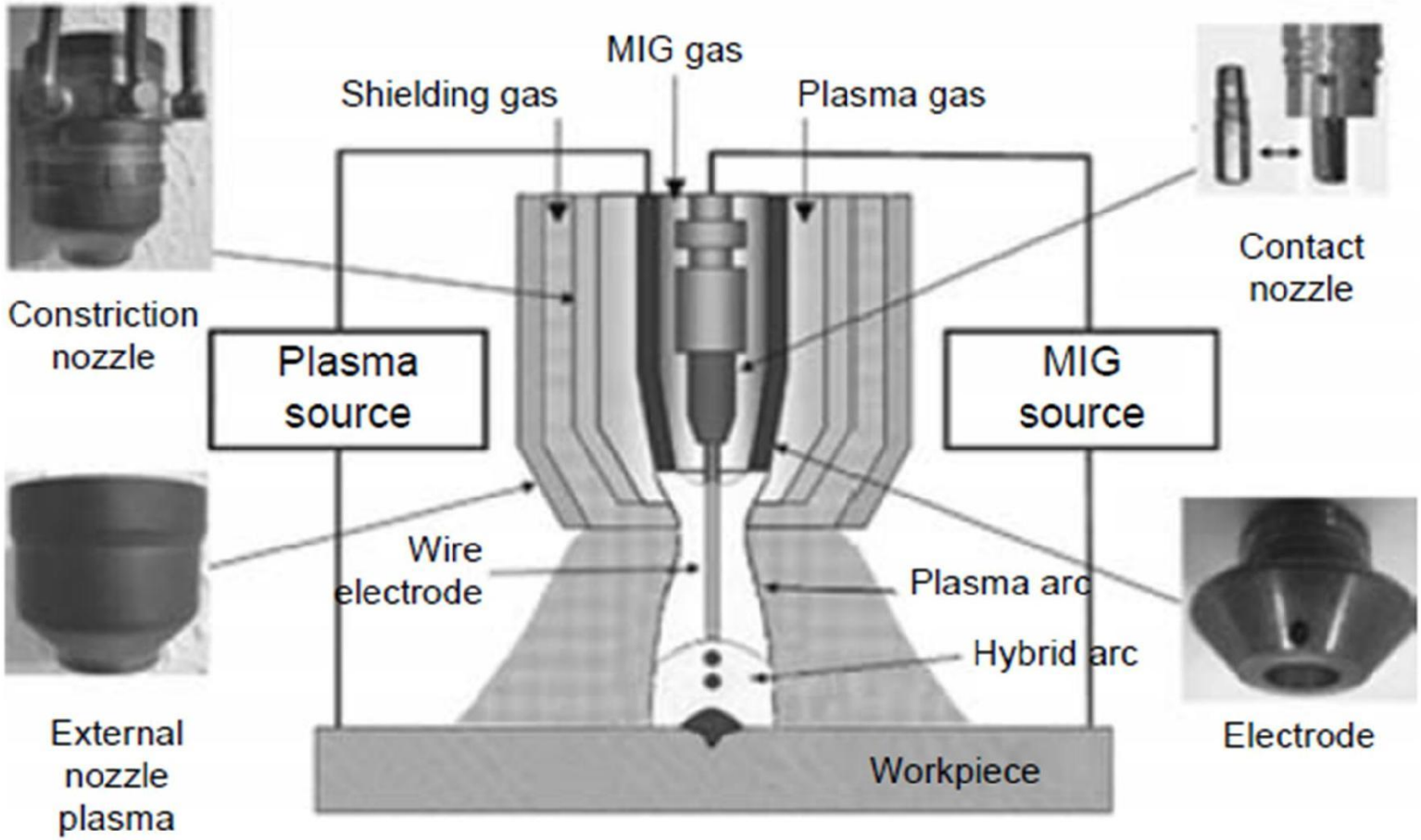
GMA	Hybrid	Laser
		
3 runs	4,6 kW laser output	10,5 kW laser output
2,4/7,5/7,5 kW arc	9 kW arc output	
500 s/m (0,12 m/min)	75 s/m (0,8 m/min)	20 s/m (3,0 m/min)

Primjeri penetracije kod hibridnog zavarivanja





Plazma MIG zavarivanje



Izvori struje za zavarivanje

- Primjena invertorske tehnologije
- Veća učinkovitost i manja potrošnja struje po kg nataljenog materijala
- Napredno upravljanje i kvalitetno definirane sinergijske krivulje
- Jednostavna integracija sa automatiziranim i robotiziranim sustavima

Razlika u potrošnji struje za isti depozit-impulsno i konvencionalno MAG zavarivanje

Table 3 — CV vs. Pulsed GMAW

Pulsed vs. CV	CV	Pulsed
Average current	265 A	235 A
Voltage	27 V	27 V
Cost of power	$0.11/kWh	$0.11/kWh
Power supply efficiency	80%	80%
Utilization	80%	80%
Yearly power cost	$6139	$5444

Koji su zahtjevi robotiziranog i automatiziranog zavarivanja?

- Stabilan električni luk i kvalitetan prijenos materijala
- Intermitencija
- Hlađenje pištolja za zavarivanje
- Robustan i pouzdan sustav za dovod žice
- Dobra regulacija i kontrola luka
- Adekvatna priprema
- Organizirana radna okolina-odstupanja u dimenzijama radnih komada
- Roboti-primjena senzora-taktilni, elektrolučni, laserski, vizijski

Comment [T31]: Odgovor na pitanj br. 30

Integracija senzora-automatsko zavarivanje cjevovoda

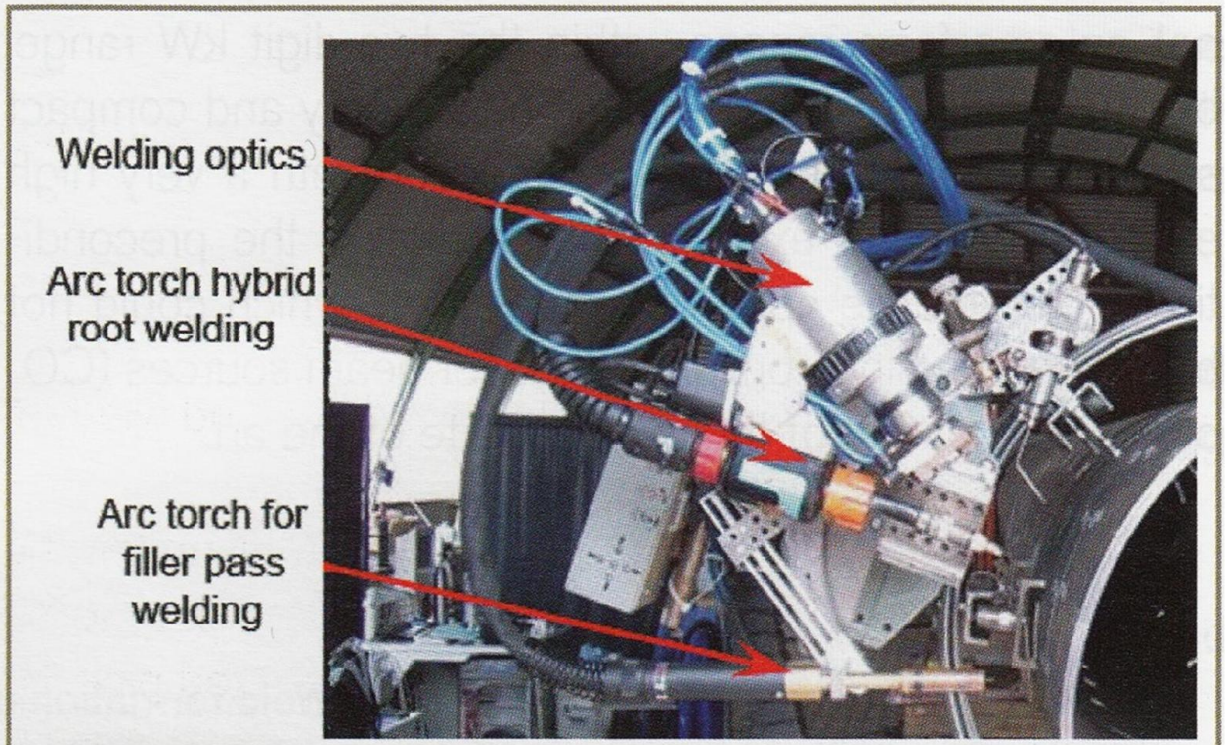


Figure 3 – Weld head with hybrid equipment for first pass welding and arc torch for filler pass welding

Razvoj dodatnih materijala

- Prilagodba novim vrstama osnovnih materijala
- Zahtjevi za povećanjem žilavosti, čvrstoće i otpornosti na puzanje
- Smanjen unos vodika (povezano sa povećanjem čvrstoće čelika)
- Bolja operativna svojstva
- Nehrđajući čelici – duplex gradacije

Comment [T32]: Odgovor na pitanj br. 31

Kako razvoj čelika diktira zahtjeve razvoja postupaka zavarivanja?

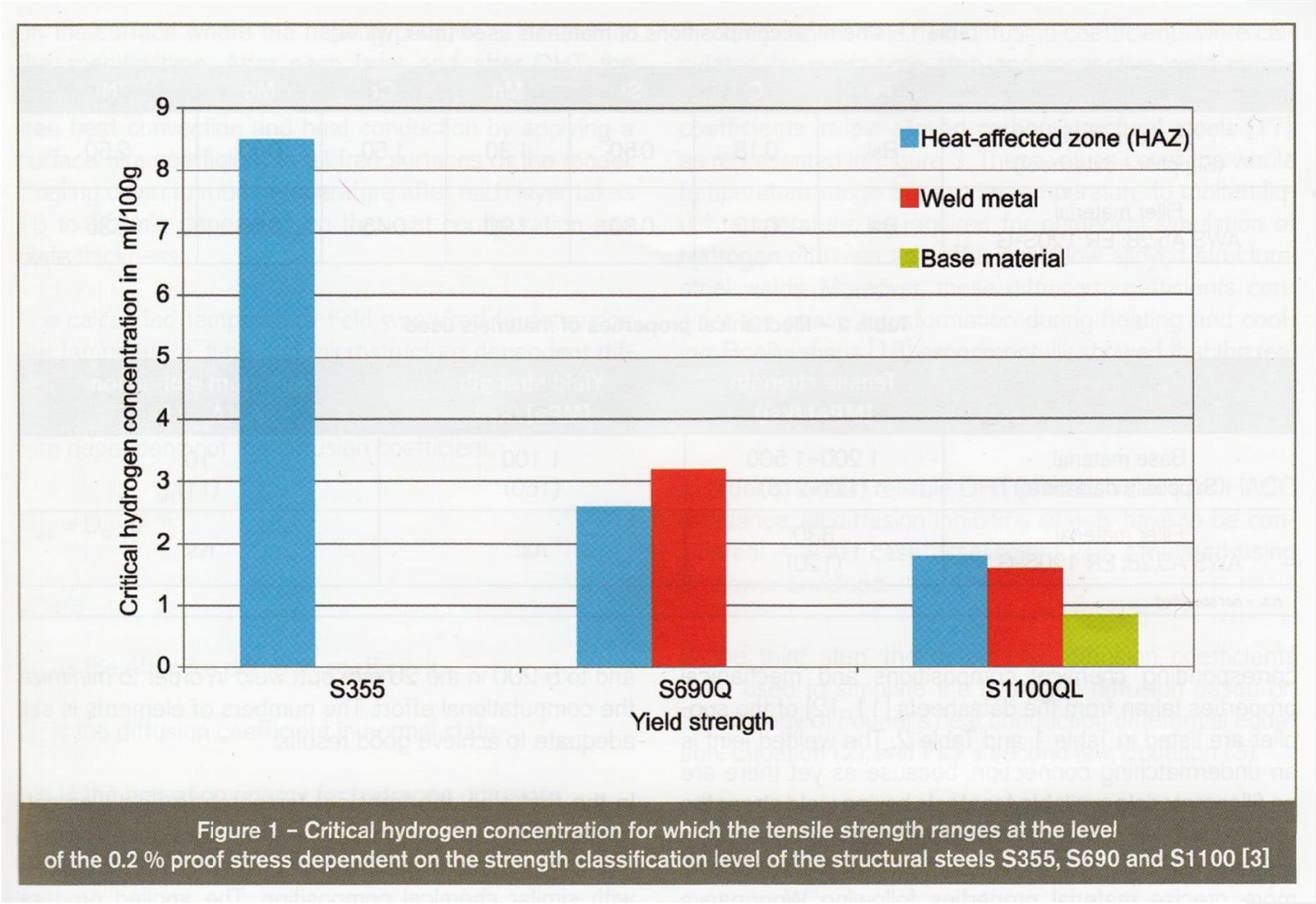


Figure 1 – Critical hydrogen concentration for which the tensile strength ranges at the level of the 0.2 % proof stress dependent on the strength classification level of the structural steels S355, S690 and S1100 [3]

Mikrolegiranje borom-zavarivanje P92

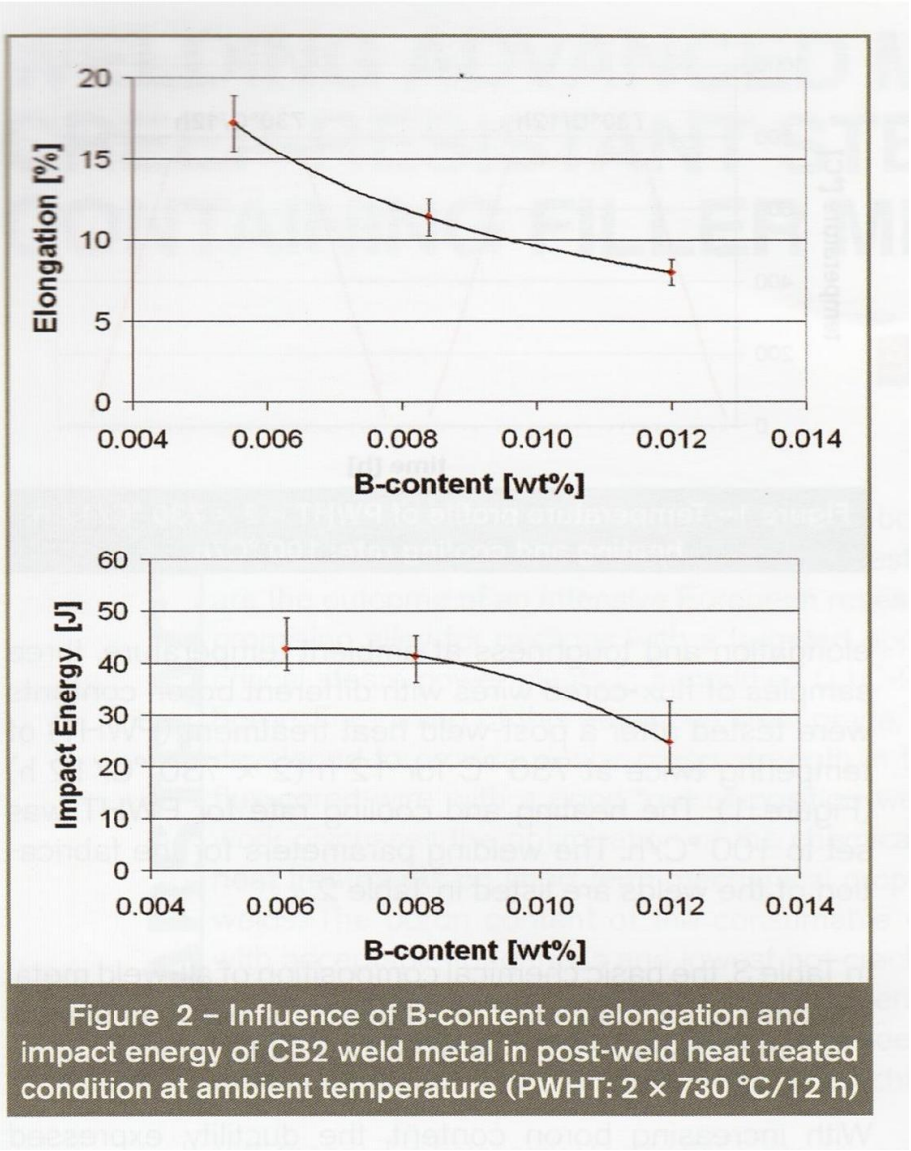
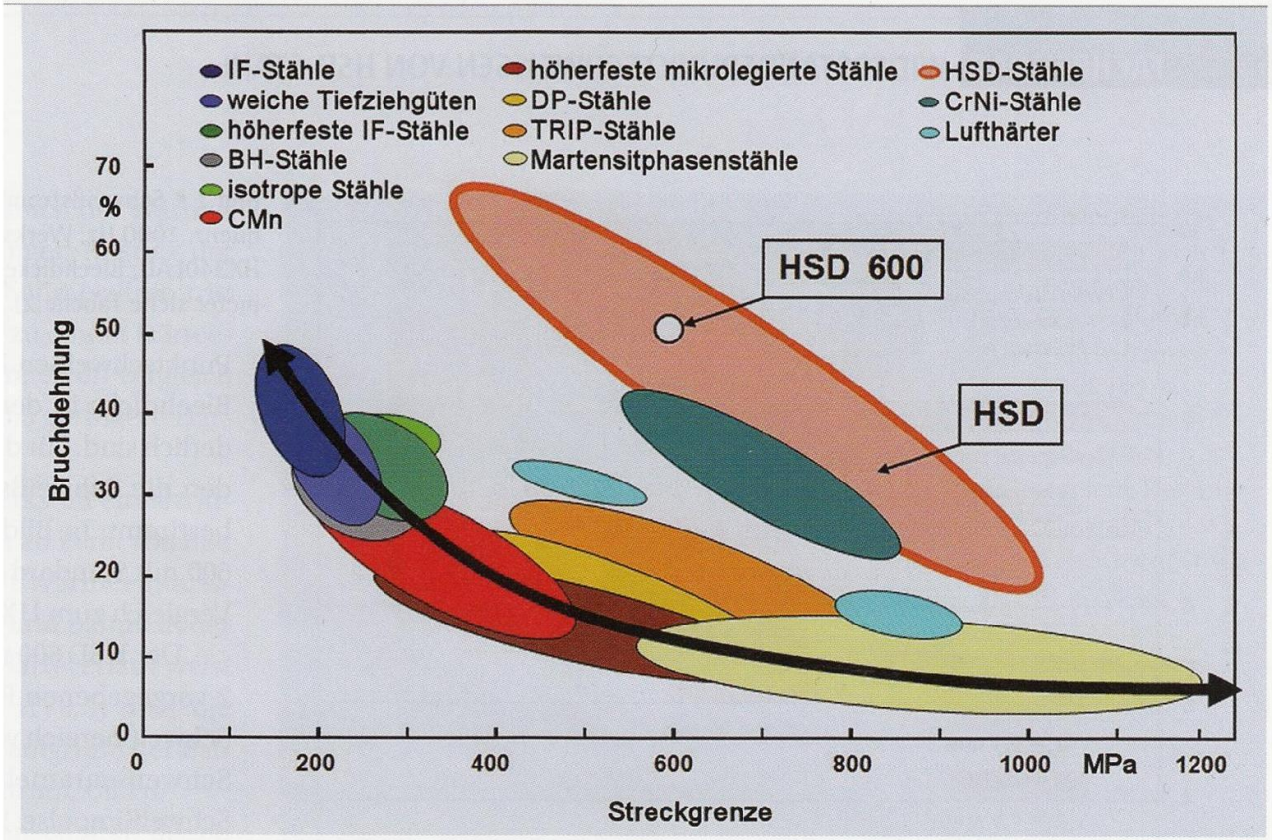


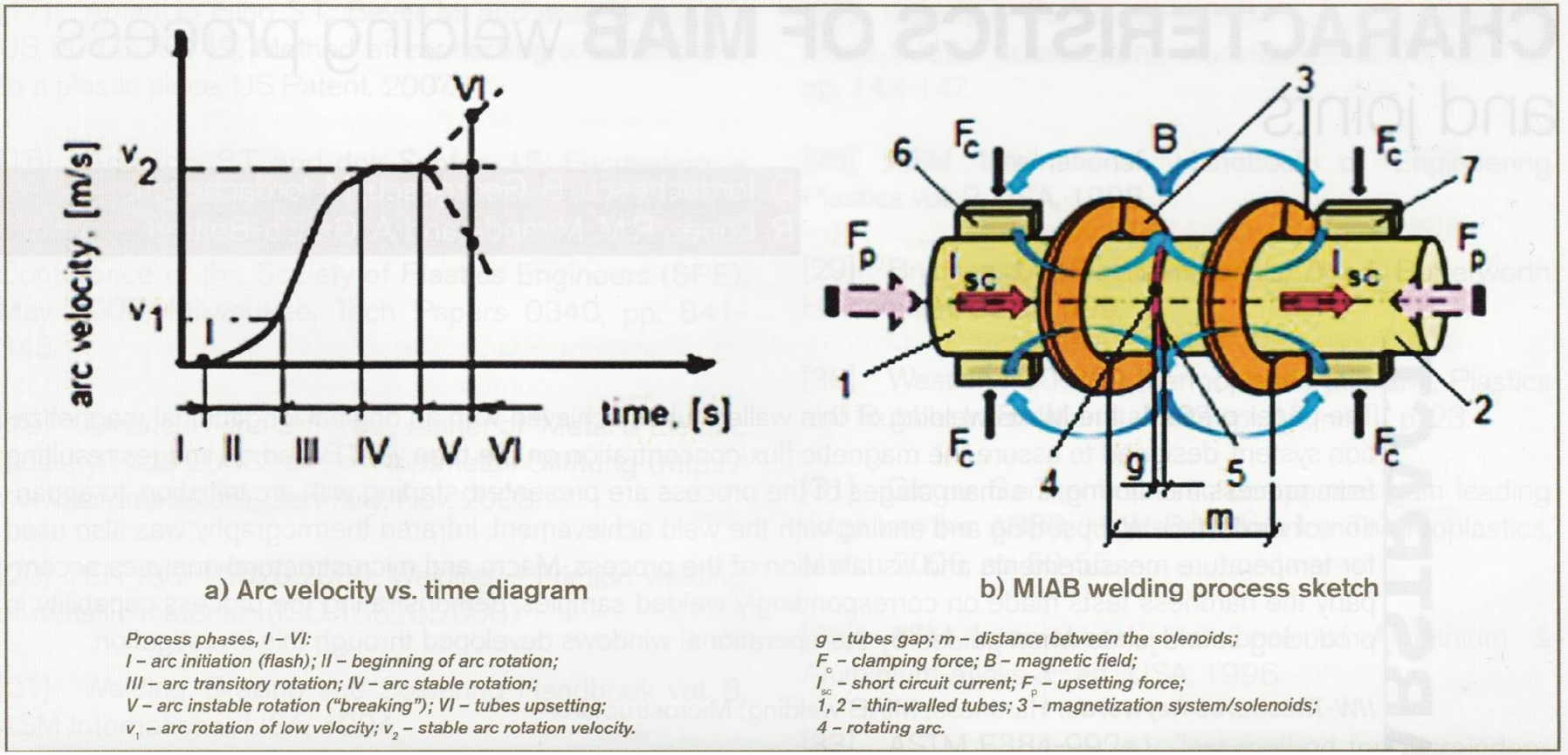
Figure 2 – Influence of B-content on elongation and impact energy of CB2 weld metal in post-weld heat treated condition at ambient temperature (PWHT: 2 × 730 °C/12 h)

Elektrootporno zavarivanje-čelici visoke čvrstoće za autoindustriju-parametri?



Werkstoff	Kappenform	Elektroden-kraft (kN)	Impuls-zahl	Schweiß-zeit (ms)	Pausen-zeit (ms)	Haltezeit (ms)
HX340LAD	F1 16 × 5,5	4,50	1	380	–	300
HSD 600	F1 16 × 5,5	4,50	1	380	–	300
HSD 600	F1 16 × 5,5	6,00	2	2 × 320	40	300

Zavarivanje magnetski rotirajućim lukom



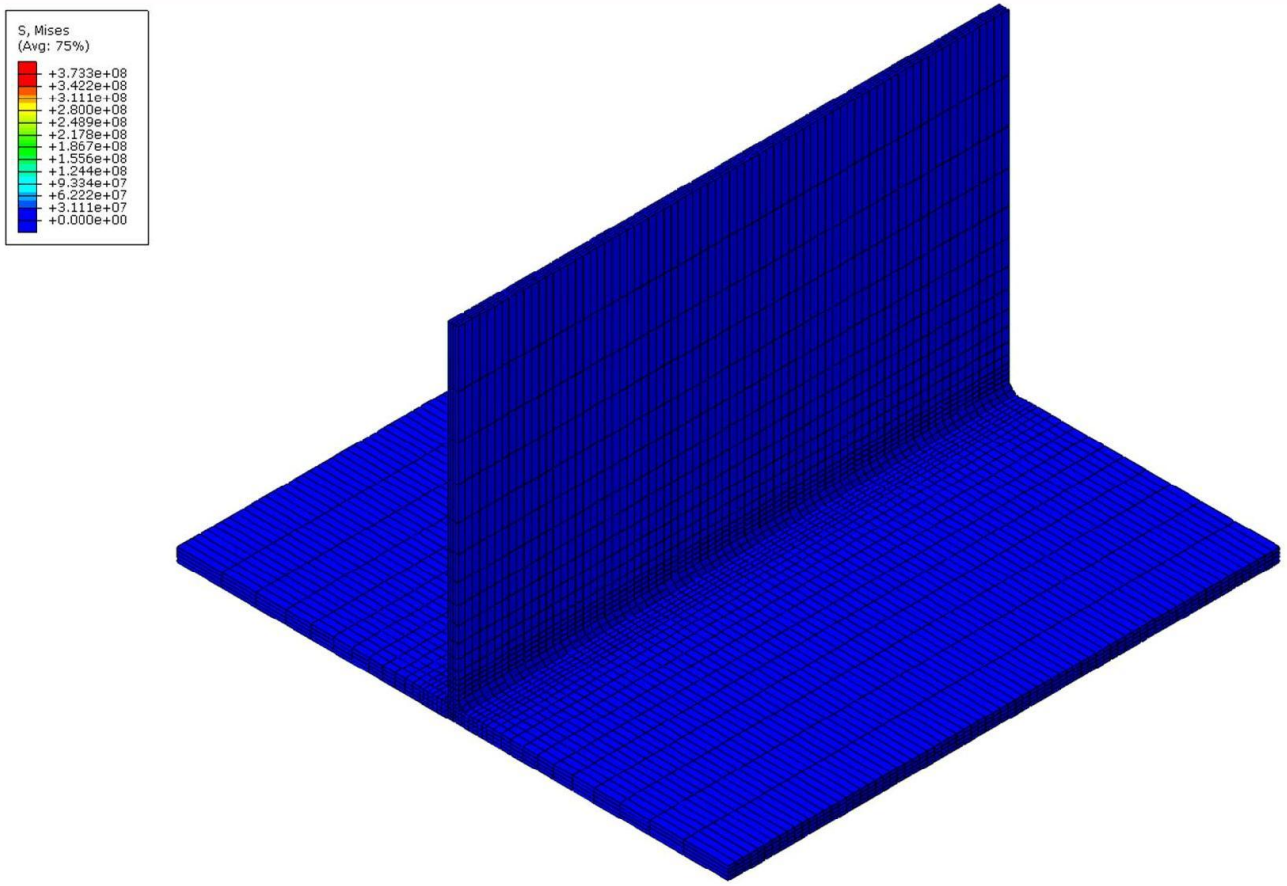
a) Arc velocity vs. time diagram

Process phases, I – VI:
I – arc initiation (flash); II – beginning of arc rotation;
III – arc transitory rotation; IV – arc stable rotation;
V – arc instable rotation ("breaking"); VI – tubes upsetting;
v_1 – arc rotation of low velocity; v_2 – stable arc rotation velocity.

b) MIAB welding process sketch

g – tubes gap; m – distance between the solenoids;
F_c – clamping force; B – magnetic field;
I_{sc} – short circuit current; F_p – upsetting force;
1, 2 – thin-walled tubes; 3 – magnetization system/solenoids;
4 – rotating arc.

Programski sustavi za modeliranje- deformacije pri obostranom zavarivanju kutnog spoja- snimljeno u laboratoriju FSB-ZK



Zaključak

- Nove alternative elektrolučnih postupaka su najfleksibilnije u kontekstu primjene
- Pojedine industrijske grane diktiraju razvoj namjenski orijentiranih procesa
- Dodatni materijali-prate razvoj osnovnih materijala-metalurški zahtjevi
- Intenzivan porast automatizacije i robotizacije u sprezi sa sustavima za praćenje procesa

UTJECAJ DULJINE KABELA NA ELEKTRIČNI LUK PRI ZAVARIVANJU

Priredio:

Ivica Garašić prema «Impact of cable length on welding arc», T. Mäkimaa, Kemppi Pronews 2/2006.

Izvor struje za zavarivanje i držač elektrode ili pištolj za zavarivanje povezani su kabelom , slika 1. Posljedica je niži napon električnog luka od onoga na priključnim stezaljkama na izvoru struje za zavarivanje. Utjecaj duljine kabela na električni luk ovisi o nizu čimbenika koji će ovdje pobliže biti razmatrani.

Pad napona u kabelu i njegova kompenzacija

Napon električnog luka je uvijek niži nego na priključnim stezaljkama uređaja za zavarivanje. Pad napona ovisi o duljini i površini poprečnog presjeka električnog kabela. To se može pojasniti sa slijedećim primjerima:

- Primjer 1: duljina kabela 5m + 5m (zavarivački kabel + kabel mase)
  Poprečni presjek: 50mm^2

  Struja zavarivanja: 150A

  Izmjereni pad napona: 0,55 V

- Primjer 2: duljina kabela 50m + 50m (zavarivački kabel + kabel mase)
  Poprečni presjek: 50mm^2

  Struja zavarivanja: 250A

  Izmjereni pad napona: 9 V

U primjeru 1 pad napona se može zanemariti, međutim u primjeru 2 pad napona može predstavljati velike probleme. Najjednostavniji način smanjenja pada napona je smanjenje duljine kabela i povećanja poprečnog presjeka. Druga opcija je izgradnja uređaja koji će imati dovoljno visoki napon za kompenzaciju gubitaka u kabelu.

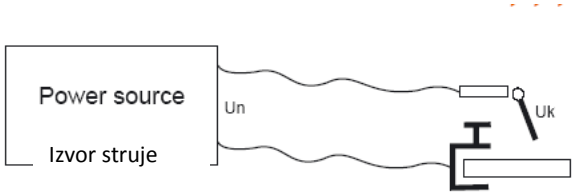
Comment [T33]: Odgovor na pitanje br. 32

Značaj gubitaka u kabelu za različite postupke zavarivanja

REL zavarivanje

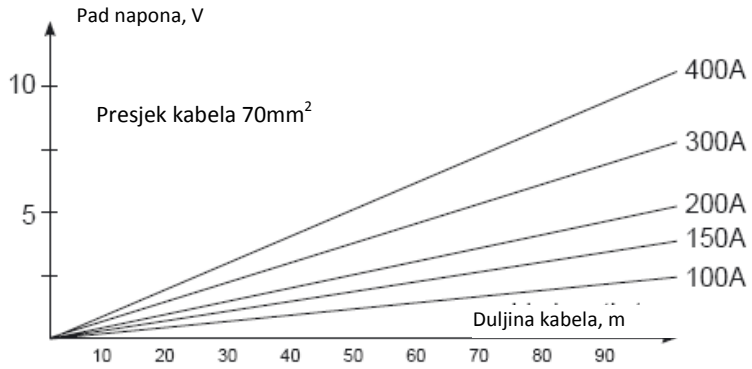
REL uređaji za zavarivanje su standardne koncepcije s padajućom karakteristikom tzv. «constant current», pri čemu neovisno o promjenama napona struja zavarivanje ostaje približno ista. REL postupak nije posebno osjetljiv na duljinu kabela pod uvjetom da uređaj može osigurati dovoljno visok napon, što je i trend pri gradnji uređaja, posebno velikih, da se predvidi veće naponsko opterećenje od uobičajenih pri zavarivanju kako bi se mogle kompenzirati kritične situacije. Više struje su potrebne pri ispostavi električnog luka i u situacijama kada dolazi do kratkog spoja. Pri kratkom spoju napon je relativno nizak, iz čeg slijedi da nema velikih gubitaka tj. padova napona. U praksi je duljina kabela ograničena s naponom kojeg može osigurati uređaj za zavarivanje. Ako se u određenim situacijama traže velike duljine kabela, mora se provjeriti da li uređaj to može kompenzirati, ili ako je moguće upotrijebiti veći presjek kabela. Pad napona se može izračunati ili odrediti iz dijagrama, slika 2.

Comment [T34]: Odgovor na pitanje br. 34



Slika 1. Spoj izvora struje i držača elektrode pri zavarivanju

Comment [T35]: Odgovor na pitanje br. 33



Slika 2. Dijagram pada napona ovisno o duljini i struji zavarivanja za 70mm^2 kabel

TIG zavarivanje

Padovi napona mogu biti značajni pri istosmjernom TIG zavarivanju. Tanki bakreni vodiči se ponekad koriste u dugačkim, vodom hlađenim paketima za TIG zavarivanje. Tu mogu nastati iznenađujuće visoki padovi napona (10 V i više). S druge strane, budući da je napon pri TIG postupku relativno nizak, navedeni problem nema veliki utjecaj. Moderni AC TIG uređaji koriste pravokutne ili modificirane pravokutne oblike struje, čija su vremena uspona i padova vrlo kratka, tj. njihovi nagibi su strmi. U određenim situacijama, duljina kabela može imati znatan utjecaj na AC TIG zavarivanje zbog istih razloga kao i pri impulsnom MIG zavarivanju.

MIG/MAG zavarivanje i impulsno MIG zavarivanje

Konvencionalni MIG/MAG uređaji koriste ispravljače s ravnom karakteristikom, tzv. «constant voltage» čiji napon je gotovo konstantan pri promjeni struje zavarivanja. Dodatno, klasični MIG/MAG postupak za dobar rad zahtijeva izvore s ravnom karakteristikom. Posljedica toga je znatno veća osjetljivost MIG/MAG postupka na pad napona u kabelu od REL zavarivanja. Zavarivanje kratkim spojevima je zbog niskog napona više osjetljivo na gubitke u kableu od zavarivanja štrcajućim lukom. U oba slučaja moguće je kompenzirati pad napona povišenjem napona na uređaju. Zavarivanje praškom punjenom žicom može podnijeti veći pad napona u

kabelima zbog njihove duljine iz jednostavnog razloga što više podsjeća na REL nego na zavarivanje kratkim spojevima.

Kod impulsnog MIG zavarivanja utjecaj duljine kabela ima znatno različit utjecaj na proces zavarivanja što se mora posebno analizirati.

Dinamički gubici

Ako istosmjerna struja protiče kroz vodič ili ako se jakost struje sporo mijenja, pad napona u tom vodiču može se izračunati kao produkt struje i električnog otpora. To se može primijeniti pri REL i DC TIG zavarivanju, međutim, kod zavarivanja kratkim spojevima ili impulsnom MIG/MAG zavarivanju promjene struje su brze i značajne što rezultira pojavom određenih fizikalnih fenomena. Naime, prolaskom struje kroz vodič stvara se magnetsko polje određenog smjera i intenziteta. Ako se struja zavarivanja trenutno mijenja kao što je to slučaj pri impulsnom MIG zavarivanju (porast iz osnovne na vršnu struju) , struja i magnetsko polje moraju se promijeniti u isto vrijeme. Međutim, to se ne dešava trenutno već je potrebno određeno vrijeme da bi do tog porasta došlo. Tehnički naziv koji opisuje ovu pojavu naziva se induktivnost. Što su dulji kabeli to je potrebna veća energija i više vremena se zahtijeva za promjenu intenziteta struje. Uz to bitni parametri koji utječu na induktivnost su promjer kabela i položaj. Ako je kabel položen kao na slici 3.a., induktivnost je najmanja. Mali porast je ako se kabel posloži u velikom polumjeru kao na slici 3.b. Najveća je induktivnost ako se kabel namota u zavojnicu kao na slici 3.c. Slika 4. prikazuje posljedice slaganja kabela. Prema laboratorijskim mjerenjima , kabel duljine 25m ima induktivnost 20μH ako je složen prema obrascu na slici 3.b. Ali ako se složi i namota prema slici 3.c., induktivnost raste i preko pet puta tj. izmjereno je 110μH. Iako ovakav intenzitet induktivnosti stvara velike probleme pri zavarivanju kratkim spojevima, moguće je još uvijek raditi i u tim uvjetima. Ali ako se govori o MIG impulsnom zavarivanju utjecaj induktivnosti je tako značajan da je nemoguće kvalitetno raditi. Induktivnost namotanog kabela ovisi i duljini kabela, primarno zbog činjenice da udvostručavanje duljine kabela u svitku učetverostručuje induktivnost. Utjecaj dimenzija namotaja i položaj su minimalni u odnosu prema duljini kabela. Nema razlike da li je namotani kabel položen na pod ili se nalazi na nekom transportnom kalemu.

Comment [T36]: Odgovor na pitanje br.35

Povećanje poprečnog presjeka smanjuje induktivnost samo marginalno. U praksi se preporuča primjena minimalnih duljina zavarivačkih kabela i kabela mase. Umjesto namatanja kabela na kalem, bolje je skratiti kabele uz premještanje izvora struje što bliže radnom mjestu. Ako je to neizvedivo, preporuča se kabel položiti prema obrascu na slikama 3.a. i 3.b., što će značajno

smanjiti induktivnost. Ako je moguće, još jedno dobro rješenje za smanjenje induktivnosti je spajanje kabela mase na radni komad odmah do izvora struje. Pokazalo se je da i radionička skela može poslužiti kao kabel mase, pa u tom slučaju samo kabel pištolja utječe na induktivnost.

Kako geometrija kabela i položaja utječe na induktivnost, prikazano je izrazom [1]. Vanjska induktivnost kabela na slici 3.a može se izračunati iz:

$$L = \frac{\mu_0 \cdot l \cdot \ln\left(\frac{a}{r_0}\right)}{\pi} \qquad [1]$$

pri čemu su:

μ_0, vakuumska permeabilnost,

l, duljina petlje (polovica duljine kabela),

a, udaljenost između kabela,

r_0, poprečni presjek bakrenog vodiča.

Dodatno, treba voditi i računa o unutarnjem induktivnom otporu na koji utječe frekvencija struje, a može se izračunati prema izrazu:

$$Z = \frac{(k \cdot l)}{(2 \cdot \pi \cdot r_0 \cdot s)} \cdot \frac{J_0(k \cdot r_0)}{J_1(k \cdot r_0)} \qquad [2]$$

pri čemu su:

Z, induktivni otpor kabela,

k, $(1-j)\sqrt{f \cdot s \cdot \mu}$,

s, vodljivost materijala,

J_0 i J_1 , Besselova funkcija prvog reda.

Pri niskim frekvencijama unutarnja induktivnost ne ovisi o frekvenciji pa vrijedi:

$$L = \frac{\mu \cdot l}{8 \cdot \pi} \qquad [3]$$

Porastom frekvencije unutarnja induktivnost pada obrnuto proporcionalno korijenu iznosa frekvencije.

U slučaju prikazanom na slici 3.b. se vanjska induktivnost može zaključiti uz primjenu Neumannovog integrala prema izrazu:

$$L = \mu(2r-a)((1-k \cdot \frac{k}{2}) \cdot K(k) - E(k)) \qquad [4]$$

pri čemu su:

μ, permeabilnost

a, polumjer kabela,

r, polumjer petlje,

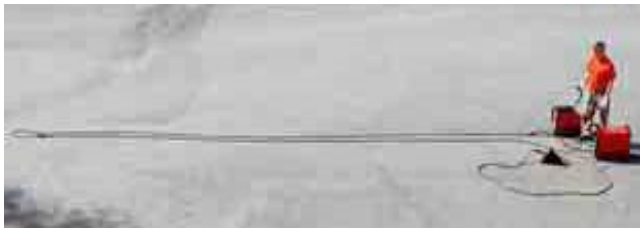
k·k, $4r(r-a)/(2r-a)^2$,

E(k), potpuni eliptični integral prvog reda,

K(k), potpuni eliptični integral drugog reda.

Na slici 4. prikazani su oscilogrami struje i napona na priključnim stezaljkama na uređaju te na samom pištolju iznad električnog luka pri MIG impulsnom zavarivanju. Kao što se vidi, oblik struje je regularan a razlika u naponu je minimalna.

Međutim, na slici 5., 25-metarski kabel je namotan što je potpuno poremetilo oblik impulsa. Ako se isti kabel razmota i stavi u oblik kao na slici 3.a., oblik pulsa će ostati dobar ali je vidljiva znatna razlika napona između dvije mjerne pozicije. Naime, napon na priključcima kabela na uređaju je znatno viši od onog neposredno iznad električnog luka. To je posljedica automatske kompenzacije gubitaka u kabelima što omogućuje zadržavanje odgovarajućeg oblika impulsa. Takva kompenzacija moguća je samo kod novijih generacija uređaja dok konvencionalni izvori nemaju takve karakteristike te bi oblik impulsa i samo zavarivanje bili znatno otežani.

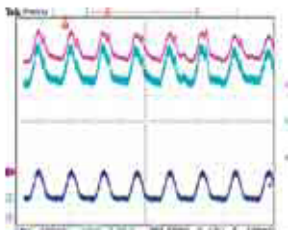


a. niska induktivnost

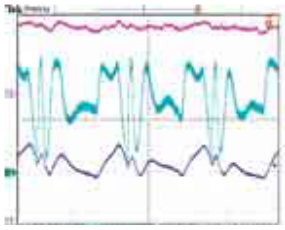
b. srednja induktivnost

c. visoka induktivnost

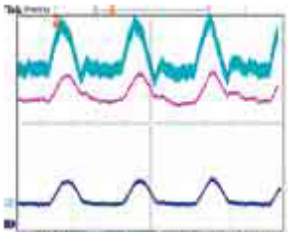
Slika 3. Utjecaj geometrije kabela na induktivnost



Slika 4. Struja zavarivanja MIG postupkom (donji oscilogram), napon na stezaljkama uređaja (srednji oscilogram), napon blizu električnog luka (gornji oscilogram), duljina kabela - 3m za pištolj i 5m kabel mase.



Slika 5. MIG impulsno zavarivanje, oscilogrami kao na slici 4., duljina kabela- namotani 25m kabel.



Slika 6. MIG impulsno zavarivanje, oscilogrami kao na slici 4., duljina kabela- 25m kabel razvučen u usku petlju.

ZAVARIVANJE ALUMINIJA «DUPLIM» PULSOM-«Double puls»

Pripremio:

Ivica Garašić prema Kemppi Pronews-Double Pulse Aluminium Welding.

U posljednjih nekoliko godina na tržištu su prisutni invertorski uređaji s tzv. «duplim pulsom» (eng. double puls), koji pružaju određene prednosti nad konvencionalnim impulsnim zavarivanjem.

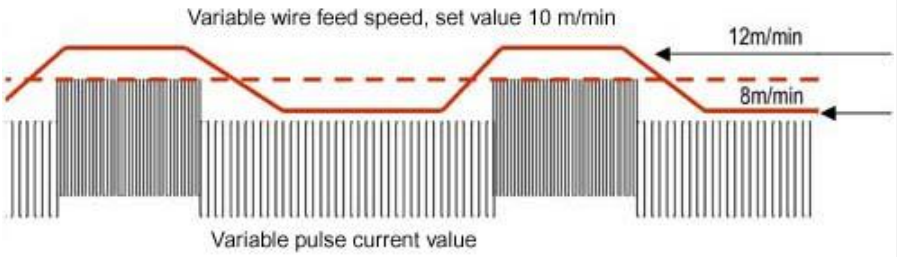
Koja je razlika između običnog pulsa i dvostrukog pulsa?

Konvencionalno impulsno MIG zavarivanje podrazumijeva promjenu struje (i napona) zavarivanja između minimalne i maksimalne vrijednsoti određenom dinamikom tj. frekvencijom promjene intenziteta. Da bi se za određenu kombinaciju osnovnog i dodatnog materijala te zaštitnog plina odredili optimalni parametri impulsa potrebno je odrediti približno dvadesetak parametara koji definiraju oblik impulsa te osnovnu i vršnu (impulsnu) struju. Za vrijeme trajanja vršne struje na kraju impulsa otkida se kapljica rastaljenog materijala i deponira u talinu osnovnog materijala. Za vrijeme trajanja osnovne struje ne dolazi do prekidanja električnog luka i nema prijenosa dodatnog materijala. Uobičajeno se frekvencija impulsa pri MIG/MAG zavarivanju kreće od 50 do 250 Hz. Pri dobro oblikovanim i odabranim parametrima pulsa ne dolazi do kratkih spojeva te je visina električnog luka konstantna. Kako bi se pojednostavila primjena takvih programa moderni uređaji imaju mogućnost programiranja i odabira odgovarajućih tzv. sinergijskih krivulja za određenu kombinaciju materijala, zaštitnog plina, debljine materijala i promjera žice. Korisnik odabire željenu količinu depozita (brzine žice) i unosa topline sa samo jednim potenciometrom tzv. «one knob» control pri čemu postoji mogućnost fine regulacije visine električnog luka. Impulsno zavarivanje se većinom primjenjuje za zavarivanje tanjih materijala jer se postiže bolja kontrola unosa topline i prijenosa materijala bez pregorijevanja osnovnog materijala. Zbog nižeg unosa topline manje su i deformacije te nema štrcanja kapljica rastaljenog materijala a olakšana je kontrola taline u prisilnim položajima zavarivanja.

Comment [T37]: Odgovor na pitanje br. 36
NAPOMENA: Ovo je pitanje za ocjenu izvrstan

Pri zavarivanju duplim pulsom dolazi do pulsiranja tj promjene intenziteta struje zavarivanja i brzine žice, slika 1. Dodatno dolazi i do promjene frekvencije struje na višem i nižem nivou.

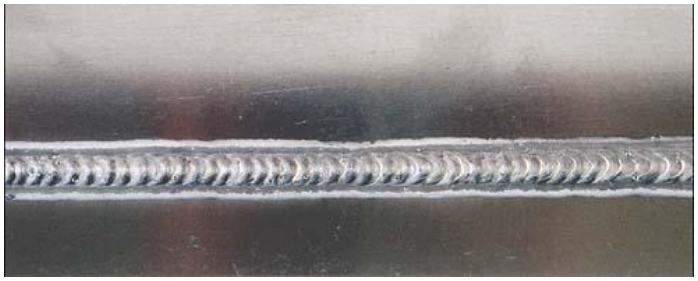
Drugim riječima, za impulsnu struju postoje dva nivoa tj dva seta osnovne i vršne struje kao i dvije frekvencije za svaki od tih setova impulsa. Izmjena nižeg i višeg seta impulsa također ima definiranu frekvenciju i to najčešće reda veličine nekoliko Hz. Paralelno sa strujom raste i napon zavarivanja, što dovodi do povećanog unosa topline pri višem setu impulsa. Shodno tome, dupli puls daje više energije od običnog impulsnog zavarivanja te dolazi do povećanja količine nataljenog materijala. Kako se mijenja unos energije pri višem i nižem pulsu tako se pri zavarivanju duplim pulsom mijenja brzina dodavanja žice, od minimalne do maksimalne vrijednosti. Vizualni efekt daje vrlo veliku sličnost geometrije zavara s TIG zavarivanjem.



Slika 1. Osnovni koncept «duplog» pulsa-postoje dvije razine impulsa (osnovne i vršne struje te frekvencije) pri čemu se mijenja brzina žice (viši set pulsa veća brzina, niži set pulsa niža brzina).

Primjena duplog pulsa pri zavarivanju aluminija

Namjena duplog impulsa je daljnje iskorištavanje potencijala modernih izvora struje za zavarivanje u odnosu na konvencionalne impulsne sinergijske uređaje. Pri zavarivanju aluminija primjenom duplog pulsa dobiva se estetski lijep zavar sličan TIG-u, uz znatno veću produktivnost i bolju mogućnost automatizacije.



Slika 2. Izgled površine kutnog spoja kod aluminija debljine 1,5mm zavarenog duplim pulsom

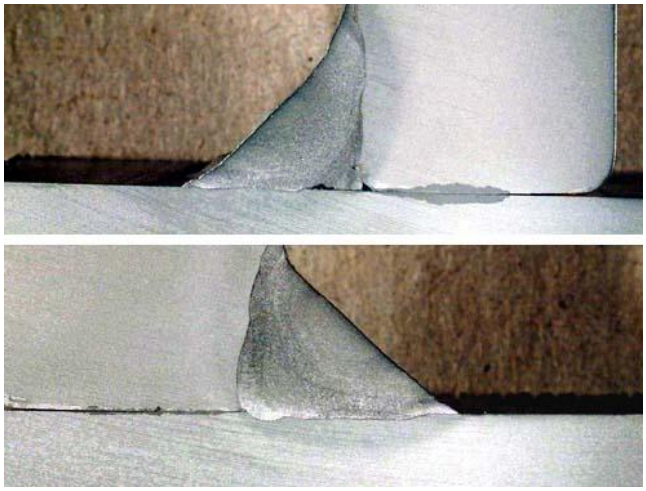
Tipične greške pri zavarivanju aluminija su porozitet, naljepljivanje, ugorine i pukotine u krateru na kraju zavara. Naljepljivanje je posljedica preniske energije električnog luka i loše tehnike rada, pri čemu ne dolazi do miješanja osnovnog i dodatnog materijala i čišćenja oksida. Vodik i nečistoće su posljedica pojave poroziteta dok se pukotine javljaju zbog odabira neadekvatnog dodatnog materijala. Veliku većinu ovih nedostataka moguće je eliminirati primjenom duplog pulsa. Zbog povećanog unosa energije dolazi do kvalitetnijeg protaljivanja i penetracije, pri čemu je vizualni oblik sličan TIG zavaru. Za vrijeme višeg nivoa pulsa tali se više žice i osnovnog materijala, dok se pri nižem nivou unosi manje energije i spriječava se pregaranje osnovnog materijala. Uz to, postiže se bolja kontrola taline pri zavarivanju. Tehnika rada je povlačenje po liniji, bez brzih oscilacija koje se često koriste pri zavarivanju aluminija. Pri zavarivanju tanjih limova nužno je smanjiti frekvenciju višeg nivoa impulsa, dok se s povećanjem debljine ta frekvencija povećava.

Comment [T38]: Odgovor na pitanje br. 37

Comment [T39]: Odgovor na pitanje br. 38

Pri zavarivanju debljih limova od 5mm postižu se slične prednosti. Uz primjenu više frekvencije jačeg nivoa impulsa dobiva se veća penetracija i smanjenje količine pora. Za razliku od običnog pulsa gdje zavar izgleda dobro, ali postoji problem u lošem protaljivanju, dupli puls zbog višeg unosa topline eliminira taj nedostatak, slika 3.

Nove generacije izvora struje za zavarivanje koje koriste dupli puls mogu se kvalitetno primijeniti pri zavarivanju aluminija.



Slika 3. Makroizbrusak zavarenog kutnog spoja limova debljine 15 mm (osnovni materijal Al 6082-T6) načinjen konvencionalnim zavarivanjem (gore) i duplim pulsom (dolje). Parametri zavarivanja u oba slučaja: I =260 - 270A, U = 28 V

ROBOTIZIRANO ZAVARIVANJE MIKROPANELA UZ POMOĆ STROJNOG VIDA

Comment [T40]: Odgovor na pitanje br. 39
Osnovne vrste programiranja zavarivačkih robota su:
On line i off line programiranje. (Više o tome u odgovorima pod pitanjima br. 49 i 50.

Olli – Pekka Holamo Pamamek Oy Ltd

Harri Kartano Lamminkatu 47

FIN -32200 Loimaa

Finland

Ključne riječi: robotizirano zavarivanje, strojni vid, automatizacija u brodogradnji

Key Words: robotic welding, machine vision, shipyard automation

Introduction

Robotic welding has several well known advantages compared to manual or even mechanised welding, for example: high arc on ratio, accurate weld size, high availability, steady weld quality, better working environment for the operator etc. In addition to higher productivity and good quality the robots can answer the challenge of lack of skilled welders. These facts make robotic welding even more attractive solution for the shipyards in the future.

However the typical shipyard one-of-a-kind production sets high demands for the programming of the welding robots. The programming ratio should be high, for example 1:20 (one minute programming results in 20 minutes program running time) or even higher. The programming itself must be user friendly, there are not always skilled engineers available to cope with complicated interfaces between different software systems. Also the production flow on the shop floor must be handled smoothly.

In order to raise the robotic welding to whole new level a joint project by Pemamek Oy Ltd., Kvaerner Masa-Yards, Masterautomation Ltd. and Lappeenranta University of Technology was created. During this project a new method for welding robot programming was developed and introduced to production.

Problems of the previous programming methods

Often in order to get forward it has to be taken a look to what has been done before. So some of the earlier solutions used in shipbuilding where studied.

To meet the programming challenges there are several different programming methods developed during past years. Several of these are discussed below:

2.1 CAD-data based off-line programming

Many companies are still excited about off-line programming with help of CAD-models from designing software. In an ideal case the programming system can cope with all of the below mentioned issues:

- CAD file transfer
- (Automatic) generation of the weld paths
- (Automatic) collision checking
- Translator for the robot controller
- Part calibration routines
- Positioning accuracy of the robot system
- Handling of the welding parameter data

From typical engineer point of view this looks good but in real life this is not the case. The amount of the work needed to get the CAD-data in suitable form for the OLP-system is always under estimated. This involves not only the production people but also engineers from the design office / IT-department. And still there is no quarantee that the shipyard will use same design software also after three years or not introduce new ways to generate CAD-models ⇒ The adjustment of the CAD-information is a continuous process.

Automatic generation of the weld paths and collisions checking is always based on some rules. The operator who makes these rules must be familiar with the real welding of a ship section and also have deeper understanding of the OLP-software. Not all welders are capable of handling complex software issues.

Generated robot movements and action commands must be translated to the robot specific language. If the translator has not been scripted accurately enough there will be differences in real robot behaviour compared to the OLP-software given expectations.

When the off-line generated robot program is to be downloaded to real robot station, a part calibration must be performed. This means that with some measurement method the operator tells the robot the exact location (and orientation) of the real work piece. With this information the robot program will be adjusted, or generated from the beginning.

When the wanted TCP-locations are generated in an off-line environment the positioning accuracy of the whole robot welding system has to very good. There are several calibration methods available which can be used for this purpose but still the positioning accuracy demand means additional costs and needs.

Wrong handling of the welding data can destroy otherwise good solution. In most OLP-systems the welding parameters are put in the generated robot program as exact amperage etc. values. Again in theory this looks good but in real life it means that when the welding wire type, stickout, shielding gas or power source etc. is changed and new welding parameters are implemented they must be brought also to the OLP-system. Also the power source calibration must be made and retain at all times.

2.2 Macro programming

Macro programming originates from a simple realisation that even though the products are different every time the actual welds are repeating themselves, only length or a couple of other things are changing. Based on this phenomenon after analysing the weld types in production a set of macros can be generated and re-used . This method has been proven to be fast and effective way to program robots in certain cases.

However there are three basic problems related in pure macro programming. First the number of needed macros can be high (hundreds) and secondly there must be an efficient way to tell the robot where to start and where to end the macro. Third problem is the risk of collision since when executing the macros the real work piece can have some parts that are in the way of the torch or the robot arm.

At some cases macro programming has been implemented within the graphical off-line programming in order to overcome some of the problems of pure macro programming.

2.3 Programming by leading the robot

In early years teaching the robot by leading it manually through the desired path was one of the basic ways to program a robot. Over the years this method has vanished since the on-line teaching using the teach pendant to drive the robot came much more effective way to teach new locations for the robot arm. There has been some new projects to revive this method. Combined with macro programming method this is quite user friendly method of using the robot, any welder can use the robot arm.

Still there are some significant problems. There is always a need for the operator, who has to be close to the arm and teach new paths between relative short intervals and the programming ratio remains too low (1:2) and therefor the robot welding is only about 5 % faster than manual welding. Additionally the method is not suitable for all panel types since both the operator and the robot arm itself have to get close to welds, smallest weldable box size is quite large. Also the hardware has to specially made for this kind of cases since the robots today do not allow manual moving while power is on in the servo motors.

New programming concept

The main focus was concentrated on small sub-assemblies, micro panels and intersections on larger flat panels, which are welded in early stages of the production and are typically manual work in the shipyards.

3.1 The principles

One very important goal was to get rid of all kind of intervention from engineers (CAD - off-line programming - production planning) during the whole robot welding process and keep it under control of welders on the workshop floor.

The problem was approached from two different angles, first from the welding point of view and secondly from the robot programming point of view.

Studying the welding tasks, it was noted that the total number of different throat thickness / welding position / joint type – combinations needed for robotic welding was low. This was partly because of Masa-Yards good design discipline. Also straight welds formed well over 95 % of the cases.

Table 1. Weld characteristics

Throat thickness	3 mm, 4 mm and 6 mm
Welding positions	PF (Vertical up) and PB (down hand)
Joint types	Fillet

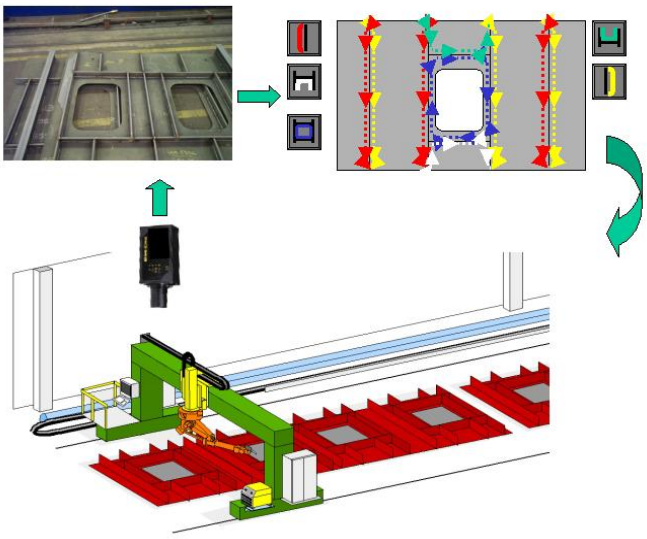
Based on the panel structures (design) and the weld characteristics in question the parametric macro programming was founded to be most efficient way to generate the programs for the welding robot.

Next task was to find an effective way for the operator to teach the robot the start and end locations of the needed macros. The basic idea of teaching the robot by leading it, ”showing the way”, was interesting. However it had to be much faster and more flexible than anything done before.

Solution was found from other industries like food and electricity, where automation has been in use with machine vision for picking and palletising tasks with good results.

The principle for the chosen method was formed as follows:

- Take picture from the product
- Using the 2D-picture of the panel place the start and end points of the welding macros where applicable
- Start the robot welding cycle



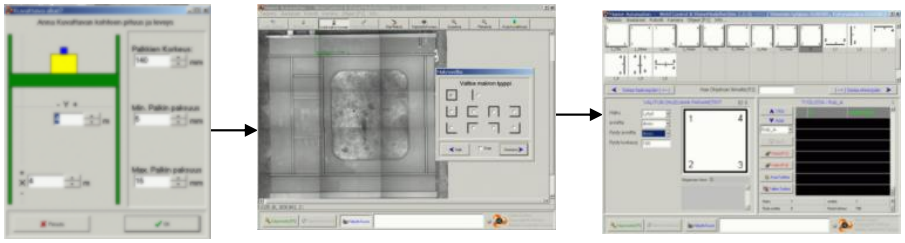
Picture 1. The principle of the new method.

3.2 The realisation

3.2.1 The User interface

A cell control software was developed. The basic tasks of the software are :

- To be the user interface for the application
  - Handle the camera cycle and images taken by the camera
  - Make it possible for the operator to select macros, place them, change parameters etc.
  - Send the selected macros to the robot controller for execution
- Collect production data
- Act as a link to the shipyards network if needed



Picture 2. Screenshots from the cell controller software (1st version)

The operator can drive the portal from the PC and start the automatic picture taking cycle. To reach the needed accuracy level (resolution) picture area of 1300 mm * 1000 mm was chosen for each shot. The operator selects the area to be covered, for example 4 m * 12 m, and the automatic work cycle takes as many pictures as needed to cover the whole described area by moving the portal respectively. Then software generates from many small pictures one large image, which presents the whole panel or what ever lies in the described area.

The operator has a selection of handful (15..25) of macros to program the robot. Each macro has a couple of parameters which enable the operator to fit the macro to the real situation.

3.2.2 The Hardware

In robotic welding it is desirable to have the possibility of robot working several hours by itself. This meant the work area must be large enough to handle several products same time. Large work area allows also manual preparation and finishing works to be done without moving the workplaces unnecessarily.

Because of the wide span (6 m) a portal structure was chosen. The robot was placed to a moving carriage, which allows linear Z- and Y-movements. The carriage is part of the portal frame , which in turn travels in X-direction. All the movements are realised with the servomotors, which are integrated to the robot controller, so they are robots fully controlled external axis. The travel lengths were chosen to be X= 60 m, Y= 6 m, and Z =0.5 m

A regular industrial robot, Motoman UP6 with XRC controller was chosen for the application. There are very few technical differences today between the robot models. Motoman however was able to offer 200V search voltage, which was needed in order to be sure that we get through the primer paint on the plates.

Picture 3. The robot portal

3.2.3 Handling of welding parameters

To avoid unnecessary problems with the actual welding , the parameters were placed directly on the controller. The operator can select the throat thickness freely from the cell controller software, when he is selecting or modifying the macros. The actual welding parameters are however inside the robot controller and are chosen according the throat thickness given by the operator.

This way there is no need to change anything in the PC when wire type or something else is changed and new welding parameters are introduced to production.

Production start-up and results

A robot welding system was ordered by Kvaerner Masa-Yards and delivered by Pemamek Oy during the spring of 2002 to Helsinki yard.

After installation and approval from Lloyds for welding quality, the robot was quickly picking up the pace. During first weeks small adjustments were done to the macro programs and the robot was producing 150 m weld per shift.

The welders in Helsinki yard worked in two shifts. During the autumn 2002 the robot was trusted with more work and when needed it was even left to weld alone after the second shift.

The programming time ratio was found to be around 1:20, meaning that 10 minutes programming (the camera cycle is included in this time !) results in 3 hours of program running time. Noteworthy is also that the robot starts welding almost immediately after the camera cycle has finished, about 5 minutes after the operator has started. No part calibration is required because the image shows the exact location of the work piece, compared to off-line programming, where a part calibration must take place before the robot can start welding. The part calibration alone takes the same time or even longer than the programming with the machine vision. The programming is completely handled by the welders. After they have programmed the robot they start to prepare next panels for the robot.

As a result the productivity rate (capacity in two shifts) was set up to the level of 16 000 kg of consumables / year / one robot. To give a comparison, the best robot stations so far in another shipyards have reached in two shifts deposition levels of 4500 kg /year / robot.

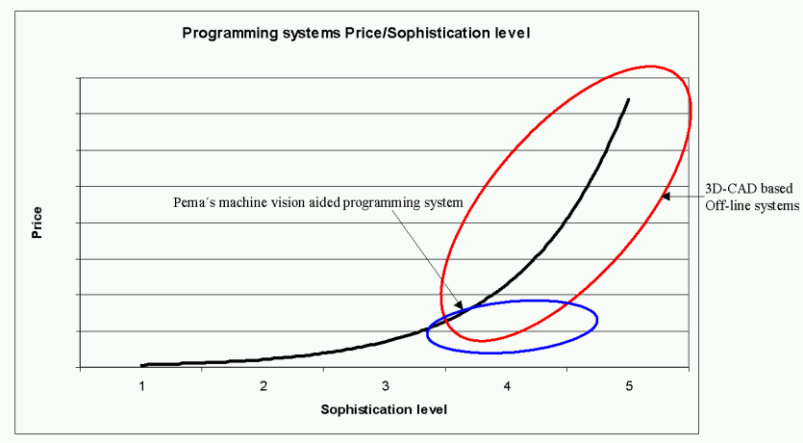
After being one year in production in Helsinki the robot station was transferred to Turku shipyard. The production could continue straight away in new location with new operators. This was possible because the system is not too sensitive for external failures, does not need any information infeed other than the camera picture and it is easy to operate.

Conclusions

The new method for programming arc welding robots was developed and introduced to production. The results have exceeded the expectations on the system.

- The productivity of the system is at the world record level
- The welders on the shop floor are using the system and new operators can be taught easily to use the system
- The flexibility of the system allows rapid change of the production

- The cost of the produced weld kg is very low [$ / kg], much lower than with any other solution.



Picture 4. Relative costs of different programming methods.

The machine vision aided robot programming at the current level is suitable and most productive choice for the micro panel, sub-assembly and flat panel production. The industry has realised this and after the first pilot project Pemamek Oy Ltd. has delivered several stations to shipyards in Finland and Italy and the most recent delivery will be done during autumn 2005 to a shipyard in Croatia.

Future developments include introduction of the system to more complicated products like double bottoms and curved panels. This development includes advanced sensing and collision checking routines.

References

Marcelo H. Ang Jr, Wei Lin, Ser-Yong Lim. A Walk-Through Programmed Robot for Welding in Shipyards. Industrial Robot, vol 26, No. 5, 1999, p 377-388.

J.Gustafsson, Robotized welding application in the shipyard industry. International Conference of IIW, Hamburg, Germany. DVS-Berichte; Bd.195, 1998.

...

IMPLEMENTACIJA LINIJE ZA REZANJE PROFILA

PROFILE CUTING LINE IMPLEMENTATION

Anto Tusun, dipl. inž. Uljanik Brodogradilište, Flaciusova 1, Pula
Marino Reljica Kostić, dipl. inž. Uljanik Brodogradilište, Flaciusova 1, Pula

Ključne riječi: obrada pofila, robotizirano rezanje,

Key words: profile cutting, robot cutting,

Sažetak:
S ciljem korijenite rekonstrukcije i modernizacije proizvodnih pogona Gradnje trupa, Uljanik Brodogradilišta, kroz nekoliko sukcesivnih faza provedena je rekonstrukcija i modernizacija Obrade profila uvođenjem linije za robotizirano rezanje. Ovaj rad sadrži opis tri glavna stadija projekta Linije profila i to, pripremnog, implementacijskog i post-implementacijskog stadija. Pripremni stadij je opisan kroz pregled obavljenih predradnji na definiranju potreba, orijentacije, te prihvaćanju ograničenja koja se nameću po raznim aspektima. Ugradnja opreme, puštanje u pogon i probni rad, te specifična iskustva opisuju Implementacijski stadij projekta, gdje je također detaljnije obrađen tehnički i tehnološki profil linije. Konačno, postimplementacijski stadij projekta je opisan kroz objedinjena iskustva u korištenju same linije, te opisuje liniju profila u današnjem okruženju.

Abstract:
With aim of extent reconstruction and Hull department production facilities modernization Uljanik Shipyard has went trough several modernization phases covering also the Profile fabrication with robotized cutting. This work contains description of three main stages of Profile cutting line project, i.e. preparation, implementation and post implementation stage. Preparation stage has been described by means of explanatory list of preparation work done on defining and acceptance of needs, orientation and limitation. Equipment installation, tests and trial works together with specific conditions are referring to implementation stage, where we can see more technical details of Line itself. Finally, post implementation stage has been described trough summarized experience working with the Line, as well as information's about the Line in present working conditions.

1. UVOD

Orijentacija brodogradilišta, koja se ogleda kroz Viziju *«… moderno brodogradilište u kojem svi žele graditi brodove …»*, te prepoznavanje potrebe za promjenama su bile podloga za izradu Studije modernizacije. Studija je objedinila ideje dobrih poznavatelja poslovanja Brodogradilišta Uljanik, ideje specijalističke kuće za projektiranje u brodograđevnoj industriji, kao i pokazatelje usmjerenja modernih europskih i svjetskih brodogradilišta. Ideje su pretočene u dugoročni plan razvoja postrojenja, s postupnim podizanjem proizvodnosti u svim fazama izrade broda, kako bi se, izbalansirano, Brodogradilište moglo staviti u istu vrstu s modernim svjetskim brodogradilištima našeg kapaciteta.

Dugoročni plan razvoja, je postavio temelje za trenutni početak ostvarivanja ciljeva na samom početku procesa izrade broda imajući u vidu konačni cilj, a jednako tako je ostavljeno dovoljno vremena za sazrijevanje ciljeva u slijedećim fazama. Pod sazrijevanjem ciljeva se misli na fino korigiranje cilja uzimajući u obzir sve promjene koje su nastale od vremena izrade Studije do trenutka planiranja realizacije dijela dugoročnog plana.

Zajedničko svakom od ciljeva je:

- predvidjeti potrebe i jasno definirati orijentaciju,
- ograničenja svesti na minimum i
- opravdati ulaganje.

2. PRIPREMNI STADIJ PROJEKTA

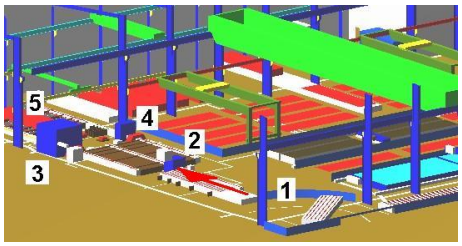
Isprepletenost potreba, orijentacije i ograničenja u pripremnoj fazi projekta se najbolje može vidjeti iz Tablice 1. Potrebe i orijentacija definiraju Liniju, a ograničenja je najbolje opisuju.

Tablica 1. Definiranje potreba, orijentacije i ograničenja Linije profila

Potrebe	Orijentacija	Ograničenja
Proizvodni program (knjiga narudžbi i predskazivanje zahtjeva tržišta)		
Benchmarking s drugim brodogradilištima		
Proizvodnost, kapacitet (1 ili 2 linije)		
Kompatibilnost s napretkom u izradi radioničke dokumentacije		
Revizija standardnih odreza, izreza … optimiziranje standarda		
Osuvremenjivanje proizvodnje		Složenije održavanje
Povećana točnost izrade		Gubici materijala
Porast proizvodnje	Raspon profila – vrste i dimenzije	
Bolje iskorištavanje radnog vremena	Sigurnost i uvjeti rada	Bez iskustva obzirom na robotizaciju
Korištenje prednosti informacijskih tehnologija … mreža	Računala, mreža, Numeričko trasiranje	Linija počinje na Skladištu čelika
Paletizacija i smanjenje broja rukovanja materijalom Bolje iskorištenje prostora	Automatizirati transport uz minimalni broj rukovanja materijalom Stupanj automatizacije	Opravdani / neopravdani strah od automatizacije Promjena naravi posla (ručni rezači – operateri)
Infrastrukturne promjene	Tehnologija – brzina	Složenija kontrola funkcionalnosti
Reorganizacija proizvodnje	Smanjenje broja operacija u toku (eliminirati ručno trasiranje	Složenije je intervenirati kod poremećaja proizvodnje
Izbjeći preinvestiranje		Financije

2. IMPLEMENTACIJSKI STADIJ PROJEKTA

2.1. OPIS LINIJE



Slika 1. Osnovni elementi linije

1. – ulaz
2. – sačmarenje rubova profila
3. – robot linija 1

Linija je projektirana kao dvostruka linije s dvije radne stanice (robot-a), te s dvije portalne dizalice za sortiranje izrezanih profila.

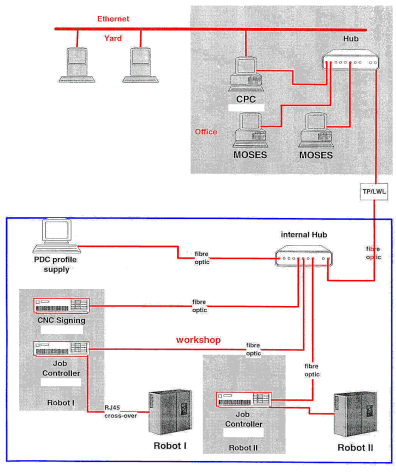
Prva radna stanica je robot opremljen s izmjenljivim plazma/oxy glavama za rezanje. Druga radna stanica je robot opremljen s oxy glavom za rezanje.

Materijal se doprema zakretnim transporterom kao grupa profila u ulazni prostor linije (1). Pojedinačni se profili odvajaju iz grupe automatskim podnim transportom i transportiraju kroz postrojenje za sačmarenje rubova (2), nakon čega dolaze u distribucijsko područje ispred samih robotskih stanica. Potom se obzirom na značajke svake radne stanice profili usmjeravaju prema robotima (3) i (4). Po završenoj obradi izrezani elementi bivaju transportirani u izlazni prostor linije (5), gdje se vrši sortiranje i paletizacija. Palete s elementima, kao i pojedinačne elemente se pomoću dizalica prenosi na valjčastu stazu i usmjerava prema slijedećim fazama izrade.

Stanica za sačmarenje rubova profila je izvedena kao komora obložena gumom, opremljena zračnim sapnicama (dvije glave sa po tri sapnice) s podesivom širinom zahvata mlaza sačme. Radna brzina stanice je 2 do 4 m/min uz osiguranje kvalitete površine Sa 2½ .

2.2. LOGISTIČKI KONCEPT LINIJE

Postojanjem mrežne infrastrukture Brodogradilišta, kao i CADDS sustava ostvareni su preduvjeti za prvu varijantu logističkog koncepta linije.



Slika 2. Struktura mreže linije profila

Kompletna linija profila s mrežom Brodogradilišta komunicira preko CPC računala (Central Process Control), koje ujedno nadzire i status postrojenja. Podaci se iz CADDS sustava posredstvom *.dxf datoteka šalju preko CPC računala na dva MOSES računala, gdje se vrši generiranje skripti za rezanje i označavanje elemenata (*.mgf files. Moses geometry files). Tijekom generiranja skripte za rezanje vrši se provjera sintakse, te također 3D simulacija rezanja, kako bi se eliminirale sve greške.

Generirana skripta za rezanje se predaje računalima u radionici, koji imaju zadatak odvojiti podatke za označavanje i upravljanje transportom od podataka koji su bitni za rezanje na robotima.

Tijekom izvršavanja (rezanja) paralelno se odvija procesiranje i upravljanje robotima, kao i procesiranje i upravljanje transportnom stazom, mjernim kolicima, te printerom za ispisivanje oznaka elemenata.

Radni nalozi se definiraju na samom početku linije, gdje se ulaznom materijalu on-line dodijeli pripadajuća skripta za rezanje i redni broj profila, po potrebi uključi/isključi sačmarenje rubova, te na taj način definira njegovo kretanje kroz cijelu liniju. Robotske stanice na svojim računalima prikazuju radne naloge po prethodno definiranom redoslijedu, a od operatera se zahtijeva potvrđivanje početka izvršavanja rezanja.

Slika 3. Oxy-robot u radu

2.2. PROIZVODNI RASPON LINIJE I SPECIFIČNOSTI

Uglovnice	80 x 5 do 500 x 25
HP profili	80 x 5 do 430 x 17
Istokračne uglovnice	80 x 80 do 200 x 200
Raznokračne uglovnice	100 x 50 x 5 do 500 x 200 x 15
Zavarene uglovnice	150 x 100 do 430 x 120
Zavareni T profili	120 x 50 do 500 x 200

Max. masa profila	3.000 kg
Max. duljina profila	13.000 mm
Duljina najmanjeg elementa koji se može transportirati nakon rezanja	> 500 mm
Minimalna udaljenost od izreza do odreza zadnjeg komada na profilu	750 mm
Minimalna udaljenost prvog reza zadnjeg elementa na profilu do kraja profila	1.000 mm
Tolerancije radnog komada (profila)	DIN / EU / ASTM

2.3. ZNAČAJKE ROBOTIZIRANE STANICE ZA REZANJE PROFILA

Instalirano postrojenje službenog naziva IMG Profile Cutting System **PROFILE PLUS** u glavnim crtama donosi veće brzine i kvalitetu rezanja korištenjem plazma rezne opreme, te jednostavnije upravljanje.

Tehnologija rezanja	Plazma / Oxy-Acetilen (Kjelberg / Messer)
Kvaliteta reza	Min. II A DIN 2310
Repeatability (robot)	± 0,1 mm
Repeatability (mjerenje duljine)	± 0,2 mm
Maksimalna duljina reza u smjeru linije	± 500 mm (ukupno 1.000 mm)
Robot	«Cloos robot system» nadglavne izvedbe sa 6 osi slobode gibanja
Mjerenje duljine	Mjerna kolica kao 7 os robotske stanice s radnim hodom od 14 metara
Označavanje elemenata	«ink jet labelling device» - (Imaje S7 printer)
Upravljanje robotom	”Cloos Rotrol ”

S ugradnjom navedene opreme se krenulo nakon što su se ispunila dva minimalna preduvjeta, gotovost betonskih radova na podu hale, te gotovost krovne konstrukcije same hale Obrade.

U prvoj fazi se krenulo s montažom strojarskih komponenti Linije, misli se na transportne staze, kao i samog postrojenja dvaju robotiziranih stanica, te

Slika 4. Oxy robot u svom okruženju

elektro instalacija. Po kompletiranju strojarskih instalacija energetike ispunjeni su preduvjeti za oživljavanje funkcija pojedinih elemenata postrojenja.

Osigurana je privremena veza (optički kabel) između Robotske linije i uredskog prostora u Numeričkom trasiranju, te se tako ispunio preduvjet za rad na logističkoj strani posla. Instalirana je informatička oprema na samoj Liniji i u uredskim prostorima, počelo se s povezivanjem CADDS sustava brodogradilišta s specifičnim pred-procesorom Linije profila.

S kompletnim strojarskim dijelom postrojenja i logistikom u funkciji osigurana je podloga za početak racionalizacije i sistematičnog smanjenja asortimana odreza i izreza, kao i njihovog testiranja stvarnim rezanjem. Posao je objedinio svođenje postojećih 284 različita tipa odreza i izreza na sveukupno 50.

Po gotovosti testiranja bile su riješene primjedbe uočene tijekom testiranja, a također su dorađeni nedostaci vezani uz logistički dio Linije.

3. POSTIMPLEMENTACIJSKI STADIJ PROJEKTA

3.1. IZBOR I OBUKA OPERATERA

Postimplementacijski stadij projekta započinje već u implementacijskom dijelu programom obuke budućih operatera.

Program obuke uključivao je upravljanje robot linijom i osnove održavanja linije od strane samih operatera za njen nesmetan rad u svim smjenama. Naime, osnovna ideja je da osim upravljanja samim postrojenjem, operater mora biti sposoban otkloniti sve probleme i manje kvarove u radu robot linije. Za složenije kvarove i probleme koji zahtijevaju veći nivo stručnosti i obučenosti zaduženo je Održavanje.

Obuka operatera, predviđena ugovorom, obavljala se je dva sata dnevno kroz period od dva tjedna. Problem koji je tu trebalo riješiti je odsustvo budućih operatera sa njihovih trenutnih radnih mjesta. Naime, operateri su izabrani iz vlastitih redova tj. puštanjem u rad robot linije za rezanje profila nije došlo do povećanja kapaciteta, već, naprotiv, do njegovog smanjenja, ali uz

zadržavanje vlastite radne snage. To se je postiglo preraspodjelom vlastite radne snage i angažiranjem kooperacije u drugim odsjecima i radionicama.

Paralelno sa obukom operatera tekla je i obuka u programiranju i pripremi podataka za rezanje, stoga nije bilo moguće odmah krenuti sa punom proizvodnjom, koja donosi konkretne rezultate, već se je obuka vršila na probnim profilima. Problem zamjene operatera riješen je uz nesebično zalaganje njihovih kolega i dodatni prekovremeni rad, te je time i ta prijelazna faza uspješno prebrođena.

Prilikom izbora budućih operatera vodili smo se slijedećom logikom:

- operateri moraju biti iz radne grupacije trasera profila zbog poznavanje specifičnih brodograđevnih znanja i pripadajuće dokumentacije
- operateri moraju biti mlađe osobe s poznavanjem rada na računalu, otvorene i spremne za primjenu novih tehnologija
- budući operateri obavezno moraju biti dio već postojeće radne snage
- u smjeni je potrebno imati kombinaciju traser + rezač profila tj. na jednoj liniji radi operater iz redova trasera profila, a na drugoj iz redova rezača profila.

Comment [T41]: Odgovor na pitanje br. 40

Kako se je rad na robot liniji s vremenom sve više uhodavao i linija preuzimala na sebe sve veći dio proizvodnog programa, tako su se i formirale i daljnje posade po smjenama. Na robot liniji angažirani su s vremenom i stariji radnici i oni s određenim zdravstvenim poteškoćama, ali prosjek godina i dalje ne prelazi 35.

3.2. ISPITIVANJE I UHODAVANJE ROBOTSKE LINIJE

Ulaskom robot linije u proizvodni proces (rad u tri smjene) počeli su se pojavljivati i prvi problemi i tehnološki nedostaci. Naime pokazalo se je da se, zbog kvalitete reza, neki detalji krajeva profila ne mogu rezati plazmom u slučaju HP profila većih visina. Razlog tome je što postojeća plazma jačine 110 A, ne može zadovoljiti postavljene uvjete. Stoga je kao granica,

zadovoljavajuće kvalitete za HP profile postavljena visina profila od 260 mm, što znači da se svi HP profili mogu rezati plazmom na liniji 1, a iznad te visine profila tehnologija rezanje mijenja se u oxy rezanje tj. operater mora zaustaviti liniju i ručno zamijeniti glavu za rezanje. U skladu s time pripremaju se i datoteke rezanja.
Takav način rada značajno usporava rad robot linije, pogotovo kod proizvodnog programa koji uključuje tankere gdje većina HP profila prelazi granicu od 260 mm. Kao usporedba poslužiti će nam slijedeći primjer:

HP 340 x 12, sa deset izreza za otjecanje tekućine

PLAZMA – cca 10 min

OXY – cca 30 min

Osim evidentne razlike u brzini rezanja, plazma rezanje daje kvalitetniji rez, pogotovo kod rezanja izreza unutar profila, što uvelike smanjuje potrebu za naknadnim brušenjem obrađenih profila. Naime, u sklopu robot linije, točnije u njezinom produžetku, osim paletizacije profila panela za panel liniju (slika 1), uvedeno je i njihovo brušenje (slika 2), zbog većih zahtjeva za kvalitetom pripreme površine za bojanje kod chemical tankera, kao i bojanje izreza nakon brušenja temeljnom bojom (slika 3). Također primjenom oxy tehnologije rezanja dolazi do daleko većeg unosa topline u materijal koji se reže, što dovodi do deformiranja profila (slika 4) koje je zatim potrebno prije paletizacije dodatno ravnati u radionici oblikovanja, te vraćati natrag na paletizaciju. Iz svega gore navedenog vidljivo je da se eventualna dodatno ulaganje u jače izvore struje plazma rezanja, na dulji rok definitivno isplati.

Slika 5: Paletizacija profila

Slika 6: Brušenje profila

Slika 7: Bojanje profila

Slika 8: Deformacija profila nakon oxy rezanja

Ulaskom u proizvodni program sve većeg broja brodova za prijevoz automobila, pojavilo se i pitanje zavarenih T profila, s obzirom da njihov broj na navedenim brodovima značajno utječe na potrebno vrijeme obrade profila, ne samo na robot liniji, već i na ručnom rezanju profila. Nakon ispitivanja na probnim profilima došlo se je do zaključka da će se takvi profili ipak rezati ručno, jer se na robotu nije mogla dobiti potrebna kvaliteta izrezanih detalja krajeva. Problem je položaj glave za rezanje prilikom rezanja ispod pojasa takvih profila.

Konačni rezultat svih ispitivanja dao je da se, kod proizvodnog programa koji uključuje kombinacije tankera i brodova za prijevoz automobila (što je proizvodni program Uljanik brodogradilišta zadnjih par godina), 60-70 % elemenata mogu rezati na robot liniji. Za tankere je to 80 %, a za car carriere 60 %. To su elementi čije detalje krajeva je robot linija u mogućnost napraviti, bilo plazmom ili oxy rezanjem. Ostatak profila obrađuje se ručno na ručnom rezanju profila, a to uključuje:

- zakrivljene profile
- TZ profile
- profile s krajevima koji ne prolaze na robotu

3.2. USPJEŠNO FUNKCIONIRANJE ROBOTSKE LINIJE

Za uspješno funkcioniranje robot linije obavezno moraju biti zadovoljeni slijedeći uvjeti:

1. kvalitetna priprema podataka za rezanje tj. općenito kvalitetna programska podrška

pravovremena priprema dokumentacije i datoteka za rezanje, kao i njihova kvaliteta, prvi su preduvjet uspješnog rada robot linije. Kvalitetna programska podrška uvelike smanjuje mogućnosti zastoja i smetnji, kao i otklanjanje eventualnih programskih pogrešaka do kojih u radu može doći, eliminira moguće buduće zastoje na slijedećim gradnjama, pogotovo kod izrade brodova u seriji, kao što je to slučaj sa proizvodnim programom u brodogradilištu Uljanik. Programske pogreške ne dovode samo do zastoja linije, već, u slučaju nedovoljno kvalitetnih programskih rješenja i do problema u slijedećim fazama procesa.

2. stručno i pravovremeno otklanjanje smetnji i zastoja

uvođenje svake nove tehnologije uvijek prate tzv. dječje bolesti, koje, iako ne predstavljaju kvarove ozbiljnog tipa značajno ometaju rad postrojenja. Nalaženje rješenja za takve probleme, smanjuje mogućnost pojave ozbiljnijih problema u kasnijoj fazi rada postrojenja, nakon njegovog uhodavanja. Nove tehnologije, također uvode potrebu za nekim specifičnim znanjima, posebno u području elektronike i informatike. S obzirom na, još uvijek, relativno slabu zastupljenost tih područja u hrvatskoj brodograđevnoj industriji, donekle je razumljivo i početno nesnalaženje u problemima koji se javljaju na tim područjima. Stoga je konstantno usavršavanje i dodatno obrazovanje najbolji i najjeftiniji način za sprječavanje mogućih problema, kao i njihovog otklanjanja u slučaju da se isti pojave kasnije u radu. Najnepovoljnije i najskuplje rješenje je ono kod kojeg se obuka vrši na samom postrojenju, u njegovom radu. Preventivno održavanje, zbog osjetljivosti komponenti postrojenja na uvjete koji vladaju u radionici, mora biti primarni cilj za postizanje maksimalnog učinka robot linije.

3. kvalitetna organizacija posla unutar same smjene kao i suradnja među smjenama

uvjet o kojem se najmanje smije raspravljati. Raspored radnika u smjeni po radnom mjestu na liniji, jedan operater na pjeskarnici rubova profila i po jedan operater na svakom od robota, daju optimalnu radnu kombinaciju. Paletiziranje i brušenje profila, kao i bojanje

izreza, iako predstavljaju dio posla na robot liniji, odvojeni su od nje tako da ne ometaju njen rad. Neprekidni efektivni rad robota, kao i dobra međusobna suradnja među smjenama (predaja posla i informacija slijedećoj smjeni) jedini su način rada koji donosi rezultate.

Comment [T42]: Odgovor na pitanje br. 41

4. ZAKLJUČAK

Iz gore navedenog može se vidjeti da za potpunu iskoristivost robot linije i što brži povrat uloženih sredstava potrebno je sinergijsko djelovanje operatera i postrojenja sa službama koje prate rad robota i pružaju mu logističku podršku. U brodogradilištu Uljanik to su ured Numeričkog trasiranja, koje je zaduženo za pripremu dokumentacije i programa za rezanje, te odjel Održavanje koji je zadužen za sve tipove servisiranja robot linije.

Također je potrebno imati u vidu razliku između pretpostavljenih i stvarnih proizvodnih uvjeta, a osobito činjenicu da budući proizvodni uvjeti ovise isključivo o poziciji Brodogradilišta u svjetskoj tržišnoj utakmici.

MEHANIZACIJA POSTUPKA REZANJA I ZAVARIVANJA U SVJETSKOJ BRODOGRADNJI

MECHANIZATION OF CUTTING AND WELDING APPLICATIONS IN WORLDWIDE SHIPBUILDING

Bernd Behlen BUGO USA

Ključne riječi: rezanje, primjena, zavarivanje

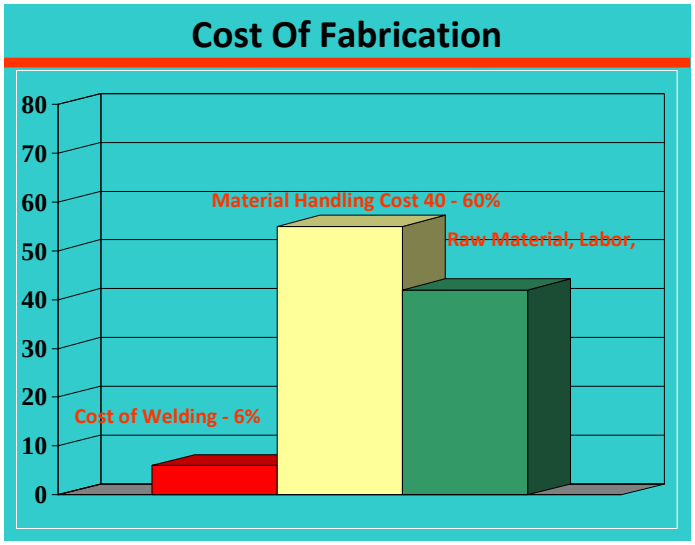
Key words: cutting and welding, application, shipbuilding

Sažetak: U zadnjih su se 20 godina postupci mehanizacije rezanja i zavarivanja konstantno razvijali kako bi optimizirali produktivnost, kvalitetu i ujete rada operatera. Postoji veliki trošak rukovanja materijalom koji pokriva veliki dio troškova proizvodnje. Drugi, vrlo važan faktor je kvaliteta. U ovom će se radu prikazati i razlike nekih postupaka zavarivanja (REL, poluautomatski i mehanizirani poluautomatski MIG/MAG). Također će se i objasniti različiti prikazi smanjenja troškova rukovanja, pomoću prijenosne mehanizacije, s ciljem povećanja produktivnosti i kvalitete te poboljšavanja uvjeta rada operatera.

Abstract: Within the last 20 years the mechanization of cutting and welding applications was constantly progressing to optimize the productivity, the quality and also the working conditions of the operators. There is a high cost of material handling which covers a big portion manufacturing costs. Another important cost factor is quality. In this paper there will be shown the difference between some welding processes (normal electrode welding, semiautomatic MIG/MAG and mechanized semiautomatic MIG/MAG). Some of the examples will be explained that show how different ways of portable mechanization to reduce the cost of handling as well as to increase the productivity and the quality and to improve the working conditions of the operator.

Introduction

Within the last 20 years the mechanization of cutting and welding applications was constantly progressing to optimize the productivity, the quality and also the working conditions of the operators. According to analysis made in Europe and the U.S.A. a big portion of the manufacturing costs is covered by the cost of material handling. This cost can be up to 60% of the total costs.



Another important cost factor is the quality of the plate preparation and the Fit-Up of the plates to be welded.

For example an oversize of the bevel or the angle of the plate can increase the amount of weld metal enormously.

Another statistic shows the difference between electrode welding, semiautomatic MIG/MAG welding and mechanized semiautomatic MIG/MAG welding. It shows that an operatorwho works with a mechanizing system does more than 5 times of the work of a stick electrode welder.

Productivity Of Innershield vs. Stick Welding --- All Position Applications	
Operator With:	**Does The Work Of:**
Semiautomatic NR-203M	**2.26 Stick Operators**
Mechanized NR-203M	**5.13 Stick Operators**

The reason for this is the fact that the arc time or the real welding time is much higher than the arc time of stick electrode welding.

Studies in Europe and the U.S.A. came to the result that the real arc time in stick-electrode welding is around 18-20 %. The arc time in semi-automatic welding is around 30-35 % and the arc time for mechanized semi-automatic welding is between 70-80 %.

Weld Metal Consumption Per Man Per 8 Hour Shift

	Lbs. Electrode	(Estimated) Lbs. Weld Metal
5/64" NR-203M Semiautomatic	11 lbs.	8.8 lbs.
5/64" NR-203M Mechanized	25 lbs.	20 lbs.

h

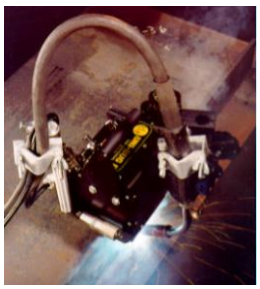
The following examples are showing different ways of portable mechanization to reduce the cost of handling as well as to increase the productivity and the quality and to improve the working conditions of the operator.

The easiest way to produce for example a longitudenal fillet weld for stiffeners is this little, portable drive carriage. This tractor is hold against the plate by strong, permanent magnets which are located in the bottom plate. It will be positioned against the stiffener. A big advantage of this unit is the fact that the torch can be quickly moved from one side of the unit to the other side, which means the full length of the weld can be realized and it is not necessary to weld the front and the endpart of the plate manually. The weight of this unit is 7 kg and it is battery driven.

Another unit with the same construction principles allows also stitch or step welding.

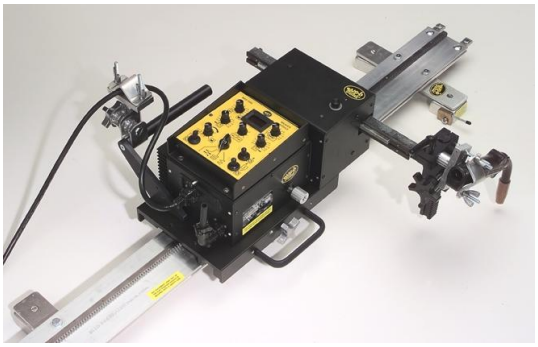
It can also be used with two torches welding simultaneously on both sides of the stiffener plate.

Another unit is even equipped with an oscillator and is used for vertical fillet welds where a larger "A" dimension of the weld is required. The oscillator control allows to adjust the oscillation width as well as the oscillation speed and the dwell time for both sides.



This unit can be used for all kind of stiffener designs, like straight stiffener plates, holland profiles etc. It runs directly on the stiffener and can be used with one or two torches. It can be programmed for continous or step welds. The length of the steps and the welds are adjusted in distance (mm) not in time.

Some shipyards throughout the world are using for both side weldings in MIG/MAG or SubArc this unit. It carries two wire feeders and can also be programmed for continious or step operations.



The next units are used in many shipyards all over the world. This units are running on rails which has the big advantage that they can work in any plane or position, because they have a positive rack and pinion drive.

For straight line cutting or welding this is the most econimical unit. It has a tractor with a torch support and ist used with 2.4 m long aluminum rails which are positioned directly on the plate with either permanent magnet bars or for non-magnetix material with vacuum-cup bars. The speed is controlled stepless from 0 to 1.5 m. Other speed ranges are also possible. Many yards are using this system for the longitudenal welds along the shipwall. The operator can control the position of the arc or the cutting flame manually in the up/down or left/right direction during the operation.

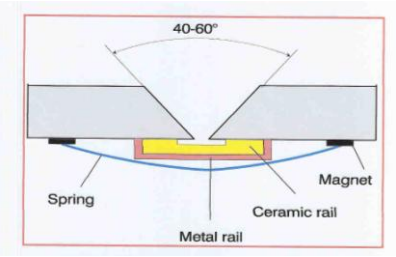
nFor long vertical up welds with oscillation most of the

european shipyards are using this unit. This unit is very compact and combines the drive and the linear oscillator in

one Box. It can be used with either rigid rails, flexible rails or high flexible rails by just changing the carriage. The unit has a remote control pendant which allows the operator to adjust all functions of the machine from the control pendant.

Because of the linear movement of the oscillation arm it is possible to "steer" the arc during the welding process. This means that the operator can control the position

of the arc by using the steering knob on the remote control.



All shipyards use the following preperation of the plates to be joined 25 or 30 degrees angle and a gap of 4 to 8 mm. Because of the use of ceramic back up (see left picture).

All layers including the root pass are welded from one side.

The newest development is a system which is controlled by a Laser Sensor. With this

system it is possible to guide the torch along the seam to be welded while the unit is oscillating. The laser scanner, which is mounted ahead of the welding torch, recognizes the complete geometry of the seam and controls in real time the torch position according to the seam. It also controls the width of the gap and adjusts the

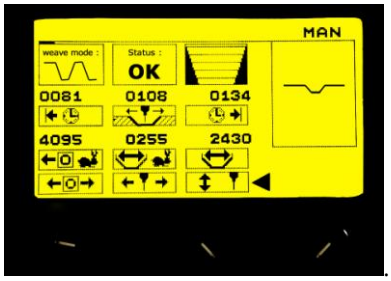
amplitude as well as the travel speed in relation to the gap width. It also controls the

height or the torch distance.

All parameters are shown on a screen in real values. On the screen the shape of the seam is displayed.

Actually this unit is a portable three axis robot. With this unit it is possible to make a fully automatic weld. The unit can be programmed to stop at the end of the plate and

run back to the starting point in full speed.



We are all concerned with productivity and along with productivity we must focus our attention on those factors which either directly or indirectly effect it.

The following table shows that even with a cost factor of 7 to 1 for the mechanized semi-automatic versus manual stick welding, and with a consumable costing twice as much, the pay-

back on the mechanized semi-automatic is less than six months. This analysis points to the urgent need to change from manual to fully mechanized processes. mechanized welding should be a prime consideration in the deisgn phase. At, first, it would appear that the initial investment is high, but in fact,this initial investment results in maximum efficiency and savings of almost %60.

COST ANALYSIS

OPERATING EXPENSES	MANUAL STICK	MANUAL SEMI-AUTOMATIC	MECHANIZED SEMI-AUTOMATIC
1 Purchase Price	€1,694.92	€6,779.66	€11,864.41
2 Accessories	- - -	1,016.95	1,355.93
3 Total Investment (1+2)	1,694.92	7,769.61	13,220.34
4 Working Life of Equipment	10 years	10 years	5 years
5 Yearly Operating Hours	1000 hours	1000 hours	1000 hours
6 Labor & Overhead	20.40	20.40	20.40
7 Calculated Depreciation per Year	169.49	1,559.32	2,644.07
8 Calculated Interest rates per year	67.80/yr.	311.86/yr.	528.81/yr.
9 Yearly investment expenses (7+8)	237.29/yr.	1,871.19/yr.	3,172.88/yr.
10 Maintenance	67.80/yr.	423.73/yr.	423.70/yr.
11 Spare Parts	33.90/yr.	423.73/yr.	423.73/yr.
12 Machine Costs per Hour (9+10+11): (5)	.34/hr.	2.72/hr.	4.02/hr.
13 Operating Time for 650 kg (1433.25 Lbs.) Deposited Metal	1625 hours	1083 hours	464 hours

14 Manufacturing Costs (6x13) + (12x13)	33,601.70	24,971.53	11,302.71
15 Costs Consumables for 650 kg Deposited Metal	1,423.20	2,864.41	2,864.41
16 Total Costs (14+15)	35,033,90	27,835.93	14,167.12
17 Total **Savings** Compared to Manual Stick	- - -	7,197.97	**€20,866.78**
18 Savings (%)	- - -	20.5%	**59.5%**

As mentioned before thousands of this units are working very successfully in shipyards all over the world.

All the units and systems are working with any kinf of cutting torch or semiautomatic MIG welding guns. The units are built to machine tool standards of accuracy mostly of light metal alloys which makes it possible to handle and position them manually without any additional help. The units can handle loads from the lightst flame cutting torch to relatively heavy welding equipment and at speeds

suitable for any cutting or welding process. As we think of mechanization or automation we can equate it to productivity

OPTIMIZED PROCESS GASES FOR MECHANIZED WELDING APPLICATIONS

OPTIMIZIRANI PLINOVI ZA MEHANIZIRANE POSTUPKE ZAVARIVANJA

Wolfgang Danzer Linde Gas AG wolfgang.danzer@linde-gas.com

Thomas Ammann Linde Gas AG thomas.ammann@linde-gas.com

Key words: Welding gases, higher productivity, better quality

Ključne riječi: plinovi za zavarivanje, visoka produktivnost, bolja kvaliteta

Abstract: In welding of metallic materials technologically and economically best results can only be obtained, when all the parameters relevant for the welding process are properly set up for the welding task. Besides the welding machine and the filler material this also applies to the choice of the process gas. The use of special gas mixtures can enable a great improvement of the welding process, the shielding gas changes turns from a commodity to an optimising tool.

Shielding gases, when optimised with respect to the welding application, can enable higher productivity and provide better quality of the weld. To achieve this, the gas components with their specific properties must be carefully combined.

In GMA welding of structural steels for example an addition of helium to the gas can lead to higher travel speeds without impairing penetration profile or producing undercuts. Gas-shielded arc welding of aluminium or nickel alloys is more and more carried out using a process gas containing very small amounts of oxygen or carbon dioxide, which provides excellent arc stability and weld appearance. In mechanised welding applications having a good arc stability is particularly important, since the machine can, unlike a manual welder, hardly react to glitches in the arc.

Sažetak: Pri zavarivanju metalnih materijala tehnički i ekonomski najbolji rezultati mogu se ostvariti tek onda ako su svi parametri, bitni za postupak zavarivanja, dobro podešeni. Osim na uređaj za zavarivanje i dodatni materijal, najbolji rezultat također se odnosi in a odabir zaštitnog plina. Primjena različitih mješavina zaštitnog plina omogućuje veliko poboljšanje zavarivanja,

zaštitni plin može mijenati svoju funkciju od potrošnog materijala do alata. Zaštitni plinovi, kada su optimizirani vodeći računa o primjeni postupka zavarivanja, mogu omogućiti veću produktivnost i osigurati bolje kvalitete zavara. Kako bi se to postiglo, pažljivo se kombiniraju plinovi ovisno o njihovim svojstvima.

Kod MIG/MAG postupka zavarivanja konstrukcijskih čelika, primjesa helija u plinskoj mješavini dovodi do većih brzina zavarivanja bez mijenjanja oblika profila penetracije ili nastanka ugorina. Kod zavarivanja aluminijskih ili nikal legura pod zaštitnim plinom se sve više i više izvodi s mješavinom plina koja sadrži jako male količine kisika ili ugljičnog dioksida, a koji osiguravaju izvrsnu stabilnost električnog luka i zavarljivost. U automatiziranom zavarivanju je vrlo bitna dobra stabilnost luka, pogotovo zato što uređaj ne može, za razliku od zavarivača, reagirati na promjene nastale u luku.

Introduction

Shielding gas welding process are one of the mainstays of metal fabrication. Above all, these joining techniques are valued for their broad flexibility of use and relatively low capital investment they entail. The gas metal arc welding (MIG and MAG) and gas tungsten arc welding (TIG) processes are suitable for almost every type of weldable material and the entire range of working methods from manual to fully automated robotic welding. Laser welding process also uses shielding gas, and the application of laser welding is growing every day. The use of special gas mixtures can enable a great improvement of welding process, such as higher productivity and better weld quality. It is therefore very important to choose optimum shielding gas mixture for every process, material and application.

Influence of shielding gas upon penetration and welding speed an MAG welding

High travel speeds in mechanized welding processes can be obtained, when the shielding gas:

- provides a widearc for good sidewall penetration;
- enables a high heat input;
- generates high arc temperatures.

Gas influence on travel speed

Linde Gas

***High travel speeds** in mechanised welding processes can be obtained, when the process gas*

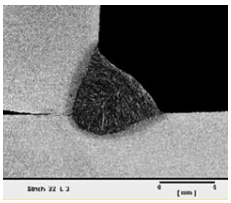
- **provides a wide arc for good sidewall penetration**
- **enables a high heat input (thermal conductivity)**
- **generates high arc temperature**

High-performance MAG Tandem welding: Shielding gas and maximum welding speed

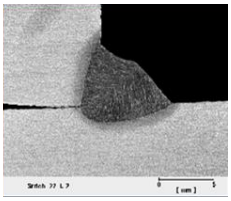
Linde Gas

Filler wire: G3Si1 Ø1.2mm; Pos. PB; Σv_{wire} = 40m/min; $v_{welding}$ = 220 cm/min

Ar + 30%He + 10% CO_2
CORGON® He 30



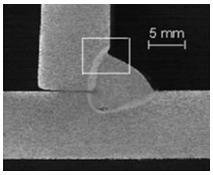
Ar + 8% CO_2
CORGON® 8

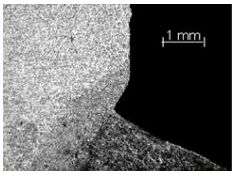


High-performance MAG welding: Influence of Helium addition to the shielding gas

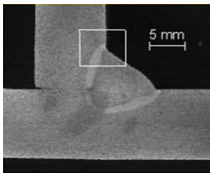
Linde Gas

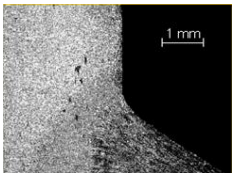
Filler wire: G3Si1 Ø1.2mm; Pos. PB; v_{wire} = 17m/min; $v_{welding}$ = 85cm/min





Shielding gas:
Ar + 10%CO_2
(or similar M21)





Shielding gas:
Ar + 30% He + 10%CO_2
CORGON® He 30

Gas influence on weld quality

Linde Gas

***Good weld quality** in mechanised welding processes can be obtained, when the process gas*

- **produces a good penetration through high heat input**
- **provides very good arc stability**
  - Use a doped process gas instead of inert gases (e.g. in Aluminium welding)
  - Use a process gas containing low amounts of active components instead of standard mixed gases (e.g. in structural steel welding)

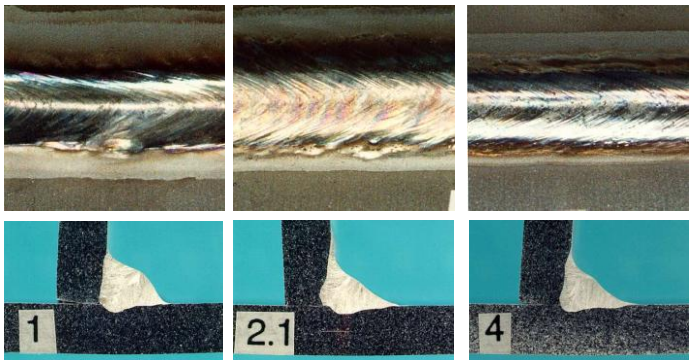
MAG welding of nickel alloys: Shielding gas influence on penetration and welding speed

Linde Gas

Parent- and filler metal:
Nicrofer 5923
(NiCr23Mo16Al)

Welding process:
MAGp

Plate thickness:
5 mm

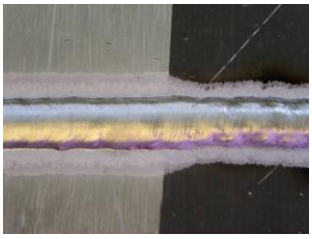


Shielding gas	Argon	VARIGON® He 50 (Ar + 50% He)	CRONIGON® He 30 S (Ar + 0,05% CO_2 + 30% He + 2% H_2)
v_S	25 cm/min	35 cm/min	50 cm/min
v_D		5 m/min	

MIG Aluminium welding: Arc stabilisation with doped gases

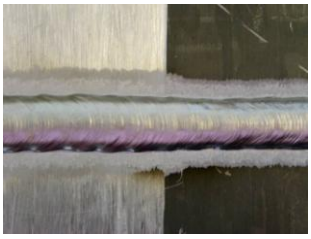
Linde Gas | Linde

Argon



oxide-free surface (milled) | as delivered surface

VARIGON® S
(Ar + 300ppm O_2)



oxide-free surface (milled) | as delivered surface

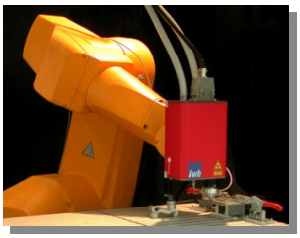
Base material: AlMgSi1 / AW6082; Filler metal: AlSi5 / ER4043

Laser Welding
New Power Sources → New Process Gases

Linde Gas | Linde

Emerging opportunities for the use of optimized process gases:

- Different wave length – less plasma
- Different intensity
- Different energy transfer



Source: *iwb*

→ ***„Research On The Influence Of The Process Gas“***
„Use of active gas components“

Targets:

- ↑ Increase penetration
- ↓ Reduce costs
- ↑ Increase welding speed
- ↑ Maintain or improve weld quality

Deep Penetration vs. Conduction Welding

Linde Gas

Welding by thermal conductivity

Source: Linde, *iwb*

- Energy transfer by heat conduction and convection
- Stable weld puddle
- Robust welding process
- No plasma formation
- Shallow weld depth
- Slow process
- Typical power source: Diode laser

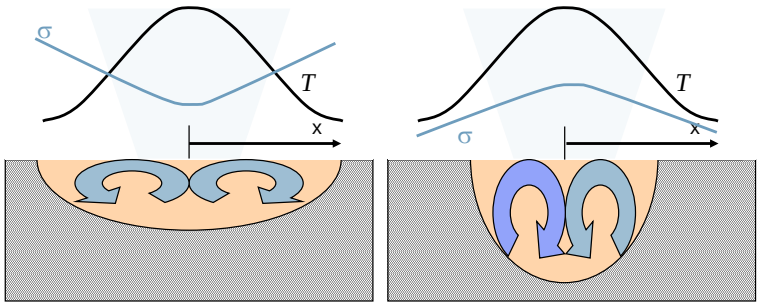
Deep penetration welding

Source: Linde, *iwb*

- Energy transfer by keyhole absorption
- Dynamic weld puddle
- Sensitive welding process
- Plasma formation
- Narrow deep weld
- Fast process
- Typical power source: CO2 and Nd:Yag laser

Marangoni – Flow Effect

Linde Gas

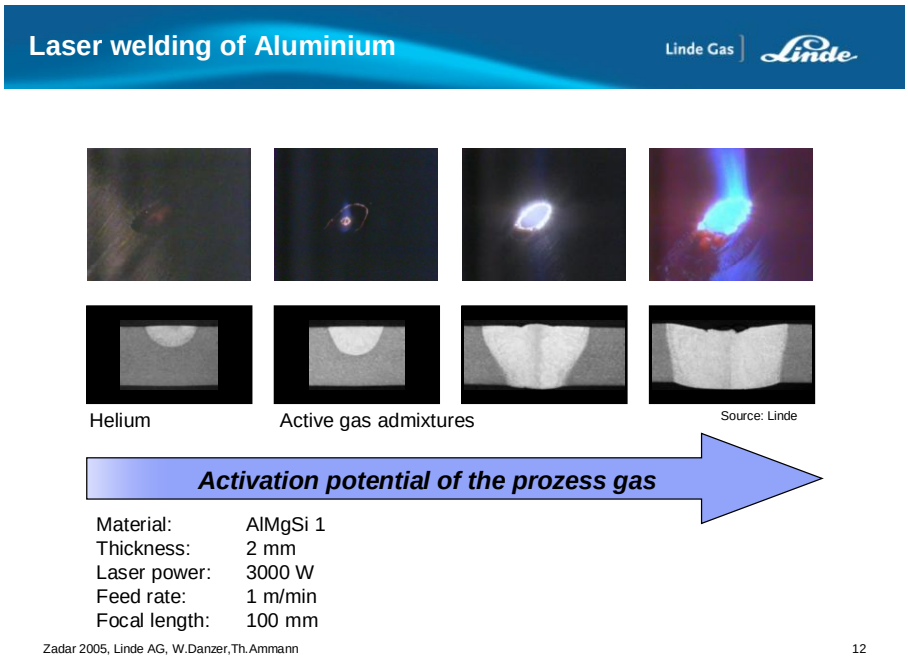


$\frac{\partial \sigma}{\partial T} < 0$ $\frac{\partial \sigma}{\partial T} > 0$ nach Beyer

Surface tension σ

Shear tension τ

$$\tau = \frac{\partial \sigma}{\partial T}\frac{\partial T}{\partial x}$$



Conclusion

There can be no question that the right mixture of shielding gas has a strong effect on the welding process and the final outcome. In other words, the shielding gas is not just an ancillary, but also an effective tool.

NEKI ASPEKTI PRIMJENE STT POSTUPKA ZAVARIVANJA

U KOTLOGRADNJI

Božo Despotović Austrian Energy – ĐĐ TEP d.o.o., Slavonski Brod (HR)

Ivan Samardžić Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Sveučilište J.J.Strossmayera u Osijeku, Trg I.B.Mažuranić 18, 35000 Slavonski Brod (HR)

Tihomir Marsenić Austrian Energy – ĐĐ TEP d.o.o., Slavonski Brod (HR)

Branimir Brechelmacher Austrian Energy – ĐĐ TEP d.o.o., Slavonski Brod (HR)

Ključne riječi: STT, kotlovske cijevi, kotlovi

Sažetak:

U radu se obrazlaže primjena novog postupka zavarivanja – STT postupka zavarivanja u kotlogradnji. S obzirom na mogućnosti ovog postupka zavarivanja koje su reklamirali proizvođač opreme i distributri opreme, te nakon praktičnih demonstracija u nekoliko navrata, odlučili smo se za kupovinu i instalaciju uređaja za STT zavarivanje u pogonu. Postupak se uspješno koristi za izvođenje zavarivanja u korijenu cijevnih spojeva, nakon čega slijedi popuna žlijeba nekim drugim postupkom zavarivanja. Ovaj postupak zavarivanja je relativno novi postupak koji se tek treba dokazati u praksi. Stoga autori ovog rada iznose neke detalje vezano uz spomenuti postupak zavarivanja kako bi se stručna javnost pobliže upoznala sa jednim, relativno novim postupkom zavarivanja.

1. UVOD

Uzevši u obzir specifičnosti proizvoda, izbor postupka zavarivanja unutar neke proizvodne organizacije u principu je limitiran postojećom opremom. Suvremena oprema za zavarivanje prisutna je uglavnom u novijim proizvodnim pogonima, gdje se u okviru investicijskih planova uključuje ona oprema koja je trenutno raspoloživa na tržištu. Kod starijih proizvodnih pogona najčešći slučaj je kombinacija postojeće (raspoložive) i suvremene opreme za zavarivanje.

U kotlogradnji kao specifičnom obliku proizvodnje, dominantni su postupci zavarivanja namjenjeni za međusobno zavarivanje cijevi, te cijevi i cijevnih sistema od različitih tipova materijala, različitih promjera i debljina.

Uobičajena je praksa da se u kotlogradnji za cijevi promjera do Ø 88 mm primjenjuje ručni ili automatski TIG postupak zavarivanja kao jednoslojni ili kao višeslojni proces. Za veće promjere primjenjuju se uglavnom kombinacije postupaka zavarivanja TIG +REL ili TIG + REL + EPP, ovisno o raspoloživoj opremi. Ručni TIG postupak, zavarivanje s «dvije ruke», primjenjivao se uglavnom za prve, korijenske prolaze koji su i sa aspekta operativne zavarljivosti najteži za izvođenje. Zavarivanje se izvodi u najnepristupačnijem području žlijeba, smicanje je u tom dijelu spoja najizraženije, zazor u spoju treba biti u strogim tolerancijama, predgrijavanje ili zaštita s korijene strane otežavaju izvođenje zavarivanja, itd.

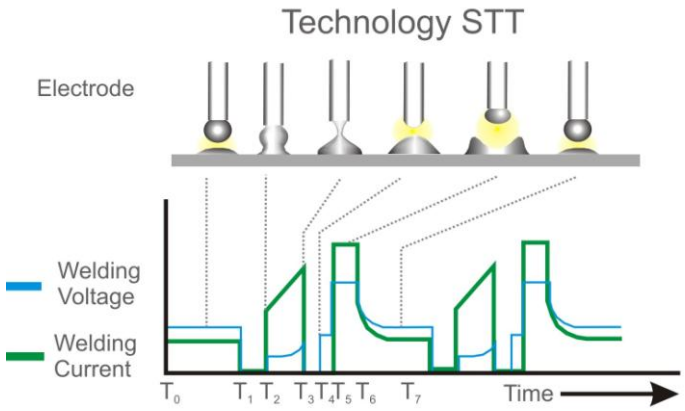
STT (engl. Surface Tension Transfer) je postupak zavarivanja koji bi prema mišljenju mnogih stručnjaka za zavarivanje kao poluautomatski postupak trebao zamjeniti TIG ručni postupak u prethodno opisanoj situaciji zavarivanja.

2. OSNOVNE KARAKTERISTIKE STT POSTUPKA ZAVARIVANJA

STT izvor struje za zavarivanje nema ni padajuću (CC) niti ravnu karakteristiku (CV).[1] Na osnovu trenutnih zahtjeva električnog luka, uređaj osigurava izlazne parametre koji omogućuju zavarivanje kratkim spojevima, a rastaljena kapljica se prenosi u žlijeb za zavarivane pomoću sile površinske napetosti između kapljice i kupke. STT uređaj učestalo i precizno kontrolira

struju zavarivanja u svim fazama, a optimalne karakteristike luka održavaju se i kod značajnijih promjena duljine slobodnog kraja žice. U principu, to je uređaj koji je u stanju promijeniti i postići zahtjevanu struju zavarivanja u mikrosekundama. Dizajniran je za poluautomatsku primjenu gdje se brzina zavarivanja i duljina slobodnog kraja žice mijenjaju. Može koristiti različite zaštitne plinove i njihove mješavine (CO_2, Ar-82%+CO_2-18%, Ar-98%+CO_2-2%,...), ovisno o vrsti materijala koja se zavaruje. Takav način kontrole i održavanja parametara zavarivanja pomoću izvora za zavarivanje omogućuje ugodniji rad zavarivaču, koji ne mora održavati točnu duljinu slobodnog kraja žice. Zatim, zavarivanje sa manjim prskanjem rastaljenog materijala, s manje proizvedenih dimnih plinova, s manjim zračenjem i isijavanjem topline također omogućavaju lakši rad zavarivaču. Isto tako, manji unos topline smanjuje i deformacije i zaostale napetosti usljed zavarivanja. STT uređaj za zavarivanje prvenstveno se koristi za zavarivanje korijenog zavara u grlu žlijeba. Zavarivanje ovim postupkom ostvaruje se kvalitetan zavareni spoj.

STT proces zavarivanja samo naizgled podsjeća na impulsni MAG postupak zavarivanja kratkim spojevima, no u osnovi je to sasvim različit, novi postupak zavarivanja. Ovo je postupak zavarivanja sa definiranim izlaznim oblicima razdioba napona i struje tijekom trajanja procesa zavarivanja, a pri kojima se rastaljene kapljice doslovce «uvlače» u rastaljenu kupku pomoću sila površinske napetosti. Proces zavarivanja odvija se ciklički, a postavljanjem ispravnih parametara zavarivanja na displeju uređaju osiguravaju se stabilnost električnog luka i stabilnost cjelokupnog procesa zavarivanja, te ponovljivost procesa zavarivanja. Struja zavarivanja se mijenja u mikrosekundama, ovisno o iznosu napona u električnom luku. Promjene jakosti struje i napona zavarivanja u električnom luku tijekom procesa zavarivanja prikazane su na slici 1. [1,4]



Slika 1. Promjene parametara zavarivanja u električnom luku tijekom STT postupka zavarivanja. [1,4]

STT postupak zavarivanja je suvremeni postupak zavarivanja koji se, između ostaloga, uspješno koristi koristi za zavarivanje korijena zavara u otvorenom žlijebu, a karakterizira ga:

- velika brzina zavarivanja, veća produktivnost u usporedbi sa ostalim postupcima, posebno u usporedbi sa TIG zavarivanjem,
- manji unos topline u odnosu na GTAW,
- mogućnost zavarivanja različitih tipova materijala,
- smanjena mogućnost hladnog naljepljivanja,
- manji broj prekida zavarivanja, a time i manja mogućnost pojave grešaka,
- dobra kontrola rastaljene kupke,
- manje prskotina, a samim tim i kraće trajanje čišćenja zavara,
- mogućnost korištenja mješavina plinova (CO_2, Ar-82%+CO_2-18%, Ar-98%+CO_2-2%, …),
- zadovoljavajuća korozijska otpornost,
- smanjena emisija dimnih plinova,
- smanjeno isijavanje topline i zračenje,

- povoljniji uvjeti rada za zavarivača, i dr.

Comment [T43]: Odgovor na pitanje br. 42

Pored relativno visoke cijene koštanja opreme za STT zavarivanje, jedan od nedostataka ovog postupka zavarivanja je ograničena primjena. Koristi se za zavarivanje korijenih zavara i zavarivanje tankih limova. Njegove prednosti dolaze do punog izražaja u odgovarajućoj kombinaciji sa ostalim visokoučinskim postupcima zavarivanja za popunu žlijeba za zavarivanje.

2.1. Parametri zavarivanja kod STT ostupka

Peak current (PC) - gornja struja, koristi se za definiranje duljine luka, te poboljšava vezivanje, fuziju sa stjenkama osnovnog materijala. Visoka vrijednost PC povećava duljinu električnog luka, a ako je vrijednost PC previsoka kapljice će imati globularni oblik, veći promjer, te je moguća pojava rasprskavanja. Ako je vrijednost PC preniska električni luk je nestabilan. Vrijednost ove struje će se prilagoditi da se postigne minimum prskanja i mirnoća kupke.

Background current (BC) - osnovna struja, osigurava unos topline u zavareni spoj. Ovom strujom se utječe na geometriju korijenog zavara. Previsoka vrijednost ove struje uzrokovat će veći promjer kapljice i povećano prskanje. Ako je vrijednost BC niska, električni luk je nestabilan i slabije je kvašenje na stranicama žlijeba. To je slično kao kod CV uređaja, kada se zavaruje s niskom vrijednosti napona.

Hot start, topli/vrući start – omogućuje lakše uspostavljenje električnog luka, te povećava unos topline pri uspostavljanju električnog luka kako bi se izbjeglo hladno naljepljivanje, jer je radni komad hladan.

Tailout osigurava dodatni unos topline, a da pri tome rastaljene kapljice ne postaju prevelike. Duljina električnog luka također se ne mijenja. Povećanjem se omogućuje veća brzina zavarivanja i poboljšava kvašenje. Za veće vrijednosti parametra *Tailout* vrijednosti PC i BC se smanjuju.

Comment [T44]: Odgovor na pitanje br. 43

Brzina žice utječe na količinu rastaljenog metala. Ona je neovisna, posebno se definira i ne utječe na vrijedosti struja zavarivanja PC i BC.

Slobodni kraj žice utječe na geometriju zavarenog spoja. Ako je ova vrijednost velika oblik zavara sa korijene strane, naličje zavara je konkavno i uže, veća je visina zavara. Za manju duljinu slobodnog kraja žice zavar je širi i ima manju visinu, tanak je, a povećava se i prskanje rastaljenog materijala.

Parametri zavarivanja se usklađuju uglavnom prema uputama proizvođača ili se pronalaze vlastita rješenja za pojedine situacije zavarivanja. Kontroliraju se tako da se pri zavarivanju, namjernim smanjivanjem i povećanjem duljine slobodnog kraja žice ostvaruje stabilan električni luk i smanjeno prskanje. Zavarivanje se izvodi odozgo prema dolje, silaznom tehnikom rada.

3. EKSPERIMENTALNI DIO

Eksperimentalni dio je obuhvaćao praćenje, prikupljanje i obradu izlaznih parametara tijekom primjene STT postupka zavarivanja, odnosno distribucije napona i jakosti struje tijekom trajanja zavarivanja. Postupak zavarivanja je primijenjen kod izvođenja korijena zavara spoja prilikom izrade cijevne komore od materijala kvalitete 15 Mo3, dimenzija D x S = 244,5 x 16 mm. Oblik zavarenog spoja je sučeljeni (slika 2), a pripajanje je izvedeno na tri mjesta - približno na svakih 120º po obodu cijevi. Dodatni materijal za zavarivanje je bio žica DMO-IG Ø 1 mm, a zaštitni plin KRYSAL18 (Ar-82%+CO_2-18%). Uređaj za zavarivanje je LINCOLN STT II sa dodavačem žice LF 30. Postavljeni parametri zavarivanja na komandnoj ploči STT uređaja za zavarivanje su bili:

I_{PC} = 265 A, (vršna struja),

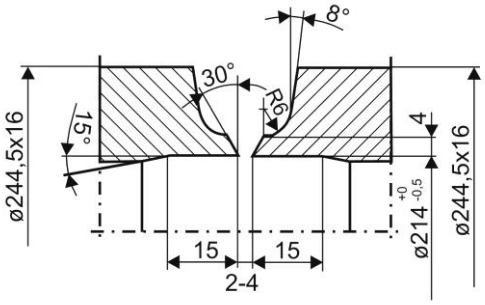
I_{BC} = 65 A, (temeljna struja),

v_z = 3 m/min., (brzina dotoka žice za zavarivanje),

v = 150 mm/min (brzina zavarivanja) i

Q_{gas} = 15 l/min (protok zaštitnog plina).

Zavarivanje se izvodilo tako da je predmet zavarivanja rotirao kontinuiranom brzinom, a zavarivač je održavao luk u području između 12 i 2 sata. U tom području zavarivalo se uz blago spuštanje.



Slika 2. Oblik i dimenzije sučeonog spoja na cijevnoj komori

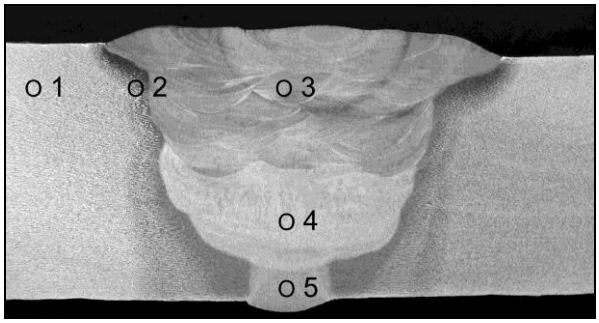
Na slici 4 se prikazuje izgled korijena zavara sa unutrašnje strane cijevi (naličje korijenskog zavara) , izveden STT postupkom, dok se na slici 5 prikazuje lice korijenskog zavara izvedeno STT postupkom. Na slici 6 se prikazuje makro presjek kompletno izvedenog zavarenog spoja.

Slika 4. Izgled korijena zavarenog spoja izveden STT postupkom zavarivanja – naličje korijenog zavara (snimljeno sa unutrašnje strane komore).

Slika 5. Izgled lica zavara nakon izvođenja korijenskog zavara STT postupkom zavarivanja. Uočljiv izuzetno kvalitetan estetski izgled lica zavara, bez pojave prskotina.

Slika 6. Izgled makro presjeka zavarenog spoja na komori. STT+REL+EPPzavarivanje

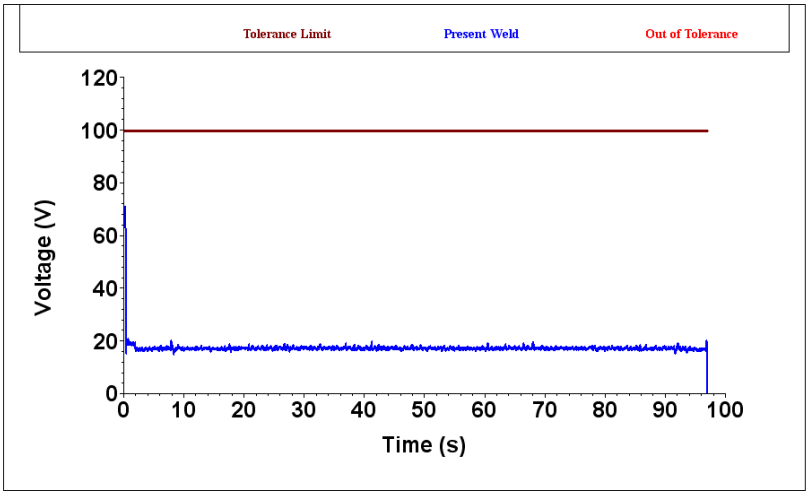
(korijen zavara – lokacija 5 izvedena je STT postupkom zavarivanja)



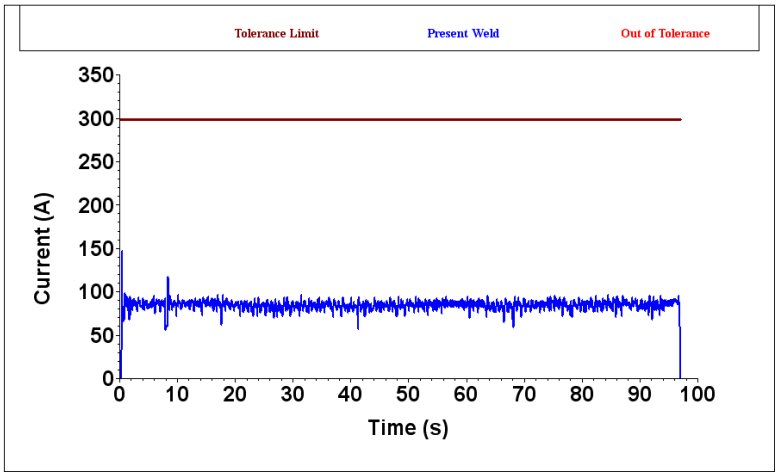
Tijekom zavarivanja praćeni su i registrirani parametri zavarivanja (napon i jakost struje zavarivanja) pomoću On-line monitoring sustava. Frekvencija uzimanja uzoraka iz procesa zavarivanja je bila 20 kHz po svakom mjernom kanalu. Na slici 7 a i b prikazuje se distribucija srednjih vrijednosti aritmetičkih sredina napona zavarivanja (a) i jakosti struje (b) registrirani tijekom zavarivanja treće dionice korijenskog zavara po obodu cijevi. Aritmetička sredina se

izračunavala za svakih 1000 podataka, pa se s obzirom na odabranu frekvenciju uzorkovanja dobivalo 20 točaka u sekundi, koje su opisivale distribuciju aritmetičkih sredina tijekom trajanja zavarivanja.

a)

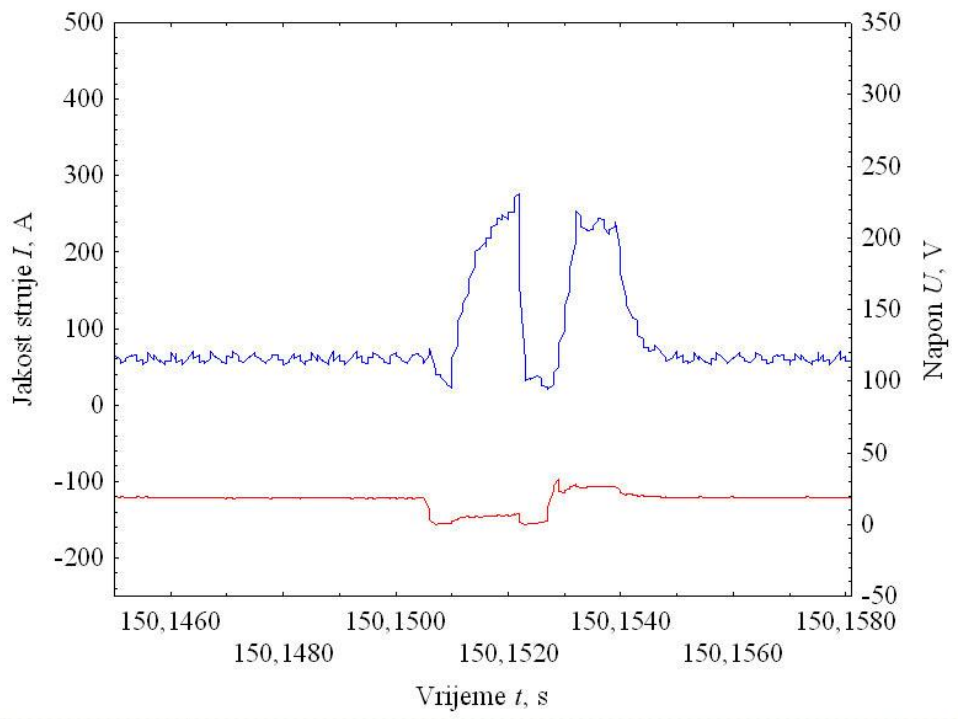


b)

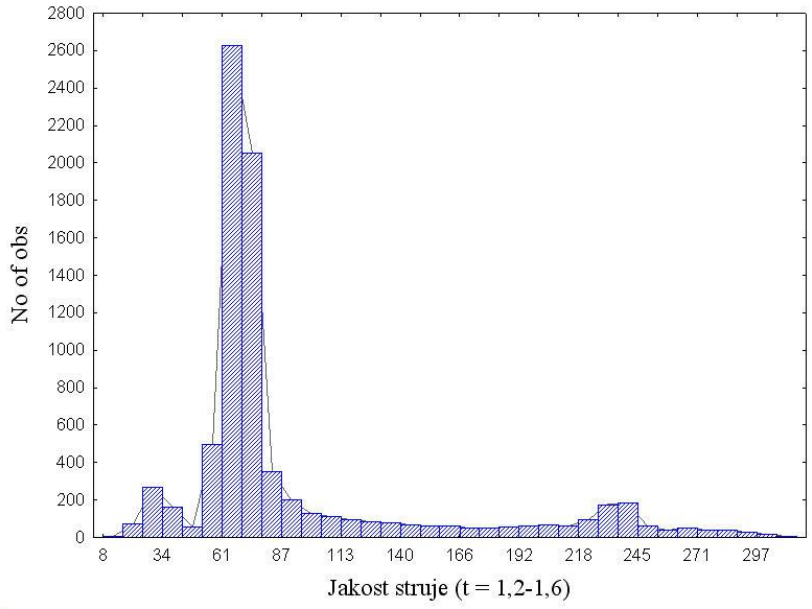


Slika 7. Distribucija srednjih vrijednosti napona (a) i jakosti struje zavarivanja (b) tijekom zavarivanja dijela komore (treća sekcija) u trajanju od 97 sekundi. Frekvencija uzimanja uzoraka iz procesa zavarivanja je bila 20 KHz. Za svakih 1000 mjerenja izračunavala se srednja vrijednost parametara zavarivanja.

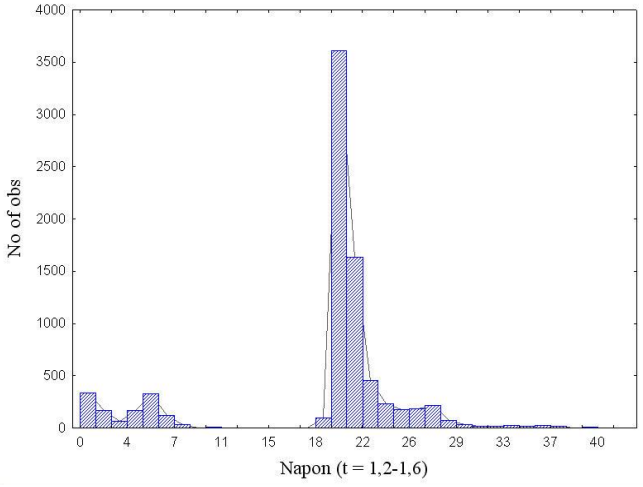
Na slici 8 se pokazuje detalj distribucije pojedinačnih vrijednosti napona (donji dijagram) i jakosti struje zavarivanja (gornji dijagram) u proizvoljno odabranom trajanju zavarivanja od 0,012 sekundi, kod frekvencije uzorkovanja od 20 kHz. Slike 9 i 10 pokazuju distribucije histograma frekvencija jakosti struje (slika 9) i napona zavarivanja (slika 10) u proizvoljno odabranom trajanju zavarivanja.



Slika 8. Distribucija stvarnih vrijednosti napona (donji dijagram) i jakosti struje zavarivanja (gornji dijagram) za odabrani interval zavarivanja od 0,012 sekundi.



Slika 9. Histogram frekvencija jakosti struje zavarivanja u proizvoljno odabranom trajanju zavarivanja. Frekvencija uzorkovanja je bila 20 KHz.



Slika 10. Histogram frekvencija napona zavarivanja u proizvoljno odabranom trajanju zavarivanja. Frekvencija uzorkovanja je bila 20 KHz.

ZAKLJUČAK

STT postupak zavarivanja je jedan od suvremnih postupaka zavarivanja koji se s obzirom na građu i način rada izvora struje za zavarivanje bitno razlikuje od dosadašnjih koncepcija izvora struje za zavarivanje. To mu evidentno daje određene prednosti kod zavarivanja korijenih prolaza kod debelostjenih cijevi i limova, te zavarivanja tankih limova, u odnosu na alternativne postupke zavarivanja, pa se s toga stajališta ovaj postupak može svrstati u visokoučinske postupke zavarivanja. Tehnologična primjena ovog postupka dolazi do potpunog izražaja u kombinaciji sa ostalim visokoučinskim postupcima zavarivanja (npr. EPP postupak). Iako su dosadašnja iskustva autora ovoga rada, u pogledu primjene ovog postupka zavarivanja u kotlogradnji pozitivna, naglašava se da je ovo relativno novi postupak zavarivanja koji svakako ima perspektivu, pa su svaki rezultati eksperimentalnih istraživanja na zavarenim spojevima kao i iskustva iz prakse i eksplaoatacije zavarenih spojeva izvedenih STT postupkom dobrodošla.

LITERATURA:

1. F. Neessen, F. Naber. The GMAW – STT process – An advance welding process. Lincoln Smitweld B.V, Lincoln Electric Europe B.V. The Niederland, October 2003.
2. http://www.magnatech-lp.com/Articles/NewTechText.htm

   By Elliot K. Stava & Peter Nicholson, The Lincoln Electric Co., Cleveland, OH. New Technology Speeds Oil Sands Pipe Welding
3. http://www.magnatech-lp.com/Articles/NewTechText.htm

   D. Bruc DeRuntz. Assessing the Benefits of Surface Tension Transfer® Welding to Industry.
4. **http://www.lincolnelectric.cz/oc_stt_e.htm**

   J. Hetych. Stt – First Source With Controlled Short – Circuitting Transfer

THE CMT – PROCESS – A REVOLUTION IN NEW WELDIN GTECHNOLOGY
CMT – POSTUPAK – REVOLUCIJA U TEHNOLOGIJI ZAVARIVANJA

Dr. Karin Himmelbauer Fronius International GMbH 4600 Wels Austria

Dipl. – Ing. Jürgen Bruckner Fronius International GMbH 4600 Wels Austria

Key words: less heatinput; less spatter; new kind of droplet, detachment in MIG - technology

Ključne riječi: manji unos topline, manje štrcanja, nova vrsta kapljice, otkidanje u MIG postupku zavarivanja

Abstract: The CMT (Cold Metal Transfer) – process is a revolution in welding technology, both in welding equipment and applications. The CMT process is a completely new process which was unknown till now. Also new field of applications can be opened with this process. The limits which existed for GMAW till now can be widened with the CMT process, e.g. the arc joining of steel to aluminium in a reproducible way, can be performed for the first time.

In this paper the principle of CMT process is described in a very detailed was. Also the properties and advantages of the process are shown. After a quick look to the welding system the three main applications of the CMT process are presented and examples are given.

Sažetak: CMT (Cold Metal Transfer) postupak je revolucija u tehnologiji zavarivanja, i u opremi za zavarivanje i njegovoj primjeni., CMT postupak j ejedan potpuno nov postupak koji je do sada bio nepoznat. Ovim se postupkom također mogu otvoriti nova polja primjene. Granice koje su postojale kod MIG/MAG postupka zavarivanja, CMT postupkom se mogu proširiti, npr. Moguće je po prvi put izvesti elektrolučno zavarivanje aluminija i čelika na jedan reproducibilan način.

U ovom radu je detaljno opisan princip rada CMT postupka. Pokazane su karakteristike i prednosti CMT postupka. Nakon kratkog pregleda sistema zavarivanja, prikazane su tri glavne karakteristike CMT – postupka i pokazani su primjeri.

1. Introduction

The CMT (Cold Metal Transfer) – process is a revolution in welding technology both in welding equipment and applications. The CMT-process is not only a completely new process which was unknown till now. Also new fields of applications can be opened with this process. The limits which existed for GMAW till now can be widened with the CMT-process, e.g. the Arc joining of steel to aluminium in a reproducible way can be performed for the first time.

In this paper the principle of the CMT-process is described in a very detailed way. Then the properties and advantages of the process are shown. After a quick look to the welding system the three main applications of the CMT-process are presented and examples are given.

2. The history of the CMT-process

The CMT-process has a long history. In 1991 Fronius started research in the fields of arc joining of steel with aluminium. The breakthrough could be obtained with the CMT-process due to its low heat-input. The second source of the CMT-process is the spatter-free ignition SFI, where the wire is pushed towards and also pulled back from the workpiece. This was the first time when the wire was intentionally pulled back. Finally in 1999 a customer demanded welding only very few droplets of filler wire onto very thin sheets.

At that time the base for the development of the CMT-process was set. In 2002 the process itself was already quite well known and the project CMT started, whose aim is the development of a welding equipment suitable for a industrial application of the CMT-process.

3. The principle of the CMT-process

CMT is the abbreviation for Cold Metal Transfer and describes a GMAW process whose heat input is low compared to the conventional dip arc process. Therefore the word “Cold” in the process name. The CMT-process is a dip arc process with a completely new method of the droplet detachment from the wire.

In the conventional dip arc process the wire is advanced until a short circuit occurs. At that moment the welding current rises and this high current is responsible for the short circuit to open so that the arc can ignite again. There are two main features of the CMT-process: On the one hand the high short circuit current corresponds to a high heat input. On the other hand the short circuit opens rather uncontrolled which results in lots of spatters in the conventional dip arc process.

In the CMT-process the wire is not only pushed towards but also drawn back from the workpiece – an oscillating wire feeding with an average oscillation frequency up to 70 Hz is performed as it is shown in figure 1.

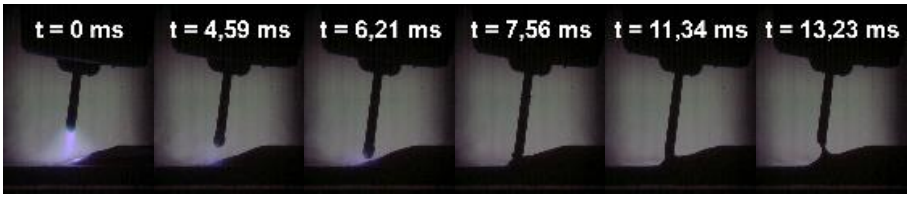


Fig. 1: The principle of the CMT-process, where an oscillating wire feeding is performed.

There are three features of the CMT-process, which distinguish this process from a conventional GMAW process:

First of all, the wire movement is directly included into the weld process control. Till now the wire feed speed during welding was either fixed or had a predetermined time schedule (e.g. synchropulse). In the CMT-process the wire is moved towards the workpiece until a short circuit occurs. At that moment the wire speed is reversed and the wire pulled back. When the short circuit opens again, the wire speed is again reversed, the wire moves towards the workpiece again and the process begins again. Here there is no predetermined time schedule for the wire movement, but the occurrence and

the opening of a short circuit determine the wire speed and direction. Therefore the wire movement determines what is happening in the weld pool, and the things happening in the weld pool determine the wire movement.

This is the reason why we can only speak of an average oscillation frequency of the wire: When the short circuit occurs a little bit earlier, the drawback of the wire starts a little bit earlier. When the short circuit occurs a little bit later, the drawback of the wire starts a little bit later. Therefore the oscillation frequency of the wire varies with time, but the average is up to 70 Hz.

The second feature which characterized the CMT-process is the fact that the metal transfer is almost current-free, while the conventional dip arc process corresponds to a high short circuit current. In the CMT-process the current is no longer responsible for the opening of the short circuit. Here the wire is drawn back and this movement supports the metal transfer due to the surface tension of the molten material. Therefore the current during the short circuit can be kept very low and the heat input is also very small. Figure 2 shows a schematic picture of the current / voltage during the CMT-process:

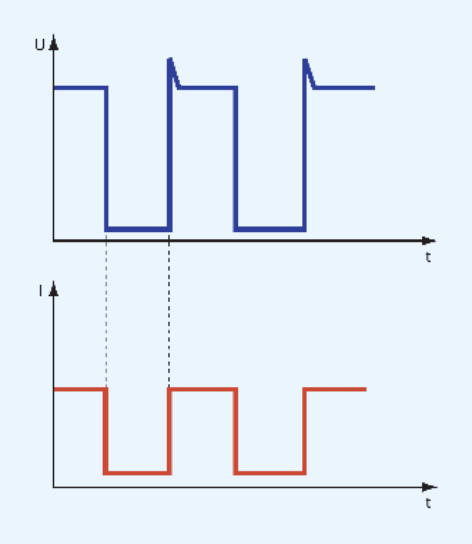


Fig. 2: Schematic picture of current and voltage during the CMT-process

Finally the CMT-process is characterized by the fact that the wire movement supports the metal transfer as mentioned above.

4. The advantages of the CMT-process

In the conventional dip arc process there is a high current during the short circuit to open the short circuit again. Here the short circuit opens relatively uncontrolled and therefore lots of spatters are typical for the conventional dip arc process.

In the CMT-process the current during the short circuit can be kept very low. Additionally, the short circuit does not break open in an uncontrolled way, but is pulled open in a controlled way due to the drawback of the wire. These two facts result in practically spatter-free welding and brazing seams. When working with typical tilting angles of the torch, the welding and brazing seams are indeed spatter-free. Only for extreme torch positions a few spatters can occur. These spatters have their origin in weld pool movements and not in the welding process itself. As the CMT-process is practically spatter-free, expensive and time-consuming postwork can be omitted.

The next important advantage of the CMT-process is the extremely perfect arc length control: In conventional GMAW processes the welding voltage is measured to determine the arc length. But the welding voltage is not only a function of the arc length but also varies for different surface conditions of the workpiece (e.g. oxides, grease, etc.). Therefore the arc length control can be falsified by variations of the workpiece surface.

In the CMT-process the wire is moved towards the workpiece until a short circuit occurs, which correspond to arc length zero. Afterwards the wire is drawn back with a certain speed for a known time. Therefore the arc length is exactly the product of speed and time. In the CMT-process the arc length is not controlled via the welding voltage but is mechanically adjusted after every short circuit. As the oscillation frequency of the wire is up to 70 Hz also the arc length is adjusted up to 70 times per second. On the one hand even for changes in the stickout length the arc length is kept absolutely constant. On the other hand the arc length does not change for different welding speeds any more, which is typical for conventional GMAW processes.

The third remarkable advantage of the CMT-process is the extremely high gap bridgability. The problem for thin sheets and large gaps with conventional GMAW processes is the relatively high heat input. Therefore the thin sheets melt before the gap can be closed.

Figure 3 shows the brazing of a 0,8 mm sheet onto a 1,5 mm sheet with a gap of 2 mm and a brazing speed of 1 m/min:

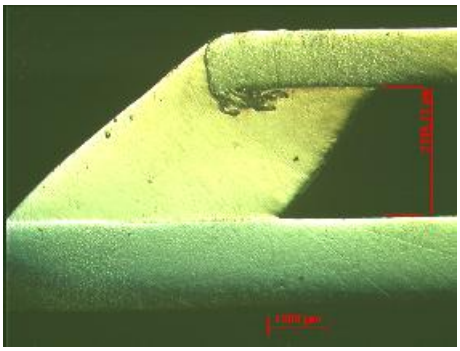


Fig. 3: Brazing of a 0,8 mm sheet onto a 1,5 mm sheet (both galvanized DC01) with 2 mm gap. Filler wire CuSi3 with 1,0 mm diameter. Brazing speed 1,0 m/min.

5. The heat input of the CMT-process and its combinations

The pure CMT-process is characterized by a very low short circuit current. Therefore the heat input is very low and the height-to-width-ratio of the weld seam rather high. The conventional pulsed arc process on the other hand has a relatively high heat input and penetration.

With the digitally controlled welding system for the CMT-process it is now for the first time possible to perform combinations of the CMT-process and the pulsed arc process. E.g. one CMT-cycle and three pulsed arcs can be performed alternately. Therefore the heat input and the penetration and also the weld seam geometry can be varied from the pure "cold" CMT-process up to the relatively "hot" pulsed arc process. Figure 4 shows the changes in penetration and weld seam geometry for different ratios of CMT-cycles to pulsed arcs:

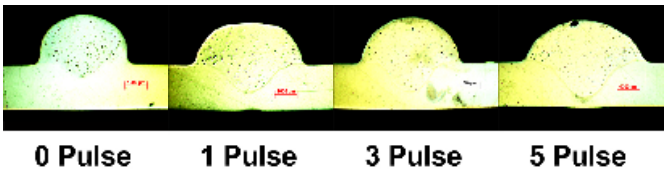


Fig. 4: Changes in the penetration and weld seam geometry for different rations of CMT-cycles to pulsed arc. The number of pulses between CMT-cycles was varied.

When performing e.g. one CMT-cycle and 10 pulses alternately, the heat input and penetration are almost the same as for the pure pulsed arc process; but there is still the advantage of the exact mechanical adjustment of the arc length every 10 pulses.

The combinations of the CMT-process with the pulsed arc process also supports the gap bridgability of the CMT-process and also leads to further enhancement in the welding speed.

6. The limits of the CMT-process

As every other welding process also the CMT-process has its limits. Figure 5 shows the region of the pure CMT-process (with no addition of the pulsed arc) in the diagram of welding voltage versus welding current:

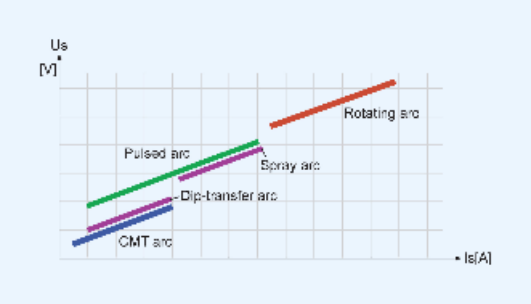


Fig. 5: Voltage versus current diagram with addition of the region for the pure CMT-process

The CMT-process has its upper limit at the point where the transition arc starts to appear. For higher currents a short circuit does not occur any more and therefore the CMT-process can not be performed any more. The lower limit for the CMT-process is lower compared to the standard dip arc process. Therefore the range of welding becomes larger.

The diagram also clearly shows that the power and therefore the heat input of the CMT-process is lower compared to the conventional dip arc process.

7. The welding system for the CMT-process

Figure 6 shows a schematic drawing of the welding system for robot application of the CMT-process:

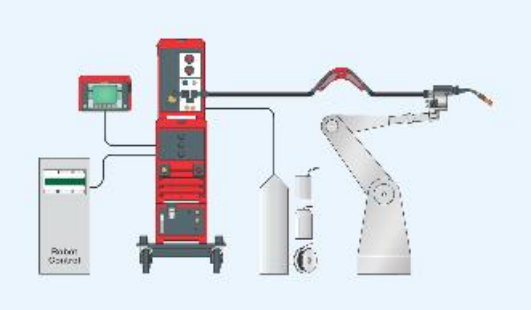


Fig. 6: Welding system for the robot application of the CMT-process

The welding system is completely digitally controlled. Very fast communication between the components is included. This is very important for the CMT-process as the power source has to know very fast what is happening in the melt pool and also has to react immediately.

The welding system for the CMT-process shall not be described here in every detail. Only the wire buffer and the welding torch should be mentioned as they are two main components of the welding system.

The wire is not only moved towards but also pulled back from the workpiece. Therefore the motor in the welding torch has to move forward and also back. The motor in the wire feeder only moves forward, as this motor is rather slow and cannot reverse its movement in such a fast way. Therefore at certain times the motor in the torch moves the wire back whereas the motor in the wire feeder pushes the wire forward; these two motors work against each other. Therefore a wire buffer has to be included between these two motors to store the wire. Additionally the motor in the torch can only perform its reversing movement with up to 70 Hz when this motor can work only with little force. Here also the wire buffer helps the motor in the torch to gain the wire almost force-free from the hosepack.

The wire buffer, as it is shown in figure 7, works in the following way:

Fig. 7: Wire buffer with open lid and its function

The inner liner in the wire buffer is only fixed on one side and can slide on the other side. Therefore the inner liner can change its position from the lower edge, which corresponds to an empty buffer, to the upper edge, which corresponds to a full buffer. The movement of the motor in the wire feeder is now adjusted in a way so that the wire buffer is always half-full. In this condition the motor in the torch can both pull the wire almost force-free and can also draw back wire even when it is pushed forward by the motor in the wire feeder.

The second component to be described in more detail here is the welding torch. This welding torch is a real revolution in welding equipment, both in its size, weight and function. The torch for performing the CMT-process is shown in figure 8:

Fig. 8: Welding torch for the CMT-process. A revolution in welding technology due to its size, weight and function.

The motor in this torch is an AC-servomotor, which is equipped without a gear, as a gear would have too much clearance for a reversing movement up to 70 Hz and as a gear would be the first thing to deteriorate.

As the windings of the motor are directly included into the torch housing, the size of the torch can be kept extremely low and also the center of gravity can be optimised relatively to the robot. The wire movement in the torch can be performed very precisely as the rotation of the motor is digitally controlled.

Additionally the pressure of the wire rollers towards the wire can be adjusted in a reproducible way. Therefore exactly the same welding results on different welding systems can be obtained.

8. Applications of the CMT-process

There are three main applications for the CMT-process, namely

- Spatter-free MIG-brazing
- Thin sheet applications (aluminium, steel, stainless steel)
- Arc joining of steel to aluminium

All base materials and filler wires known from conventional GMAW processes can also be processed with the CMT-process. Also all seam geometries and torch positions known from there are possible with the CMT-process and the equipment.

MIG-brazing is already known for quite a long time. The main advantage of MIG-brazing of galvanized sheets is the fact that only the filler wire is molten and the base material remains solid. The conventional MIG-brazing is characterized by very few spatters, but from time to time spatters can occur. When spatters occur, postwork is necessary in most cases, which is time-consuming.

In the CMT-process the short circuit is opened in a very controlled way and the wire drawback supports the metal transfer as described above. When regarding only regular torch tilt angles the CMT-process is absolutely spatter-free, as it is shown in figure 9:

Fig. 9: CMT-brazing of galvanized sheets (1mm thickness). Brazing speed 1,5 m/min.

Due to the non-occurrence of spatters, expensive postwork can be omitted. Additionally, the heat input in the CMT-process is lower compared to conventional MIG-brazing, which enhances the gap bridgability.

In many branches of industry, where thin sheets are processed, the weight of the welded parts is very important. E.g. in the automotive industry the cars should become lighter so that they consume less fuel.

As the CMT-process is characterized by a very low heat input, it is now possible to join e.g. aluminium sheet down to a thickness of 0,3 mm in butt seam geometry without backing. Therefore cost-intensive pre- and postwork and the use of backings can be omitted. Figure 10 shows a butt seam geometry of two 0,8 mm aluminium sheets:

Fig. 10: Butt seam geometry of 0,8 mm aluminium sheets. Welding without backing. Welding speed 1,5 m/min.

Another application of the CMT-process to be described here is the arc joining of steel to aluminium. It is e.g. the demand of the automotive industry to join steel to aluminium to reduce weight and

optimise the center of gravity for demanded mechanical strength. The main problem in the arc joining of steel to aluminium is the formation of a very brittle intermetallic phase between these two materials. The thinner the intermetallic phase the better the mechanical properties of the welded samples. One main factor determining the thickness of this intermetallic phase is the heat input during the joining. In order to keep this intermetallic phase very thin it is necessary to decrease the heat input to a very low value. Therefore the CMT-process is perfect for the arc joining of steel to aluminium as the heat input is very low as already described above.

Figure 11 shows arc joining of galvanised steel to aluminium:

Fig. 11: Arc joining of galvanized steel to aluminium (both 1mm thickness). Welding speed 70 cm/min.

As it can be clearly seen in figure 12, the aluminium base material is molten and therefore welded.

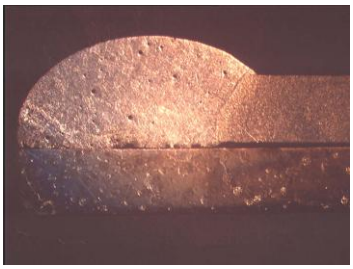


Fig. 12: principle of joining steel with aluminum

The steel base material is only brazed. The condition for the joining of steel to aluminium is a galvanization of the steel base material as the galvanized layer works like kind of a flux material. This galvanized layer should have a thickness of 10 μm or higher.

In the first welding trials, 1 mm thick grade DC 04 + ZE 75/75 A electroplated sheets were braze-welded to 1 mm aluminium sheets of grade AW 6016 using silicon-containing standard alloys and a specially adapted aluminium-based filler metal. In terms of the statical strength achieved by these joints, the results were highly satisfactory. The average tensile strength was around 145 N/mm². It was found that the steel-aluminium joins achieved the same strength as welded joins between similar age-hardenable aluminium alloys (Type 6000), as in this latter case the precipitations from the supersaturated mixed crystal, and the coarsening of the incoherent precipitations, together result in de-hardening of the order of 30 – 40 % in the heat-affected zone (HAZ). This means that the fracture always took place in the HAZ of the aluminium base metal.

Further investigations showed that on hot-dip galvanised sheets with a minimum zinc thickness of 10 µm, the tensile

strength values had less variance than on the electrolytically galvanised sheets, and - using the same filler metal -

were on average 5 - 7 % higher.

When naturally hard alloys (Type 5000) were used, identical fracture behaviour was found to occur in the tensile test.

Corrosion investigations were performed on bright and cataphoretically painted sheets by subjecting them to salt spray testing (in a standing-water environment to DIN 50021/SS) and to VDA alternating climate corrosion testing (621 – 415).

This testing has shown that when an optimised brazing alloy is used, the resistance of the filler metal to selective forms of corrosion can be drastically increased. What is more, using an optimised brazing alloy also has a positive influence on the sub-paint corrosion behaviour. The highly corrosion-sensitive alloying zone between the coating of the steel sheet and the brazing alloy must be effectively sealed off against the electrolyte. Finally, it has become apparent that the constructive design of the joint has a very great influence on its service strength, especially under corrosive conditions.

Latest test were also done on welding steel with the CMT process. The benefits you can gain are above all in gap bridging ability and in less spatters.

Another application is also the welding of magnesium with nearly zero spatters.

9. Summary

Using the CMT process you can weld applications that seemed til now not possible. In addition you got a very stable arc and good bridging ability.

Regarding all these benefits and above all the possibility to join steel with aluminium the CMT process will open new areas of welding.

3rd INTERNATIONAL CONFERENCE
MECHANIZATION, AUTOMATION AND ROBOTIZATION IN WELDING AND ALLIED PROCESSES

MEHANIZIRANI POSTUPCI U PROIZVODNJI RASVJETNIH STUPOVA

MECHANIZED PROCESSES IN THE PRODUCTION OF LIGHTING POLES

Franjo Javor, dipl.inž. Elektroda Zagreb, d.d., Radnička cesta 55, Zagreb
Robert Maganić, dipl.inž. Dalekovod, d.d., Vukomerička b.b., Velika Gorica

Ključne riječi: rasvjetni stupovi, mehanizirani MAG, MIG i EPP postupak zavarivanja, MAG žica, MAG praškom punjena žica, vruće cinčanje, cinkova prevlaka, zaštita od korozije

Key words: *lighting poles, mechanized MAG, MIG and SAW welding process, MAG wire, MAG flux cored wire, hot dip galvanizing, zinc coating, corrosion protection*

Sažetak: U radu je opisan način proizvodnje rasvjetnih stupova sa posebnim osvrtom na fazu zavarivanja i antikorozivne zaštite.
Istaknuto je učešće uzdužnog mehaniziranog MAG postupka zavarivanja sa iskustvenim podacima o bitnim varijablama utjecajnim na tehnološki proces.
Antikorozivna zaštita (vruće cinčanje) obavlja se u potpuno automatiziranom procesu sa kontinuiranim praćenjem svih utjecajnih parametara što rezultira visokom i postojanom kvalitetom proizvoda, uz potpuno zadovoljene sve ekološke zahtjeve.

Abstract: *This article describes production of lighting poles with special emphasis on welding and corrosion protection.*
Role of MAG automatized longitudinal welding process is pointed out with empiric data regarding all factors influencing technological process.
Corrosion protection (hot dip galvanazing) is automatized, and ensures high quality of final product and environmental protection in every way.

MEHANIZIRANI POSTUPCI U PROIZVODNJI RASVJETNIH STUPOVA

1.) UVOD

Područje rasvjetne tehnike doživjelo je brzi razvoj što se posebno može zamijetiti na javnim površinama, osobito na prometnicama, turističkim i stambenim centrima, parkovima, trgovačkim, industrijskim centrima, stadionima i sportskim borilištima, gdje su postavljeni visoki estetski kriteriji i tehnički uvjeti za konstruktivnu izvedbu nosivih rasvjetnih i reflektorskih stupova i prateće opreme.

Poduzeće **DALEKOVOD d.d. ZAGREB** između ostalog proizvodnog programa, nastupa na domaćem i svjetskom tržištu sa ponudom rasvjetnih i reflektorskih stupova za sve navedene potrebe, uz potpuno riješene sve tehnološke operacije od projektiranja , pripreme, prerade gdje mehanizirani postupci zavarivanja imaju ključno mjesto, do potpuno automatiziranog postupka cinčanja kao završne antikorozivne zaštite spomenutih proizvoda.

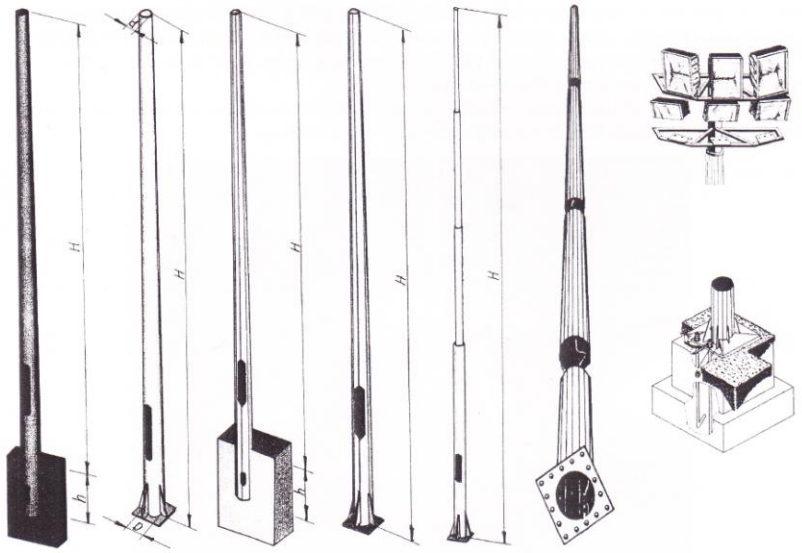
U ovom radu opisan je karakterističan tip proizvoda iz navedenog asortimana, sa svim bitnim čimbenicima visokoproduktivnih instaliranih tehnoloških postupaka, te osvrt na ostale slične proizvode, obzirom na zadane klimatološke uvjete i specifične eksploatacione karakteristike.

2.) NAMJENA, OBLIKOVANJE I OSNOVNI MATERIJALI STUPOVA

Prema namjeni rasvjetni stupovi dijele se na :

- stupove za javnu rasvjetu,
- stupove za dekorativnu rasvjetu,
- reflektorske stupove,
- portalne stupove kao nosače prometne signalizacije,
- stupove za posebne namjene (nosači rasklopišta, transformatorskih stanica i sl.).

Obzirom na poprečni presjek stupovi se proizvode kao okrugli i poligonalni (trokutni, kvadratni, pravokutni, oktogonalni, itd), a prema uzdužnoj osi uglavnom su konusnog oblika, sa vrlo različitim rješenjima i mogućnostima ovjesa i montaže rasvjetnih tijela na gornjem dijelu, vrhu stupa. Donji – temeljni dio stupova također je tipski riješen, prema potrebama sa mogućnostima fiksiranja vijčanom vezom preko zavarene temeljne ploče ili izravno zalijevanjem u betonsku podlogu.



Slika 1. Pojedini tipski oblici stupova

Osnovni materijal od kojeg se izrađuju stupovi može se svrstati u tri grupe:

- limovi od niskougljičnih konstrukcionih čelika,
- limovi od nehrđajućih Cr-Ni čelika,
- limovi od aluminijskih slitina.

Stupovi od niskougljičnih konstrukcionih čelika izrađuju se u visinama (dužinama) od 0,5 m do 60 m, sa debljinama limova koji se kreću od 2 mm do 22 mm. Pri projektiranju i konstruiranju uz sve posebne zahtjeve naručitelja uzimaju se u obzir svi utjecajni faktori kao: vjetar, korisno opterećenje, temperature, snijeg, led, moguća havarija okolnih objekata, potres, udar prometnih sredstava, industrijska ili slična agresivna mikroklima, itd.

Osnovne podloge propisane su okvirima niza normi EN 40 (EN 40-1, prEN 40-1:2003, prEN 40-3-1,2,3, EN 40-4, EN 40-5 i EN 40-6). Ovdje su obrađeni i definirani svi opći i posebni uvjeti o osnovnim materijalima, načinu projektiranja i dimenzioniranja.

Područje tehnologije zavarivanja i razine kakvoće zavara propisane su nizom normi: HRN EN 288 – 1,2,3,8, HRN EN 1011 – 1,2,3 i HRN EN ISO 5817.

DALEKOVOD d.d. ima uspostavljen, primijenjen i održavan sustav upravljanja kvalitetom u skladu sa zahtjevima norme HRN EN ISO 9001 i jedna je od rijetkih tvrtki u Hrvatskoj u kojoj je uveden sistem upravljanja i zaštite okoliša prema HRN EN ISO 14001.

Uz navedeno izrađeni su i interni propisi zasnovani na višegodišnjem iskustvu, zahtjevima naručitelja, što sve skupa pri konačnom ugovaranju rezultira tzv. »listom pristanaka« kao obostrano obvezujućim dokumentom.

Obzirom na način izradbe, vrstu temeljenja, osnovni materijal, mogućnosti i varijante korištenja i ugradnje, poduzeće **DALEKOVOD d.d**. može ponuditi preko 250 tipskih rješenja stupova, od koje ponude iste je moguće vidjeti postavljene na svim kontinentima i klimatskim uvjetima u svijetu.

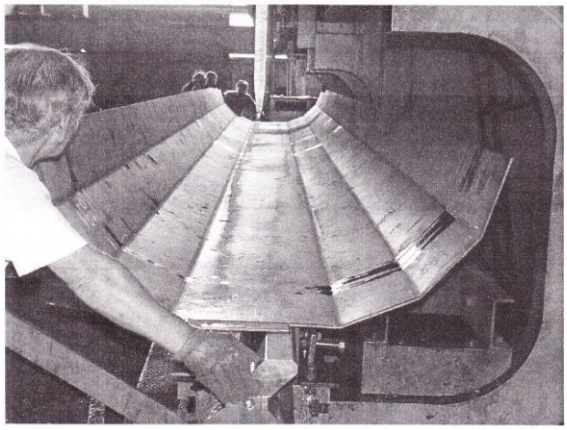
3.) PRIPREMA POZICIJA ZA ZAVARIVANJE

Tehnološki proces započinje hladnim oblikovanjem i to mehaniziranim odmatanjem i ravnanjem čeličnog lima iz koluta, koji se u istoj fazi reže na potrebnu dužinu i tipsku razvijenu širinu.

U idućoj fazi izrezani plašt stupa odlazi na odgovarajuću prešu (Slika 2.), na kojoj se formira poligonalni oblik presjeka plašta stupa, vrlo često istostranični oktogonalni. Ovdje su moguće dvije varijante: formiranje plašta stupa iz dvije polovice poligona, tj. Sa dva uzdužna zavarena spoja ili da se poligon zatvara iz jednog komada lima sa jednim uzdužnim zavarenim spojem.

U oba slučaja uz odgovarajuće pripoje na mjestu zavarenog spoja, plašt stupa pripremljen je za operaciju uzdužnog mehaniziranog zavarivanja.

Paralelno sa ovim aktivnostima, odvijaju se operacije izrezivanja temeljne ploče, čvornih limova i ostalih pozicija koje se privaruju i zavaruju za taj tip stupa.



Slika 2.Formiranje poligonalnog plašta rasvjetnog stupa

4.) MEHANIZIRANO UZDUŽNO ZAVARIVANJE

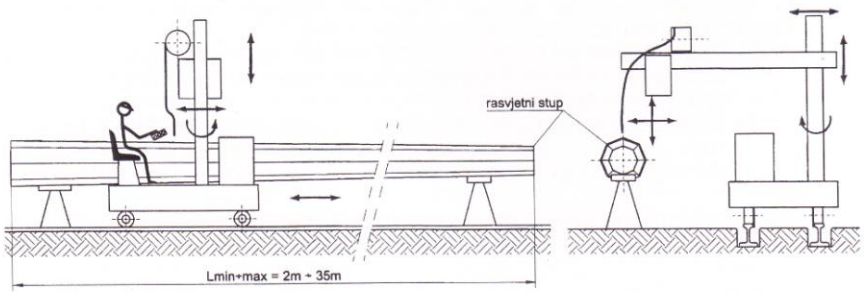
Zavarivanje uzdužnih zavara svih tipova stupova izvodi se na instaliranom konzolnom automatu ESAB / MKR300.
Za polaganje ovakvih zavara česta je uporaba portalnih sustava, ali raspoloživa oprema svojom nosivošću, robusnom izvedbom, brojem stupnjeva slobode gibanja, ponovljivošću, brzinom, mogućnostima pozicioniranja zavara sukladno glavnim koordinatama, pouzdanim sustavom upravljanja, jednostavnim načinom programiranja i vrlo brzim i udobnim načinom osposobljavanja zavarivača – operatera, u potpunosti zadovoljava sve zahtjeve.

Pripadajući izvor i konzolni automat mogu se koristiti za uzdužno MIG, MAG i EPP zavarivanje, a sve ovisno o tipu stupa, odnosno vrsti osnovnog materijala i njegovom presjeku, čemu se raspoloživa oprema i izvor mogu vrlo brzo prilagoditi i za što već postoje provjereni i propisani svi ključni parametri. Uređaj ima mogućnost, tijekom gorenja luka, pratiti pomake u tri koordinate, čime se pokrivaju sve netočnosti nastale u pripremi žlijeba, te konusni oblik stupa i blaga ostala odstupanja, a sve praćeno preko taktilnog senzora i neposrednog vizualnog nadzora od strane operatera – zavarivača. Na spomenutoj opremi moguće je polaganje uzdužnih zavara na stupovima dužine od 2 do 36 metara.

Oprema i raspoloživi izvor LAF 1000 projektiran je tako da se može kod EPP postupka zavarivanja koristiti sa dvije dodatne žice u tandemu, a kod MIG/MAG postupaka oprema je prilagođena radu sa jednom žicom.
Najčešće se ipak koriste jednostruki gorionici , a regulacija struje i napona su :

- MIG/MAG –postupak U=17 – 45 (V), I= 50 – 1000 (A),
- EPP – postupak U=22 – 45 (V), I= 40 – 1000 (A)

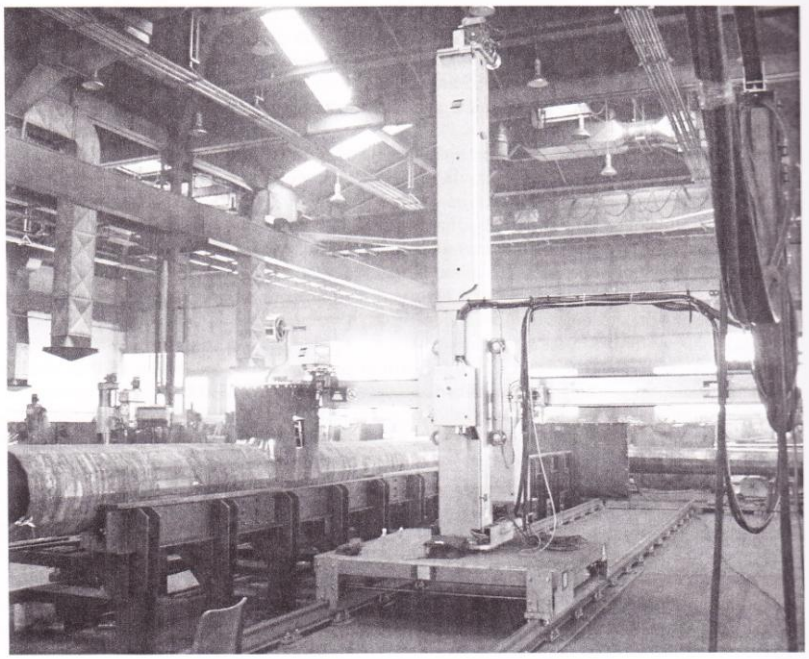
Osnovne komponente opreme sastoje se od konzolnog nosača sa platformom i podvozom, izvora za zavarivanje, kontrolnog uređaja i gorionika za zavarivanje. Kompletna oprema kontrolirano se pomiče po geodetski niveliranim tračnicama (vodilicama) koje omogućavaju precizno navođenje gorionika na zavareni spoj. Izradak, rasvjetni stup također je precizno pozicioniran uzduž glavne osi – koordinate gibanja konzolnog automata. Brzine zavarivanja kreću se od 10 do 180 cm/min.
Mehanizirano zavarivanje uzdužnog zavara na ovaj način značajno je skratilo osnovno tehnološko vrijeme pri proizvodnji stupova.



Slika 3. Princip rada konzolnog automata i kinematika glavnih osi

4.1) Mehanizirano MAG zavarivanje

U radu je kao tipičan uzorak sažeto prezentirana proizvodnja konusnog oktogonalnog rasvjetnog stupa visine 8 metara, koji se izrađuje od čelika kvalitete S355 J2G3 (Č.0561), debljine 5 mm.



Slika 4. Mehanizirano zavarivanje rasvjetnog stupa

Zavarivanje uzdužnog zavara na ovom rasvjetnom stupu izvodi se MAG postupkom zavarivanja na opisanom konzolnom automatu (Slika 4.), dodatnim materijalom proizvođača **ELEKTRODA ZAGREB,d.d.,** na dva načina:

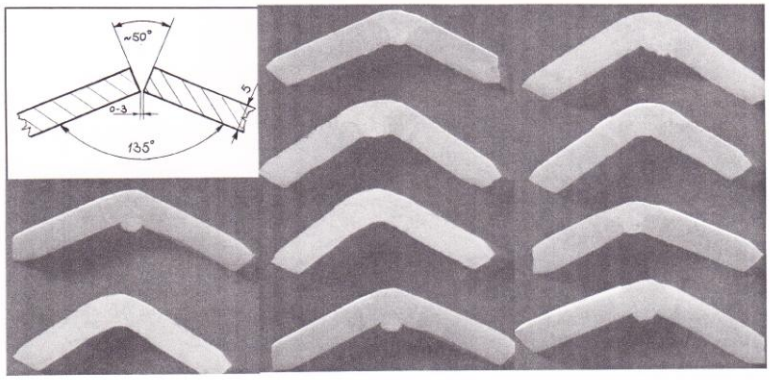
1.) Puna žica kvalitete G3Si1 prema HRN EN 440, naziva **EZ-CO_2**, namijenjena za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika čvrstoće do 590 N/mm² u zaštiti CO_2 ili mješavine Ar/CO_2 plinova ili,
2.) Rutilna praškom punjena žica brzoskrućivajuće troske, kvalitete T 42 2 P C1H5, prema HRN EN 758, naziva **EZ-FIL 1,** namijenjena za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika čvrstoće do 590 N/mm² u zaštiti plina CO_2.

Parametri zavarivanja i ostvareni tehnološki rezultati prikazani su u Tablici 1 :

Tablica 1

Vrsta žice	Struja zavarivanja (A)	Napon zavarivanja (V)	Brzina žice (m/min)	Vrsta zaštititnog plina	Protok plina (l/min)	Brzina zavarivanja (cm/min)
EZ-CO2 Ø1,2 mm	190	21	7,5	Ar/CO_2 (80/20)	15 – 18	65
EZ-FIL 1 Ø1,2 mm	225	23	8,5	Ar/CO_2 (80/20)	15 – 18	70

Za ilustraciju rezultata provedenog zavarivanja u Slici 5. prikazana je priprema spoja i rezultati analize makro uzoraka prilikom certificiranja postupaka zavarivanja ovog tipa stupa.



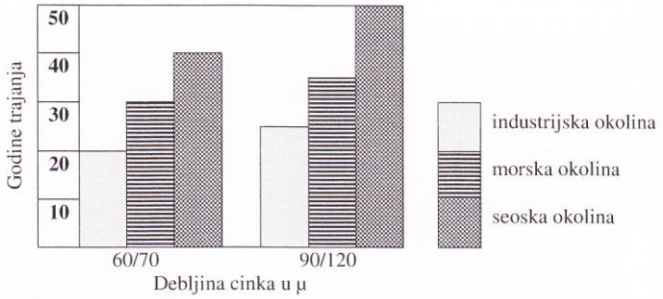
Slika 5. Skica pripreme zavarenog spoja i makro uzorci

Objektivna ocjena i zapažanja pri ovoj fazi zavarivanja govore da zavarivač – operater radi u komfornim uvjetima, gdje praktički nadzire sam postupak u okviru fizičkog pozicioniranja zavarivačkog luka unutar samog žlijeba – spoja, bez formalnog utjecaja na ostale parametre i uvjete zavarivačkog procesa, te je subjektivni zamor minimalan.
Odabrani dodatni materijal u navedenim uvjetima daje u obje varijante dobar i miran prijenos metala u električnom luku, bez štrcanja rastaljenih kapljica na okolne površine, što će u završnoj fazi antikorozivne zaštite biti od posebne važnosti. Iz obavljenih ispitivanja potvrđena je dobra penetracija i provar sa zahtijevanim mehaničkim svojstvima.
Po okončanju uzdužnog mehaniziranog zavarivanja, stup se otprema na zavarivačke pozicije gdje se završno, ručno MAG postupkom, istim dodatnim materijalima zavaruju temeljna ploča sa ukrutama i ostalim detaljima opreme odgovarajuće za ovaj tip rasvjetnog stupa.

5.) VRUĆE CINČANJE

Od prvih ideja o mogućnostima i prednostima zaštite željeznih i čeličnih predmeta presvlakom slojem cinka, u Francuskoj 1742. godine, danas je postupak vrućeg cinčanja zauzeo položaj najefikasnije, tehnološki, ekonomski i ekološki najprihvatljivije i najzastupljenije zaštite čelika od korozije, u cijelom svijetu. Presvlačenje cinkom predstavlja najvažniji postupak zaštite čelika s pomoću metalnih prevlaka. Postupkom vrućeg pocinčavanja čeliku se poboljšavaju mehanička svojstva., a presvlačenje nepristupačnih i najsloženijih oblika ne predstavlja problem kao kod postupaka klasičnog naštpricavanja i bojanja.
Poduzeće **DALEKOVOD d.d ZAGREB** u svojem velikom pogonu vruće cinčaonice u Dugom Selu raspolaže sa najsuvremenije riješenim automatiziranim kapacitetima od 30.000 tona/godišnje, sa radnim dimenzijama kade za pocinčavanje: 13.000 x 1.800 x 2.800 (h) mm, gdje je moguće cinčanje raznih čelično-rešetkastih konstrukcija, cijevnih i poligonalnih stupova, zaštitnih i sigurnosnih ograda za prometnice, razne armature i mreže i ostale čelične proizvode izložene različitim atmosferskim utjecajima.
Relevantne norme u provođenju tehnoloških procesa vrućeg pocinčavanja su:
ASTM-A 385, HRN EN ISO 1461 i ASTM – A123.
Iskustveni podaci o trajnosti zaštite cinčanih čeličnih elemenata prema podacima iz laboratorija cinčaonice DALEKOVOD d.d. prikazani su u Tablici – grafikonu br. 2.

Tablica 2 : Trajnost cinčanih površina



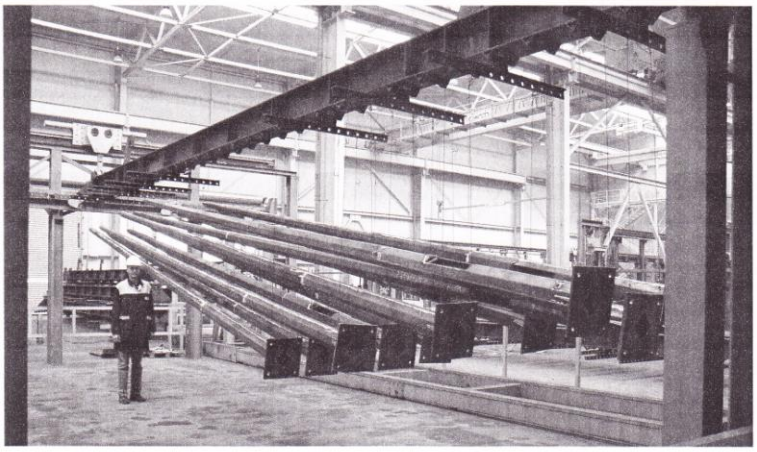
Zaštita okoliša, kao i zaštita na radu u cinčaonici bili su odlučujući čimbenik pri odabiru instalirane tehnologije :

- Razina buke potpuno je u skladu s propisima i ispod dopuštenog nivoa.
- Obrada istrošenih kiselina obavlja se u suvremenim uređajima, regenerirana solna kiselina vraća se u proces, nastali željezo (II) klorid ima primjenu u industriji, a proizvodnja cink (II) klorida utječe na smanjenje troškova utroška soli za fluksiranje.
- Krutog otpada u ovom postupku vrlo je malo i on se kao netoksičan i neopasan odlaže na standardna odlagališta otpada.
- Kao dodatna sigurnost od slučaja incidenta, sve kade za kemijsku obradu, kao i spremnici imaju dvostruki sistem zaštite kako bi se osigurao okoliš od zagađenja.

5.1.) Vruće cinčanje rasvjetnih stupova

Prateći završnu fazu proizvodnje rasvjetnih stupova moguće je opisati i automatizirani postupak vrućeg pocinčavanja u opisanim kapacitetima velike cinčaonice.

Kao i svi slični čelični dijelovi koji idu na antikorozivnu zaštitu vrućim pocinčavanjem, tako se i rasvjetni stupovi sortiraju i vješaju na manipulativne grede, čime praktički započinje automatizirani proces vrućeg cinčanja (Slika 6.).

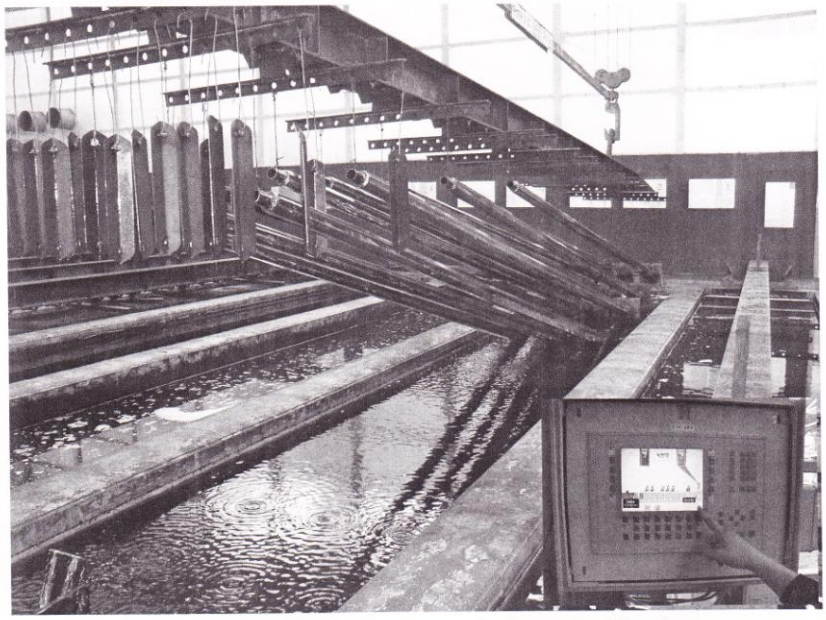


Slika 6. Manipulativna greda sa ovješenim stupovima.

Kod uvođenja stupova u automatizirani proces vrućeg cinčanja, za iste se u postojeće programe upisuju ključni podaci kao što su: debljina materijala, težina, stanje površina (korozija, masnoća,, itd.), čime su vremenski definirani parametri u procesima cinčanja:

- odmašćivanje, dekapiranje, ispiranje, fluksiranje, sušenje, vruće cinčanje

Manipulativna greda prenosi ovješene pozicije vremenski točno iz jednog medija (kade) u drugi, a kompletni postupak praćen je iz upravljačkog centra vizualno i preko ekrana (Slika 7.).

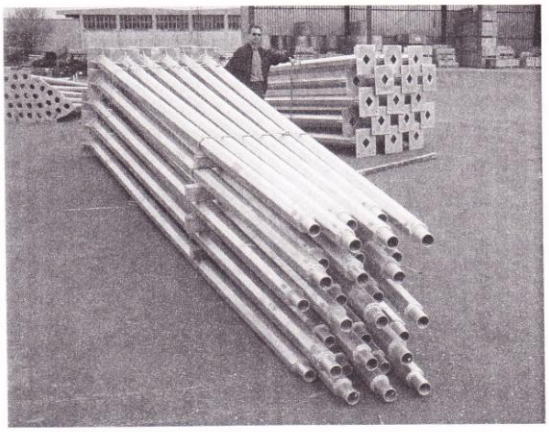


Slika 7. Uranjanje rasvjetnih stupova u kadu za odmašćivanje

Nakon fluksiranja i sušenja manipulativna greda doprema stupove u komoru za vruće pocinčavanje, koja se automatski zatvara i vruće cinčanje obavlja uranjanjem i točno određenim vremenom zadržavanja ovješenih rasvjetnih stupova u talini cinka na temperaturama od 440 do 450 °C. Nakon definiranog vremena manipulativna greda podiže stupove iz taline cinka, komora se otvara i pocinčani stupovi otpremaju na mjesto za međufazno odlaganje gotovih pozicija.

Nakon izvršenih završnih pregleda i kontrole stupovi se pakiraju za otpremu i odlažu u skladište gotovih proizvoda (Slika 8.).

Kontrola površina pocinčanih stupova obavlja se vizualno, a pocinčani sloj mjeri se leptoskopom, magnetskim metodama. Za rasvjetne stupove koji su izrađeni od čeličnog lima debljine 5 mm, uobičajena debljina cinkovog sloja iznosi od 75 do 85 µm, čime ovako zaštićena površina ima prosječni vijek trajnosti od 35 do 40 godina, u srednje zagađenoj gradskoj sredini.



Slika 8. Rasvjetni stupovi spremni za isporuku

6.) ZAKLJUČAK

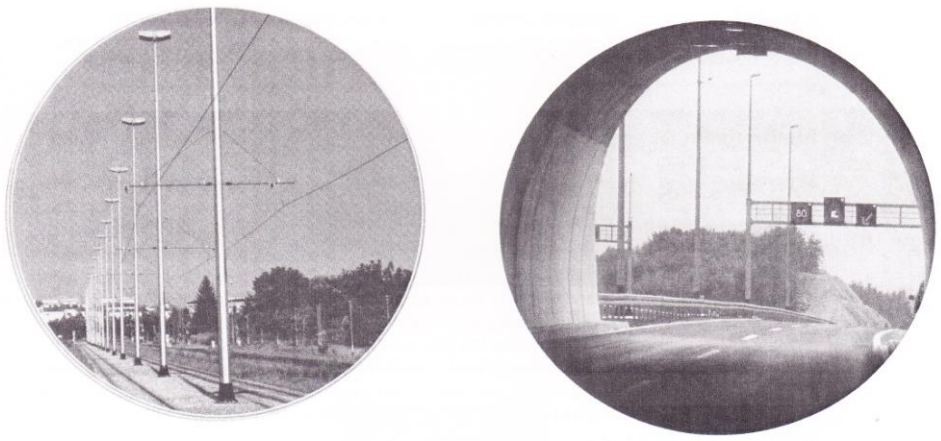
U radu je razmatran općenit i konkretan pristup izradbi rasvjetnih stupova kao kombinaciji više različitih tehnoloških postupaka, od konstruktivne razrade, pripreme do realizacije u kojoj tehnologije zavarivanja i završna antikorozivna zaštita zauzimaju ključno mjesto.

Kao potvrda dobrog izbora instaliranih tehnologija u malom segmentu je i prikazani praktični primjer proizvoda čija je trajnost, kvaliteta i estetika izložena stalnoj prosudbi na svim urbaniziranim javnim površinama.

Stupanj mehanizacije i automatizacije zadovoljava trenutne i u dogledno vrijeme sagledive potrebe tržišta.

Mehanizacija i automatizacija sigurno još imaju dosta prostora za usavršavanje i nadogradnju u dijelu operacija pripreme pozicija i hladne obrade, te pozicioniranja i manipuliranja u pojedinim fazama zavarivanja.

Za instalirane kapacitete i postojeću tehnologiju vrućeg cinčanja može se objektivno prosuditi da je spremna zadovoljiti i daleko veće kvantitativno-kvalitativne zahtjeve domaćeg i svjetskog tržišta.



Slika 9. Rasvjetni stupovi na prometnicama

Tugomir Šurina

UDK 621.721.658.564

Robotizacija u tehnici zavarivanja

Ključne riječi:

- zavarivanje
- automatizacija
- robotizacija

Key words:

- welding processes
- automation
- robots

Adresa autora (author's address):

Prof. dr. Tugomir Šurina

Fakultet strojarstva i brodogradnje
Đ.Salaja 1, 41000 Zagreb

Primljeno (received):

1991–10–14

Pregledni članak

Automatizacija u tehnici zavarivanja započela je upravljanjem električkim veličinama u vremenskim programatorima, na što je slijedilo upravljanje mehaničkim veličinama kod automata za zavarivanje. Slijedeći korak predstavlja primjena robota, čime je omogućena prilagodljivost proizvodnog procesa kao odgovor na tehnološke izazove u tvornicama budućnosti.

Subject review

ROBOTICS IN WELDING PROCESSES

Automation of welding processes has begun with the control of electrical variables in welding timers. It was followed by control of mechanical variables in welding automata. Next step was achieved by application of robots, which enables the flexibility of production process as response to tetchnological challenge in factories of the future.

Übersichtsarbeit

ROBOTISIERUNG IN SCHWEISSTECHNIK

Automatisierung in der Schweisstechnik hat mit dem Steuern der elektrischen Parameter bei den Zeitprogrammatoren begonen. Danach folgte das Steuern der mechanischen Parameter von Schweissautomaten. Nächster Schritt war Roboteranwendung, womit wurde die Flexibilität des Herstellungsprozesses ermöglicht als Autwort auf die technologische Herausforderungen in der modernen Industrie.

1. UVOD

Jedna od bitnih značajki prijelaza u postindustrijsko društvo je stvaranje *»tvornica budućnosti«*, s minimumom fizičke radne snage. Takve tvornice s kapitalno-intenzivnom proizvodnjom, visokim tehnologijama odnosno automatizacijom, proizvodit će dovoljno materijalnih dobara za potrebe društva, tj. osigurat će se materijalni preduvjeti da većina radno aktivnog stanovništva djeluje u sektoru usluga.

Tvornice budućnosti podrazumijevaju visoki stupanj automatizacije. Kako se u današnje vrijeme automatizacija poistovjećuje s mikroelektronikom, to znači njeno prožimanje sa cijelim proizvodnim lancem tvornice. Računala upravljaju i povezuju sve dijelove proizvodnog procesa. Uz kompjutorizaciju, izvanredno važna je i robotizacija što je u širem značenju automatizacija transporta.

Upravo su te *kompjutorizirane tehnologije* ključne među tzv. novim tehnologijama. One obuhvaćaju računalom poduprtu konstrukciju (CAM), gdje su numerički upravljani strojevi, industrijski roboti i fleksibilni proizvodni sustavi. Tu spadaju i računalom integrirana proizvodnja (CIM) kao i primjena umjetne inteligencije (ekspertni sustavi).

Taj će se preobražaj industrijske proizvodnje bitno odraziti u metaloprerađivačkoj industriji (komadna proizvodnja) gdje je niski stupanj automatizacije, jer pretežu male i srednje serije, pa je tu i znatno najviši postotak zaposlenih radnika. Naprotiv, u procesnoj industriji (tekuća proizvodnja) i u energetskim postrojenjima već je ostvaren visoki stupanj automatizacije i razmjerno je malo fizičkog rada. To predstavlja veliki izazov proizvodnom strojarstvu.

U strojarskoj proizvodnji istaknuto mjesto zauzima i tehnologija zavarivanja ili, bolje reći, neki postupci zavarivanja. Razlozi su dvojaki. Prvo, postupci zavarivanja su izrazito automatični (njem. automatisierungsfreundlich), te se automatsko upravljanje pojedinim utjecajnim veličinama u procesu zavarivanja može razmjerno jednostavno realizirati. Drugo, razvoj pojedinih visokih tehnologija primjenjuje se u tehnici zavarivanja. To su novi postupci (obrada laserom, elektronskim mlazom, inženjering površina), kao i novi materijali (nove legure, kompoziti, polimeri).

Prevladavajuća uloga tehnike zavarivanja u robotizaciji proizvodnje vidi se i iz *tablice 1.*, koja prikazuje glavna područja primjene robota u Velikoj Britaniji, Francuskoj i Njemačkoj, i to ukupni broj instaliranih robota do kraja 1989. godine te broj instaliranih robota u 1989. godini. Bez obzira na aktualnost i usporednu točnost podataka, vidi se da je najveći broj robota uveden u postupcima zavarivanja, zahvaljujući prije svega robotizaciji automobilske industrije.

2. ROBOTIZACIJA U TEHNICI ZAVARIVANJA

Automatizacija postupaka zavarivanja počela se širiti nakon drugog svjetskog rata kad su se pojavili *vremenski programatori* (engl. timer). Oni su isprva izvedeni u elektromehaničkoj verziji (releji) a kasnije u elektroničkoj. Pomoću njih se moglo upravljati električkim veličinama tj. intenzitetom i trajanjem struje kao i otporom na mjestu zavara kod elektrootpornog (točkastog) zavarivanja. Dakle, automatski se upravljalo doziranjem energije na mjesto zavara.

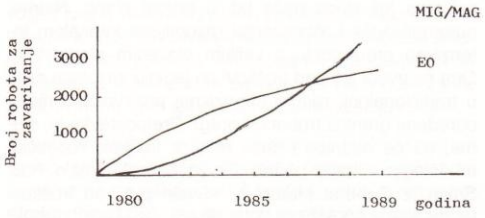
Sredinom 60-tih godina došlo je to svestranije primjene **automata za zavarivanje.** Pomoću njih se moglo automatski upravljati i mehaničkim veličinama kao što je pozicioniranje, gibanje trajektorijom brzina. To je značilo automatsko upravljanje pištolja ili elektrode u odnosu na izradak. Značajka automata za zavarivanje bilo je »hardversko« programiranje, sa čvrsto povezanim upravljačkim lancem. Promjena programa bila je vrlo otežana, odnosno krajnje neprilagodljiva.

Krajem 70-tih godina nagli razvoj mikroračunala i sofisticiranih robota omogućio je gradnju *robotiziranih zavarivačkih ćelija.* Upravljački uređaji upravljaju procesom zavarivanja, a upravlja se uz mehaničke i električke veličine i raznim pomoćnim veličinama. Robotizirana zavarivačka ćelija predstavlja zaokruženu proizvodnu cjelinu gdje postoji i dodatna oprema kao što je zaštitna ograda, sigurnosna zaštita s fotoćelijama, rasvjeta, usisavanje plinova. To je gotovo potpuno automatizirana proizvodnja, i jedino se, iz razloga ekonomičnosti, umetanje i vađenje izradaka i naprave obavlja ručno.

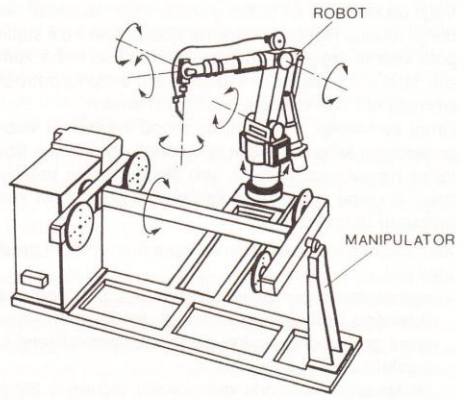
Upravo zbog automatičnosti postupka, najveću automatizaciju odnosno robotizaciju postigli su postupci elektrootpornog točkastog zavarivanja (EO) te elektrolučnog zavarivanja taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi plina ili plinskih mješavina (MIG/MAG). Kod EO postupka robot zamjenjuje NKV radnika, dok je kod MIG/MAG postupka znatno složenije upravljanje a zamjenjuje se VKV radnik. Kod ovog potonjeg, između ostalog, upravlja se putanjom i brzinom pištolja za za-

Tablica 1: Usporedba glavnih područja primjene (Industrial Robot, Vol. 17, No.2, 1990, s. 86)

	Vel. Britanija		Francuska		SR Njemačka	
	Do 12. 1980.	U 1989.	Do 12. 1989.	U 1989.	Do 12. 1989.	U 1989.
Točkasto zavarivanje	853	262	1460	202	4055	338
Elektrolučno zavarivanje	842	163	1040	224	3790	535
Montaža	496	3	951	174	4201	831
Opsluživanje strojeva	627	28	749	143	2302	737
Rukovanje dijelovima	295	72	1231	336	3817	1145



Slika 1: Zastupljenost robota za zavarivanje u Njemačkoj (1980-1987.) [1]



Slika 2: Robot (6 SSG) s manipulatorom (1 SSG) osnovni su dijelovi robotizirane zavarivačke ćelije

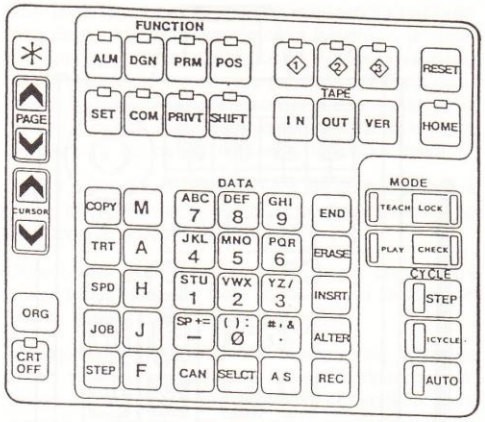
varivanje, strujom i naponom zavarivanja, brzinom žice za zavarivanje, te njihanjem pištolja.

U dijagramu na *slici 1.* prikazana je zastupljenost robota za zavarivanje u Njemačkoj za razdoblje 1980-1987. godine [1]. Uočljiva je stagnacija robota za točkasto zavarivanje zbog zasićenosti u automobilskoj industriji, dok se broj robota u elektrolučnom zavarivanju naglo povećava.

Na kraju spomenimo i problem *točnosti* odnosno ponovljivosti. Dok je npr. kod obrade odvajanjem čestica potrebna velika točnost, što se osigurava konstrukcijom alatnog stroja, kod zavarivanja visoka točnost nije potrebna. Zato se i roboti, koji zbog svojih konstrukcijskih značajki mogu postići točnosti reda veličine 0,1-1 mm, mogu dobro uklopiti u tehnologiju zavarivanja.

3. ROBOTIZIRANA ZAVARIVAČKA ĆELIJA

Tipična robotizirana zavarivačka ćelija [4] ima robot *(slika 2)* rezolutne strukture s maksimalnom pokretljivošću tj. sa šest upravljanih osi, a na vrhu ruke je montiran pištolj za zavarivanje sa žicom za zavarivanje. Uz robota je i manipulator s jednom upravljanom osi.



Slika 3: Primjer tastature računala YASNAC RX koji upravlja robotiziranom zavarivačkom ćelijom

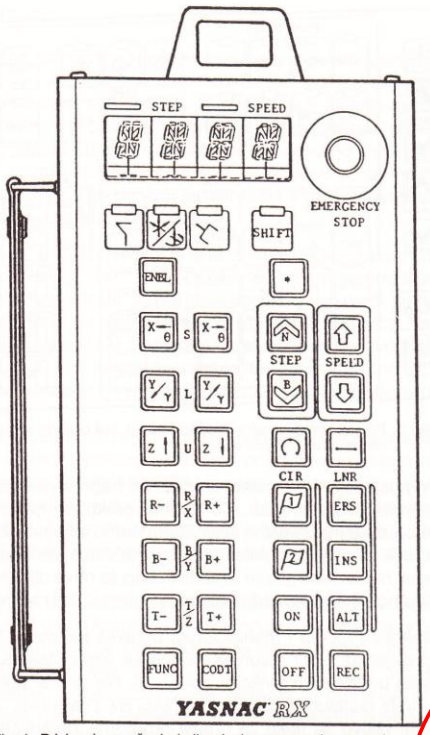
On posjeduje dvije palete sa steznim napravama, gdje se pričvršćuje izradak. To veoma praktično rješenje omogućuje maksimalno iskorišteno radno vrijeme robota: dok se na jednoj paleti izvodi zavarivanje, na drugoj paleti radnik vadi gotovi izradak i ubacuje nove dijelove. Sigurnosni zaslon među paletama potpuno štiti radnika.

Gibanjem robota i manipulatora upravlja računalo. Na upravljačkoj ploči računala nalaze se ekran, tastatura i više uobičajenih funkcionalnih tipki. Na *slici 3.* prikazana je tastatura računala YASNAC RX (Yaskawa, Japan). Lijevo su tipke za odabir programa zavarivanja. Tipke gore lijevo (FUNCTION) su datoteke, čijim se prizivanjem može mijenjati programski zapis na ekranu. Tipkama dolje u sredini (DATA) upisuju se brojevi, slova i simboli. Tipke desno dolje (MODC) bira se način rada, prije svega učenje i izvođenje programa. Gore desno su tipke (TAPE) za rad s kazetom.

Budući da se u tom slučaju radi o uobičajenom *programiranju učenjem* (teach-in) [6,7], u upravljačku mrežu uključen je i privjesak za učenje *(slika 4).* On služi za programiranje tako da se pomoću tipki aktivira gibanje pojedinih zglobova robotske ruke po željenoj putanji, a funkcionalnim tipkama upisuju se u memoriju računala podaci o položaju i brzini osi zglobova u svakom programskom koraku.

Nedostatak je opisanog programiranja učenjem što se ostvaruje *on-line,* te je za vrijeme programiranja robot izvan pogona, što mu smanjuje ekonomsku opravdanost. Osim toga, tako programirani robot se ne može ulančati u složeniji CAD/CAM sistem, već radi autonomno.

Zato je suvremeni trend da se uvede *tekstualno programiranje,* gdje se proces zavarivanja opisuje jednim od programskih jezika prilagođenih robotu (ARMBASIC, RAPT, itd.). Takvo se programiranje provodi *off-line,* te robot može nesmetano raditi. Osim toga, tako se pro-



Slika 4: Privjesak za učenje koji upisuje programske razmake u procesu lučnog zavarivanja

gramirani robot može povezati s drugim strojevima i računalima. Da bi se smanjilo vrijeme programiranja, razvijaju se CAP sistemi (Computer Aided Planning) koji cjelovito pokrivaju funkcije planiranja i programiranja i sadrže normalno i bazu podataka.

4. RAZLOZI I PREDUVJETI AUTOMATIZACIJE U TEHNICI ZAVARIVANJA

Prikaz upućuje na to da su roboti samo dio proizvodnog kompleksa, pa je možda uputnije da se sa stajališta proizvodnje govori o robotizaciji. Kao i sa svim skupim uređajima, uvođenje novih tehnologija i robota zahtijeva preispitivanje slijedećih *razloga* [5]:

- ekonomskih (povećanje produktivnosti, povećanje proizvodnje, ušteda energije),
- zamjena opasnoga, teškog, prljavog i monotonog rada (engleska kratica 4D: dangereous, difficult, dirty, dull),
- povećanje kvalitete proizvoda (robot u zavarivanju),
- radnih operacija koje su izvan fizičkih i umnih mogućnosti čovjeka.

Ekonomski su razlozi svakako primarni jer je u tome i smisao udjela automatizacije u razvoju proizvodnih snaga. Ipak, s obzirom na ograničeno tržište, ekstenzivni način proizvodnje i male serije, taj kriterij u našim uvjetima još dugo neće biti u prvom planu. Naime, automatizacija i robotizacija razumijeva kapitalom intenzivnu proizvodnju s velikim uloženim sredstvima. Ona se uvodi tek kad troškovi po jedinici rezultata rada u tradicionalnoj, radom intenzivnoj proizvodnji prijeđu određenu granicu (robotički prag). Pretpostavka je, naime, da će nadnice i dalje rasti, a troškovi robotičke tehnologije i dalje padati. To je sažeto izrazio R.B. Smith iz General Motors-a: »Svaki put kad troškovi radne snage porastu za dolar na sat, 1000 novih robota postaje ekonomičnima«. U našim uvjetima, uz nadnice koje su niske i sporo rastu, te uz zamagljena vrednovanja, teško se može naći ekonomsko opravdanje za uvođenje robotizacije.

Valja upozoriti na još jedno gledište ekonomičnosti uvođenja robota. Robot za odgovarajući posao troši stotinu puta više energije od čovjeka. Nad tim se treba zamisliti, iako je u postojećim situacijama u ukupnoj potrošnji tvornice utrošak energije robota zanemariv.

Drugi se kriteriji, međutim, ne mogu zaobići. U vezi s posljednjim kriterijem valja spomenuti ograničene fiziološke mogućnosti čovjeka kao što su brzina reakcije, osjeti ili umne mogućnosti kad postoji potreba za kompleksnim upravljanjem.

Za uvođenje robota moraju se ispuniti i određeni *preduvjeti* [5]:

- djelotvorna organizacija proizvodnje, pa i poduzeća (konačno i privrednog sistema), jer kapitalno-intenzivna proizvodnja ne trpi zastoje ili neiskorištene kapacitete,
- oblikovanje proizvoda mora voditi računa o zahtjevima automatizacije proizvodnje (»automatičnost« konstrukcije),
- oblikovanje proizvodnje – biraju se tehnologije koje se mogu lakše automatizirati (»automatičnost« tehnologija); toj kategoriji pripadaju: zavarivanje, tlačni lijev, obrada laserom i sl.,
- treba postojati odgovornost, radna stega, radne navike, pogonska klima, kao što je to slučaj kod svih skupih postrojenja,
- kvalifikacijska struktura kadrova.

Istraživanja na Sveučilištu Case u SAD upozorila su na određene slabosti pri uvođenju novih tehnologija i robota u proizvodnju:

- potcjenjivanje vremena potrebnog da se potpuno uhoda proizvodni proces,
- precjenjivanje stupnja iskorištenja novog postrojenja,
- potcjenjivanje potrebnih dotjerivanja tijekom uhodavanja i u normalnoj proizvodnji.

Da ipak nije sve tako crno i da su tehnološki prodori mogući i u nas, dokazuje pozitivan primjer nekih tvornica. Tako je jedna od njih umjesto automata za elektrolučno zavarivanje uvela u proizvodnju niz robota. U projekt se ulazilo postupno, te je u prvoj fazi investicije naglasak bio na upoznavanju nove tehnologije, izobrazbi potrebnih kadrova i testiranju isporučilaca opreme. U eksploataciji i održavanju oslonili su se potpuno na vlastite snage, timski rad svih stručnjaka za održavanje, programiranje i proizvodnju, plansko održavanje i do-

Odgovor na pitanje br. 44

Odgovor na pitanje br. 45

Odgovor na pitanje br. 46

Odgovor na pitanje br. 47

voljnu zalihu rezervnih dijelova. Rezultati nisu izostali: vrijeme lučnog zavarivanja okvira za motorkotače smanjilo se nakon prijelaza s ručnoga na rad robota za 80 posto, a od automata za zavarivanje na robote za 66 posto. Pritom i ne spominjemo humanizaciju rada.

U svakom slučaju, pri nabavi robota – slično kao i pri kupnji računala – vrijedi slijedeća činjenica: već sama namjera da se nabavi robot prisiljava stručnjake u poduzeću da prouče i kritički sagledaju aktualno stanje proizvodnog procesa. A već je to veliki korak naprijed.

5. DALJI RAZVOJ ROBOTSKE TEHNIKE

Kao što se to uvriježilo u drugim industrijskim proizvodima, i za robote je uvedena vremenska i funkcionalna podjela na tzv. generacije, pa se govori o prvoj, drugoj i trećoj generaciji robota [2]. Obilježjem robotske generacije smatra se složenost informatičkog sustava robota, što znači njegov funkcionalni sadržaj.

Prva generacija (programirani roboti) obuhvaća robote koji se sada primjenjuju. Njih karakterizira čisto upravljanje. To je upravljački lanac upravljački uređaj – prigon – mehanizam ruke – prihvatnica, pa nema povratne informacije. Ti su roboti bez osjetila i s vrlo ograničenom »inteligencijom«. Zapravo, od atributa inteligencije imaju samo pamćenje (memoriju), u koje je pohranjen program. Uz ograničenu inteligenciju i osjete, znatno zaostaju u spretnosti i pokretljivosti u odnosu prema čovjekovoj ruci. Ipak, djelotvorno mogu obavljati samo niskokvalificirani rad, pa i okolina mora biti visokoorganizirana. Postoji mogućnost da se ugradi i pokoji senzor, što bitno ne mijenja svojstva robota prve generacije.

Roboti prve generacije vjerojatno će i ubuduće biti najrašireniji jer zadovoljavajuće rješavaju problem rukovanja u jednostavnijim slučajevima, koji su i najčešći u industrijskoj primjeni.

Druga generacija robota (senzitivni roboti) opremljena je nizom senzora (vizualni, taktilni, sile), a mogu imati i sustave za raspoznavanje. Roboti preko senzora dobivaju informacije o stanju okoline, a pomoću jednostavne logike, ugrađene u računalo, takvi roboti imaju mogućnost reagiranja. U tim je slučajevima već riječ o regulaciji s petljom povratne veze. Uz pamćenje, ti roboti imaju mogućnost donošenja jednostavne logičke odluke: da ili ne. Na taj se način kontrolom sile mogu zaštititi uređaji, smanjiti organiziranost okoline (slaganje, orijentacija predmeta). U zavarivanju senzorski sistem se već razvija u svrhu slijeđenja spoja.

Treća generacija robota (inteligentni roboti) opremljena je, osim sustavima za raspoznavanje, i računalima nove generacije. Prema *slici 5c* to je vođenje multivarijabilnog procesa s više izlaznih i ulaznih varijabli. Cijeli bi sustav trebao imati svojstva višeg stupnja inteligencije, tj. donošenja odluka u determiniranim uvjetima (analiza), učenje i odlučivanje u nedeterminiranim uvjetima (sinteza). Za tu je umjetnu inteligenciju najbitnija mogućnost učenja (povezuje nova iskustva s postojećim znanjem). To se može postići modelom vanjskog svijeta ugrađenim u memoriju računala, odnosno datotekom. Uspoređivanjem s dobivenim informacijama iz vanjskog svijeta, robot samostalno reagira na vanjske promjene, tj. donosi odluke bez programske upute.

Roboti s umjetnom inteligencijom još su budućnost, a trebali bi zamijeniti čovjeka u nepovoljnim uvjetima na dnu oceana, u svemiru, u ozračenoj okolini.

Određivanje generacije robota može se provesti i s druge točke gledanja. Neki se tehnološki zadatak po pravilu rješava u tri hijerarhijske razine.

Na najvišoj, strateškoj razini, postavlja se cilj, razrađuje idejno rješenje razbijanjem na rješenja djelomičnih problema. Na taktičkoj razini djelomični se problemi algoritmiraju i donose odluke. Na operativnoj razini upravlja se izvođenjem tih algoritama.

Kao i čovjek, robot preuzima operativni zadatak upravljanja osnovnim operacijama, a okolina je visokoorganizirana (prva generacija). Na taktičkoj se razini donose odluke u složenim operacijama, a iz okoline se stalno dobivaju aktualne informacije (druga generacija). Konačno, na najvišoj, strateškoj razini određuju se ciljno usmjerene operacije; mora postojati složeni model okoline, prema kojemu se donose odluke u smislu postavljenog cilja (treća generacija).

6. ZAKLJUČAK

Ako pod pojmom robotizacija podrazumijevamo automatizaciju transporta u najširem smislu riječi, vidimo da ona nezaustavljivo prodire u područje zavarivanja. Naime, robotizacija zamjenjuje čovjeka u upravljanju mehaničkim veličinama kao što su pozicioniranje, brzina, sila ili njihanje. Na taj način podiže se produktivnost, utječe se na kvalitetu zavara, a oslobađa se čovjeka teškog i opasnog posla.

LITERATURA

[1] S. KRALJ: Stanje i pravci razvitka zavarivanja, Zavarivanje, vol. 33, br. 4/5, 1990, s. 185-196.
[2] T. ŠURINA, M. CRNEKOVIĆ: Industrijski roboti, Školska knjiga, Zagreb 1990.
[3] P.B. SCOTT: Robotička revolucija, A. Cesarec, Zagreb 1985.
[4] T. ŠURINA: Programiranje industrijskih robota, Narodna tehnika, Zagreb 1989.
[5] T. ŠURINA: Izazov novih tehnologija u industriji Jugoslavije, Zbornik radova BIAM 88, s. 1-4.
[6] W. EVERSHEIM, G. LUSZEK: Current position and development trends in the programming of robots for arc welding, Schweissen & Schneiden, No. 2, 1990, s. 29-31.
[7] G. DUELEN, W. SCHMIDT: Control systems for robots – state of the art, Schweissen & Schneiden, No. 6, 1990, s, 88-90. Automatisiert montieren, VAMA, Frankfurt 1991.
[8] E. AGAPAKIS et al.: Vision-aided Robotic Welding: An Approach and a Flexible Implementation, Robotics Research, Vol. 9, No. 5, 1990, s. 17-34.
[9] R.O. BUCHAL et al.: Simulated Off-line Programming of Welding Robots, Robotics Research, Vol. 8, No. 3, 1989, s. 31-43.
[10] A. KRSTULOVIĆ: Prilog primjeni robota u tehnološkim procesima brodogradnje i srodnih industrija, disertacija, FSB, Zagreb 1989.

Slobodan Kralj
Zoran Kožuh

UDK 621.791.658.564.681.14

Programiranje robota

Ključne riječi:

- programiranje robota
- zavarivanje
- on-line programiranje
- off-line programiranje

Key words:

- programming of robot
- welding
- on-line programming
- off-line programing

Adresa autora (Author's adress):

Prof. dr. Slobodan Kralj
Zoran Kožuh dipl. inž.
Fakultet strojarstva i brodogradnje
Sveučilišta u Zagrebu
HR 41000 ZAGREB
Salajeva 1
Hrvatska

Primljeno (received):
1992 – 10 – 12

Pregledni članak

U radu su prikazane vrste programiranja robota, njihov razvoj, ekonomske i tehnološke usporedbe raznih metoda programiranja, s naglaskom na vrijeme potrebna za preprogramiranje robota. Posebno su prikazane osnove "on-line" i "off-line" programiranja kao i mješoviti način programiranja. Za primjer off-line programiranja razmatran je programski paket ROBCAD.

Subject rewiev

PROGRAMMING OF THE ROBOTS

Methods of the programming of a robot, their development are presented in the paper. Also, economic and technical features of different methods of programming are compared, the main consideration being the time required for reprogramming. Basic ideas of "on-line" and "off-line" programming approach are presented, as well as a hybrid (mixed) one. As an example of the off-line programming the ROBCAD software package is discused.

Überbsichtsarbeit

PROGRAMMIEREN VON ROBOTER

In der Arbeit werden die Programmierensarten von Robotern, Ihre Entwicklung sowie ökonomisches und technologisches Vergleiche von verschiedenen Programmierensmethoden dargestelt. Besonders werden die notwendige Programmierenszeiten betrachtet. Die Grundlagen vom "on-line" bzw. "off line" Programmieren sowie kombinierte Programmierensmethode werden dargestelt. Als ein Beispiel für das "on-line" Programmieren wird das Programmpaket ROBCAD betrachtet.

1. UVOD

Promjene donose nesigurnost. One su prirodne i nužne, a sposobnost prilagodbe i brzina prilogođavanja uvjetovat će opstanak u pojedinoj okolini.

Industrijska proizvodnja nalazi se u vrlo dinamičnoj okolini. Inovacije pridonose dinamici te utrke, a sposobnosti još nisu iscrpljene.

Jedna od inovacija su i sredstva koja omogućuju brze reakcije proizvodnje na potražnju. Svaka isplativa promjena mora se obaviti u najkraćem mogućem roku, pa makar ona bila i radikalna.

Današnji razvoj strojeva i uređaja pokazao je da se u modernom sistemu proizvodnje (počevši od ideje, preko razrade projekta, pripreme proizvodnje pa do prodaje gotovog proizvoda) vrijeme ciklusa proizvodnje ne može bitno promijeniti. Strojevi su angažirani 24 sata dnevno, ekonomskom analizom dobiven je gotovo optimalni tehnološki proces, koriste se produktivne tehnologije, optimirani su transportni putovi itd. Svi ti elementi vrlo dobro funkcioniraju, te utjecajem na svaki možemo sniziti troškove ili skratiti proizvodni ciklus za svega nekoliko postotaka.

"Usko grlo kapaciteta" u proizvodnom sistemu nije proizvodni proces (uz pretpostavku posjedovanja fleksibilnih strojeva). Uska grla su priprema proizvodnje i projektiranje. Inžinjeri moraju obaviti proračune potrebnog vremena, pripremiti tehnologiju na temelju konstrukcije izratka, moraju komunicirati s konstruktorima i izvršiteljima ,organizirati proizvodni proces, voditi proizvodnju , statistički obrađivati pojave, optimizirati na temelju ekonomskih analiza itd.

Programi za dizajniranje, proračune konstrukcija, pripremu proizvodnje, planiranje i praćenje proizvodnje , ekspertni sustavi, programirano vođenje proizvodnje omogućuju vrlo brze promjene i sigurnu konkurentnost što se tiče proizvodnje. Trebalo bi se što manje govoriti o konkurentnosti proizvoda, jer je ona prolazna , a početi govoriti o sposobnosti tvornice da kontinuirano proizvodi konkurentne proizvode.

Prednosti robotizirane proizvodnje nisu samo jednoličnа, kvalitetna proizvodnja s minimumom ljudskog rada i visokom produktivnošću, jer takva obilježja mogu imati i automati upravljani na višoj ili nižoj razini, nego mogućnost brzog preprogramiranja, izvođenje više operacija u kontinuitetu nego automati i operiranje sa širom porodicom izradaka.

Do nedavno je vrijedilo da s visinom stupnja automatizacije raste i vrijeme pripreme proizvodnje. To bi značilo da priprema jednog robota za samostalno izvođenje neke operacije traje dugo, što je u suprotnosti s idejom o fleksibilnosti proizvodnje. Zbog toga su se razvila sredstva koja smanjuju vrijeme pripreme, tj. programiranje robota. Promjena proizvodnog programa može biti izvršena u vrlo kratkom roku , što će uzrokovati konkurentnošću na tržištu.

U ovom radu bit će razrađene vrste programiranja robota, njihov razvoj, ekonomske i tehnološke usporedbe raznih metoda programiranja, s naglaskom na vrijeme potrebno da se preprogramira robot.

2. VRSTE PROGRAMIRANJA ROBOTA

U raspravama o programiranju robota, jezicima i načinu, vrlo često se može čuti : " Koliko robota toliko robotskih jezika" ili " Nema univerzalne metode programiranja ". Istina je da univerzalna metoda programiranja ne može biti idealno tehničko ili ekonomsko rješenje. U slučaju mogućnosti programiranja robota na više načina, metoda programiranja će ovisiti o primjeni robota. Ona će biti određena karakteristikama kompleksnosti geometrije izratka, konfiguracijom robota, vezom sa ostalim elementima sistema itd.

Osnovne metode programiranja robota su :

- on-line programiranje,
- off-line programiranje,
- hibridna (miješana) metoda programiranja.

Metode programiranja robota kao što su npr :

- "teach in" metoda programiranja,
- izravno programiranje,
- indirektno programiranje,
- programiranje kretanjem po stazi ,
- programiranje postavljanjem na točku ,
- programiranje sa senzorskom podrškom,
- makroprogramiranje,
- grafičko programiranje,
- programiranje orijentirano zadatku,
- programiranje orijentirano pokretu,

zapravo pripadaju u jednu od tih osnovnih metoda programiranja robota.

U radu će pažnja s gledišta fleksibilnosti proizvodnje, zastoja kod promjene proizvodnih procesa, angažiranja robota za vrijeme programiranja biti posvećena osnovnim metodama programiranja.

2.1. ON-LINE PROGRAMIRANJE

Pod on-line programiranjem smatra se ono programiranje robota koje se izvodi izravno na njegovoj radnoj poziciji. Za vrijeme programiranja robot je angažiran te tada ne može obavljati proizvodnu funkciju.

2.1.1. "TEACH IN" METODA PROGRAMIRANJA

Metoda programiranja "teach in" ili učenje robota svrstava se u vrstu on – line programiranja i dijeli se na :

- izravno učenje (programiranje) i
- neizravno učenje (programiranje).

Izravno učenje izvodi se tako da operater ručno ili pomoću nadomjesnog robota pomiče ruku robota preko že-

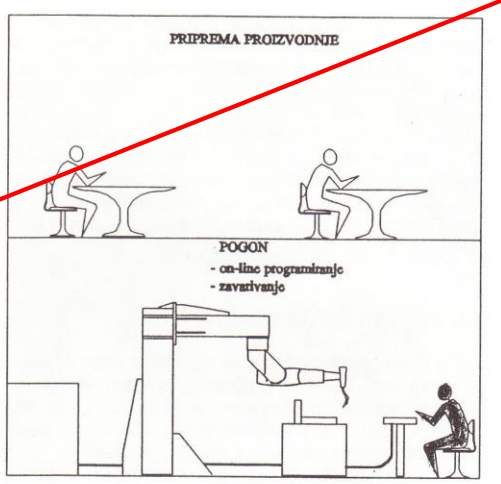
Odgovor na pitanje br. 48

Odgovor na pitanje br. 49

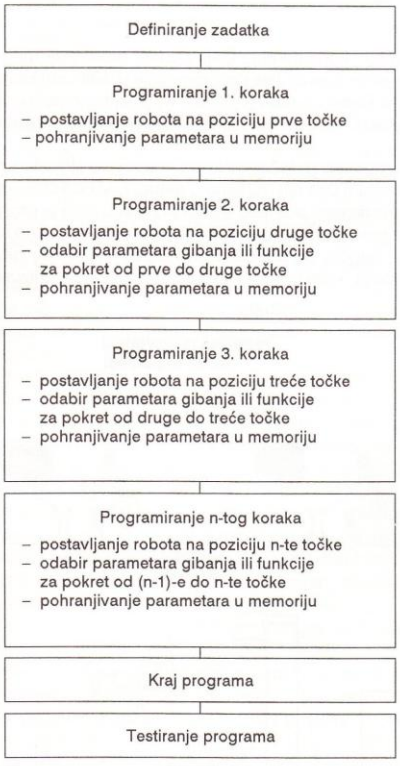
ljenih točaka u prostoru, čije se pozicije pohranjuju u memoriju, što omogućuje kasnije kretanje robota po stazi definiranoj tim točkama. To je danas već rijedak način programiranja.

Neizravno učenje izvodi se privjeskom za učenje. Kod robotiziranog zavarivanja ne primjenjuje se izravno učenje, već uglavnom indirektno učenje pomoću privjeska za učenje. Zbog toga će ovdje biti objašnjena samo ta metoda.

Kod ove metode robot se kreće pod "ručnom" kontrolom (kursorskim tipkama ili joystickom pomiču se zglobovi robota) do točaka zavarivanja, čije pozicije se pomoću ručnog programskog uređaja (privjeska za učenje), pohranjuju u memoriju. Kod zavarivačkih robota se uz podatke te pozicije pohranjuju i željeni parametri gibanja ili zavarivanja (ili neke druge operacije) za pokret od prethodne do te točke. Već pohranjene dvije točke sa svojim pozicijama i ostalim parametrima čine program. Kasnijim izvođenjem pohranjenog programa robot se kreće i obavlja funkciju po stazi označenoj zadanim točkama i pridruženim parametrima gibanja i zavarivanja.



Slika 2.: On-line programiranje



Slika 1.: Blok dijagram programiranja robota metodom "teach-in"

Blok dijagram operacija programiranja "teach in" metodom prikazan je slikom 1, a on-line programiranje (pomoću privjeska za učenje) prikazano je slikom 2.

Nakon programiranja izvodi se testiranje programa u kojem robot mora, automatskim ponavljanjem programiranih kretanja i funkcija, korak po korak kako je i programiran, točno izvršavati definirani zadatak.

Takav način podsjeća svojom strukturom i načinom programiranja na programiranje NC uređaja. Programiranje je jednostavno i osigurana je kvalitetna i jasna komunikacija operatera s robotskim sistemom. Takav sistem omogućava naknadne promjene programa, ubacivanje novih koraka, brisanje koraka i ostale operacije uređivanja (editiranja) programa. Mana takvog načina programiranja je što se to sve mora obavljati on-line tj. izravno na robotu koji za vrijeme programiranja ne može obavljati proizvodnu funkciju.

Ta se metoda vrlo lako uči, osobito što su privjesci za učenje korisnički ("user friendly") orijentirani. Znatna prednost te metode je što operater upravlja gibanjem robota u relativnim koordinatama obzirom na izradak te nije potrebno radni prostor predstavljati kao koordinatni sustav, a izratku i poziciji robota pridruživati koordinate tog sustava. Osim toga, ovaj sustav uzima izravno u obzir način gibanja u smislu izbjegavanja kolizija između robota, opreme i izratka.

Ta metoda zahtijeva dobro uvježbano osoblje koje ne treba biti visoko kvalificirano na području robotike , ali mora biti dovoljno kvalificirano u zavarivanju radi izbora parametara zavarivanja (brzine zavarivanja, brzine žice, struje, napona, orijentacije zavarivačkog pištolja itd.). Mana te metode je što je zavarivačka stanica neproduktivna za vrijeme programiranja. Ovisno o složenosti izratka, programiranje na taj način može biti dugotrajno i podložno

greškama. Uzimajući u obzir i vrijeme isprobavanja i ispravljanja, moguć je pad ekonomičnosti upotrebe robota u proizvodnji. Upotreba takvog načina programiranja mora biti opravdana znatnim brojem dovoljno velikih serija, jer nije dovoljno fleksibilna da trpi česta nova programiranja. Osim toga, u procesu gdje postoji veći broj robota potrebno je u trenutku novih programiranja robota imati na raspolaganju i veći broj operatera koji su osposobljeni u kratkom roku izvršiti sve aktivnosti u vezi s programiranjem, da bi zastoj proizvodnje zbog zauzetosti robota za vrijeme programiranja bio što kraći.

2.2. OFF-LINE PROGRAMIRANJE

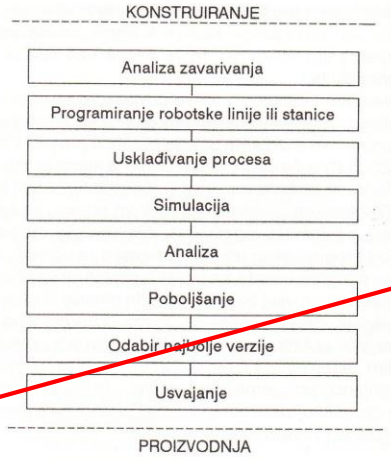
To je programiranje koje se obavlja na mjestu neovisnom o robotu. Dakle, za programiranja roboti nesmetano obavljaju svoju proizvodnu funkciju. Za razliku od on-line programiranja kod te metode zadatak je tekstualno zadan uz pomoć programskog jezika orijentiranog zadatku.

Program i koordinate su programirane na, za to namijenjenoj, radnoj stanici s odgovarajućim softwareom. Nakon toga program se prevodi u strojni kod i pohranjuje na magnetski medij. Kod takvog načina programiranja programer mora detaljno opisati svaki pokret robota i perifernih jedinica.

Najveći problem takvog programiranja je u projektiranju beskolizijskih staza. Zbog tog rizika danas se već vrlo uspješno izravno povezuju programski sistemi za off-line programiranje sa CAD sistemima, uključujući time u program sve podatke o geometrijskom izgledu izratka, stanice za zavarivanje i robota. Kod elektrolučnog zavarivanja u zaštiti plinova pojavljuju se strogi zahtjevi na programski sistem. Izradak nije uvijek fiksiran na jednoj precizno definiranoj poziciji već se vrlo često kreće, na uređaju za pozicioniranje, do nove pozicije i orijentacije. Osim toga kvalitetno izvođenje zavarivanja zahtijeva i uske tolerancije. Uzevši u obzir sve to, tim sistemom programiranja nije jednostavno programirati bez mogućnosti grafičke off-line simulacije izvođenja programiranog zadatka.

Takvim načinom programiranja koristeći grafičku simulaciju omogućuje se ekonomična proizvodnja vrlo malih serija, pa čak i pojedinačnih proizvoda. Programer kod tog načina ima jasnu predodžbu zbivanja u zavarivačkoj stanici.

Smisao off-line programiranja je izvođenje što više standardnih inžinjerskih tehnoloških procedura, u što kraćem roku, na radnom mjestu neovisnom od proizvodnje. Dosadašnji razvoj softwarea i hardwarea bio je u smjeru što bržeg izvođenja operacija robota, dok se danas odvija u smjeru što bržeg programiranja robota da izvede neku operaciju. Primjerice za programiranje zavarivanja jedne zavarene točke kod točkastog zavarivanja automobilske karoserije bilo je potrebno ukupno 4 – 8 sati za pripremanje i programiranje robota. Danas to vrijeme iznosi blizu 30 minuta /6/. Redoslijed operacija off-line programiranja pomoću takvih softverskih paketa prikazan je slikom 3./6/, a slikom 4. prikazano je off-line programiranje.

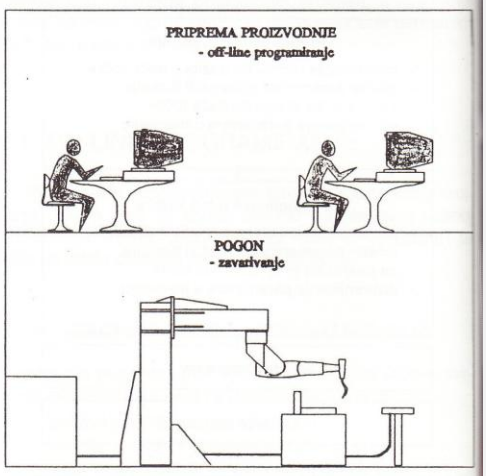


Slika 3.: Blok dijagram operacija kod off-line programiranja

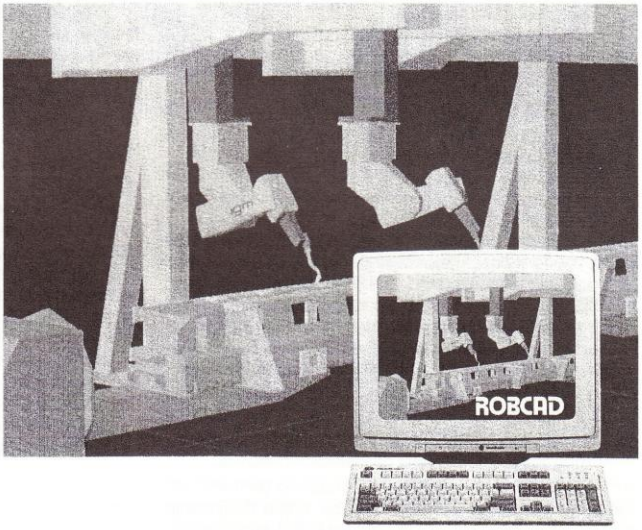
Odgovor na pitanje br. 50

Nakon konstruiranja CAD podaci proizvoda mogu biti upotrijebljeni za off-line programiranje u dijelu analize zavarivanja. Ovisno o proizvođaču moguća je primjena podataka raznih CAD sistema u sistemima za off-line programiranje.

Označavanje točaka zavara ili spojeva između točaka na izratku može biti izvršeno u samoj CAD datoteci, mogu biti specificirani pomoću kursora i miša u off-line programskom paketu ili tekstualno. Podaci o zavarivanju kao što su struja, napon, orijentacija i položaj zavarivačkog pištolja, tip pištolja ili elektroda za točkasto zavarivanje, pritisak kod



Slika 4.: Off-line programiranje.



Slika 5.: Ekranski prikaz grafičke off-line simulacije

točkastog zavarivanja itd. pridružuju se svakoj točci označenoj na prikazu izratka. U slučaju da je operacija zavarivanja organizirana tako da više robota zavaruje istodobno jedan izradak, što je slučaj npr. kod točkastog zavarivanja, moguća je odluka o redoslijedu zavarivanja zasnovana na proračunu vremena ukupnog ciklusa tog zavarivanja. Takve opcije sigurno ovise o razvijenosti programskog paketa. Podaci o poziciji i orijentaciji zavarivačkog pištolja ili glave za točkasto zavarivanje mogu biti automatski osigurani također na temelju CAD podataka. Potrebni kutevi nagiba pištolja bit će postignuti rotacijom od normale na površinu zavarivanja, koja je automatski izračunana na temelju CAD podataka.

Današnji sistemi su već opremljeni takvim rutinama da izračunavaju maksimalne momente inercije koje stvaraju zavarivačka oprema i ruka robota (posebno važno kod točkastog zavarivanja), što se koristi kod optimizacije gibanja robota. U skup tih operacija ulazi i provjera gibanja radi izbjegavanja kolizije.

Simulacija omogućuje korisniku da optimizira projektiranu robotsku stanicu i cijele ili samo dijelove procesa koji se u njoj odvijaju. Korisnik dobiva vrlo kvalitetan (trodimenzionalni) prikaz procesa koji je pogramiran. Nakon svih provjera program je spreman za eksploataciju.

Na tržištu postoji cijeli niz takvih programskih paketa. Cijena takvih paketa vrlo je visoka i u bliskoj budućnosti neće se bitnije smanjiti. Ideja svih programa je ista: što brže programiranje uz mogućnost što fleksibilnijeg povezivanja i korisnički orijentiran pristup pomoću grafičke animacije. Teži se tome da se program ne mora pisati u nekom od programerskih jezika nego da se pomoću grafičkih prikaza na ekranu (koje korisnik definira) automatski generira "kod" za izvršavanje zadatih radnji.

Tako generirani "kod" programa do samog kontrolora robota prenosi se ili fizičkim spojem radne stanice i robota (kabel) ili pomoću nekog od prijenosnih magnetskih medija.

Visoko sofisticirani programski paketi (npr. ROBCAD) omogućavaju niz operacija od projektiranja i planiranja elemenata robotske stanice, preko simulacije rada do praćenja rada robotske stanice. To su programi koji u minimalnom vremenu obavljaju one standardne rutine koje su se nekada radile tjednima i to neovisno od rada robota. Takvi paketi nude između ostalog slijedeće mogućnosti :

- trodimenzionalno modeliranje geometrije izratka;
- kreiranje robota i ostalih uređaja u stanici;
- optimizacija rasporeda elemenata u robotskoj stanici;
- automatsko ili ručno kreiranje trajektorija vrha alata;
- provjera ponovljivosti svih uređaja u stanici;
- generiranje koda programa za svaki uređaj u stanici, prema grafički zadanom zadatku;
- usklađivanje kretanja robota i ostalih uređaja u stanici;
- testiranje različitih tipova uređaja za isti zadatak;
- provjera na kolizije i definirane bliske prolaze, za vrijeme programiranja i simulacije;
- mjerenje i optimizacija vremena ciklusa;
- unapređenje kvalitete i efikasnosti;
- mogućnost prikaza simulacije iz različitih kuteva gledanja;
- praćenje proizvodnog procesa;
- dokumentiranje u raznim oblicima.

Jedna od najvećih prednosti takvih paketa je vrlo kvalitetni grafički prikaz objekata i podataka što osigurava izvrsnu preglednost procesa (slika 3). Grafički prikazi se mogu pohranjivati, osim na kompjutorske magnetske medije, i na video medije pomoću odgovarajućih priključaka.

Mogućnosti grafičkog moda su između ostalog slijedeće:

- 3D grafičko modeliranje;
- grafička simulacija u realnom vremenu;
- prikaz izratka, stanice i svih elemenata iz svih kuteva za modeliranja, simulacije ili praćenja procesa;
- simultani multi-ekranski prikaz iz raznih smjerova;
- mogućnost selektiranja boje svih elemenata na ekranu;
- prikaz objekata pomoću žičanih modela ili kao puna tijela, sa ili bez nevidljivih linija;
- sjenčanje prikaza;
- promjena položaja izvora svijetla (samim time i položaja sjena).

Takvi visokosofisticirani sistemi zahtijevaju kompjutore visokih performansi. Upotrebljavaju se radne stanice s vrlo jakim grafičkim adapterima (IBM RISC 6000, Silicon Graphics 4D, HP 9000, SUN 4 itd.).

Primjetno je da potrebna konfiguracija nije uobičajena, te je potrebno visoko ulaganje u hardver.

Takvi sistemi mogu biti upotrijebljeni na samostalnoj radnoj jedinici ili kao dio mreže. U slučaju da je sistem umrežen, glavne su prednosti :

- podaci mogu biti korišteni na više radnih stanica,
- moguća je podjela rada na više radnih stanica.

Vrijeme potrebno da se svlada grafički orijentirano off-line programiranje, od učenja sintakse, preko dizajniranja robotske stanice (u CAD-u) do njezina kalibriranja iste (postupak s kojim se postiže da grafički prikaz robotske stanice dizajnirane u CAD-u, a time i grafička simulacija gibanja robota i periferija što točnije odgovara stvarnosti) je bitno duže nego kod svladavanja on-line metode programiranja.

Grafički orijentirano off-line programiranje zahtijeva stručnije kadrove nego što je to slučaj kod on-line programiranja, koji uz tehnologiju zavarivanja moraju poznavati CAD i osnove programiranja u nekom od programskih jezika.

Takav način programiranja nudi izvanredne mogućnosti i otvara nove pravce razvoja programiranja robota.

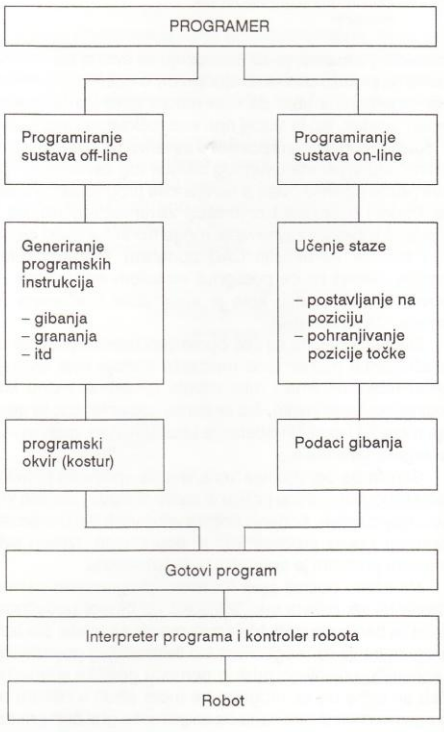
2.3. HIBRIDNE (MIJEŠANE) METODE PROGRAMIRANJA

Osnovna značajka te metode je da se dio programa koji je vezan uz operacijski tok generira off-line, a dio programa koji je vezan uz skup točaka u prostoru generira se on-line. Kod ove metode potrebno je robota pomoću privjeska za učenje prevesti preko željenih točaka, zapamtiti im pozicije (on-line dio miješane metode), te nakon toga na računalu koje je ili nije izravno povezano s robotom, uz zapamćene pozicije točaka izraditi program za zavarivanje (off-line dio miješane metode). Time se omogućava rad s točkama koje su zadane u relativnoj poziciji s obzirom na izradak i kolizijska provjera na samom radnom mjestu.

Kod ove metode dio programiranja obavljen je neovisno o robotu i tijeku proizvodnje čime se postižu određene uštede. Programiranje se, osim na isporučenoj opremi proizvođača, u znatnom broju slučajeva može obavljati i na PC računalima s odgovarajućim korisničkim programima.

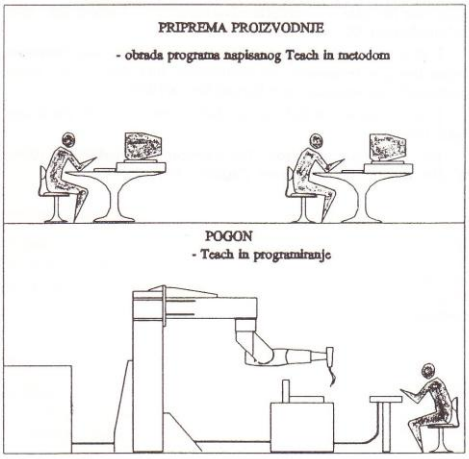
Programiranje kod kojeg se program napisan pomoću teach-in metode 'prebaci' na računalo gdje se uz korištenje nekog od programskih paketa (npr. IPAS) modificira, također pripada u miješano programiranje (slika 8). Takva metoda vrlo je pogodna za programiranje zavarivanja porodica izradaka, a vrlo je upotrebljiva i za stvaranje banki programa za robotizirano zavarivanje.

Sjedinjavanjem pozicije točke zavarivanja u obliku logičkog slijeda programa, programska instrukcija će sadržavati sve potrebne informacije kao što su parametri zavarivanja, informacije potrebne za senzorsku strategiju itd. Upotrebom referentnih točaka moguće je off-line programiranje kretanja robota do bilo koje točke u radnom prostoru robota, u relativnom odnosu na te referentne, tj "zapamćene" točke. Takvim načinom uzimanja samo neophodnih točaka opadaju troškovi programiranja i vrijeme angažiranja robota za programiranje. Kod ovakvog načina programiranja moguća je brža promjena tehnološkog procesa u smislu kraćeg zauzimanja robota programiranjem (ukupno programiranje traje nešto dulje u odnosu na on-line programiranje, ali je sam robot kraće vrijeme zauzet



Slika 6.: Blok dijagram tijeka hibridnog (miješanog) programiranja

Slika 7.: Hibridno (miješano) programiranje



Slika 8.: Jedna od varijanti hibridnog (miješanog) programiranja

programiranjem), te je primjenjiva i za manje serije a posebice je primjenjiva za serije sa porodicama izradaka gdje se isti zavari pojavljuju u raznim kombinacijama i pozicijama.

Dijagram tijeka takvog programiranja prikazan je na slici 6, a slike 7 i 8 prikazuju hibridno (miješano) programiranje.

3. ZAKLJUČAK

Visoka se produktivnost može postići dobrom organizacijom proizvodnog procesa i uporabom klasičnih automata za zavarivanje. Međutim takvi proizvodni procesi su vrlo tromi pri promjeni asortimana proizvoda.

Današnja dinamika tržišta nalaže što veću fleksibilnost proizvodnih procesa, a na tržištu preživljavaju samo oni koji to mogu postići.

U pripremi proizvodnje u robotiziranim procesima na brzinu novog programiranja utječe način programiranja robota. Razvoj metoda programiranja odvijao se uvođenjem inovacija u već postojeće robotske sisteme. Tako je uvođenjem nadomjesnog robota kod "teach-in" programiranja proces programiranja unaprijeđen. Uvođenjem programiranja preko privjeska za učenje proces programiranja je ubrzan i olakšan. Uporaba senzora također je unaprijedila taj proces. Vidljivo je da je robot kao sredstvo za rad vrlo pogodan za uvođenje inovacija, koje omogućavaju sve brže, lakše i šire programiranje.

Programiranje robota za zavarivanje metodom on-line se uglavnom izvodi pomoću privjeska za učenje. Takvo programiranje je u nekim slučajevima dugotrajno i podložno greškama. Nakon programiranja potrebno je isprobavanje programa i ispravljanje eventualnih grešaka. Zbog toga takvo programiranje zahtijeva veće serije i nije podložno čestim promjenama proizvodnog programa.

Off-line programiranjem pomoću grafičke simulacije postignuto je odvajanje procesa programiranja od robota i podizanje kvalitete samog robotiziranog zavarivanja.

Off-line programiranjem pomoću grafičke simulacije postižu se uštede u vremenu, smanjuju se pogreške, a za programiranja robot obavlja proizvodnu funkciju. Male serije koje su neprihvatljive u on-line programiranju, mogu vrlo brzo, uzevši u obzir i povećane troškove ulaganja, biti isplative u off-line metodi programiranja.

Kod tog načina programiranja moguće je pohranjivanje cijelog proizvodnog procesa na magnetske medije (stvaranje banke proizvodnih procesa), što omogućuje praćenje potreba tržišta.

Današnji programski paketi za off-line programiranje su veza između konstrukcijskog i proizvodnog odjela. Podaci su kompjutorski kompatibilni i iskoristivi na svim razinama proizvodnog sistema.

Jaki programski alati poput ROBCAD sistema omogućuju, osim brzog programiranja robota, korištenje CAD podataka i banke podataka parametara zavarivanja i geometrija uređaja.

Korisnički pristupačan i vizualno vrlo kvalitetan takav sistem omogućava kreiranje optimalnog robotiziranog sistema u vrlo kratko vrijeme, koristeći metode minimizacije. Jedini papirnati dokument u takvom načinu pripreme proizvodnje je izvještaj o procesima generiran automatski.

Troškovi ulaganja u grafički orijentirano off-line programiranje (kupnja odgovarajućeg software-a i hardwarea, troškovi usavršavanja kadrova i uhodavanja proizvodnje, itd.) su vrlo visoki i važan su čimbenik u ocjenjivanju te metode.

Kod hibridne (miješane) metode programiranja dio koji je vezan uz parametre pozicije obavlja se on-line, a dio koji je vezan na logičko povezivanje tih pozicija sa zavarivačkim zadatkom, u jednu funkcionalnu cjelinu izvodi se off-line. U toj fazi razvoja softvera primjenjuje se grafička podrška računala koja je vrlo bitna zbog preglednosti cijelog procesa.

Budućnost pripada sistemima off-line programiranja koji mogu grafičkom simulacijom procesa generirati "kod" programa.

LITERATURA

[1] H.J. Warnecke, U.Dilthey, W.Utner, U.Kahrstedt: "Programing procedures for industrial robots in gas-shielded metal-arc welding applications", Schweissen und Schneiden 12/1991

[2] M.M. Favoreto, L.F .Zanotti : "Complexities of car body assembly demand flexible automation", Welding and metal fabrication 3/1982.

[3] T.Šurina,M.Crneković : "Industrijski roboti", Školska knjiga, Zagreb 1990.

[4] ... : " Raziskovalni razvojni projekti", Institut "Jožef Stefan", Ljubljana, 1991.

[5] H.Beit :" Software slashes time required for robotic line design", Welding Journal 1/1991

[6] ... : "ROBCAD technical description", Tecnomatix, september 1990

[7] ... : "Programming manual for softwareversion 6.70", IGM, Wiener Neuedorf, 1989.

[8] P.Drews, P.Liebanow, K.Fuchs : " Macroprograming, a new programing technique for inert gas arc welding robots", Schweissen und Schneiden 2/1991.

[9] R.K.Miller, T.C.Walker: Artificial Intelligence Applications in Manufacturing, SEAI Technical Publications, 1988.

[10] B.Katalinić: "Razvoj, definicije, populacija i primjena industrijskih robota u tehnici zavarivanja", Međunarodno savjetovanje "Mehanizacija, automatizacija, robotizacija i primjena računala u zavarivanju", HDTZ, Pula, 1987.

[11] B.Novaković: "Roboti u zavarivanju", Međunarodno savjetovanje "Mehanizacija, automatizacija, robotizacija i primjena računala u zavarivanju", HDTZ, Pula, 1987.

[12] H.-J.Warnecke, H.Gzik: "Tendenzen der Roboterentwicklung unter besonderer Beruecksichtigung der Schweisstechnik", Schweissen und Schneiden 4/1987.

[13] J.Remmel: "Stand und Tendenzen der Entwicklung und Anwendung von Roboterlichtbogenschweisssystemen", Schweissen und Schneiden 4/1987.

[14] R.Dillmann: "Anwendung vom Methoden des Computerunterstuetzten Konstruirens in der Robotertechnik", Schweissen und Schneiden 4/1987.

[15] A.A.Tschubukow: "Rechnergestuetzte Beurteilung der Schweissbarkeit eines Objektes beim robotisierten Lichtbogen – verfahren", Avtomatičeskaja svarka 9/1986.

[16] W.Ewershei, G.Luszek: "Stand und Entwicklungstendenzen der Programierung von Robotern zum Lichtbogenschweissen", Schweissen und Schneiden 2/1990.

[17] G.Duelen, W.Schmidt: " Steuerungen fuer Roboter – Entwicklungstendenzen", Schweissen und Schneiden 7/1990.

[18] G.Duelen, H.Muench , W.Schmidt, K.Schroeer: "Steuerung fuer Roboter – erweiterte Funktionalitaet", Schweissen und Schneiden 9/1990.

[19] G.Pegels, H.-D.Koch: "CAD-Expertsystem – was leistet es heute bei geschweissten Konstruktionen des Stahl– und Anlagenbaus?", Schweissen und Schneiden, 9/1989.

[20] T. Šurina: "Robotizacija u tehnici zavarivanja", Zavarivanje 5/1992.

[21] T. Šurina-J.Sikošek: "Programiranje industrijskog robota", Narodna tehnika Hrvatske, Zagreb, 1989.

PITANJA ZA ISPIT SIOZZ 2013/2014

1. Koje su prednosti automatskog zavarivanja cjevovoda u odnosu na ručne tehnologije zavarivanja uspoređujući ekonomsko tehnološke parametre? (Navesti barem 5 prednosti.)
2. Koji su nedostaci automatskog zavarivanja cjevovoda u odnosu na ručne tehnologije zavarivanja uspoređujući ekonomsko tehnološke parametre? (Navesti barem 3 nedostatka.)
3. Nabrojati osnovne elemente sustava za automatsko zavarivanje.
4. Koja je uloga traktora za zavarivanje?
5. Koja je uloga izvora struje za zavarivanje?
6. Što se sve nalazi na glavi za zavarivanje koja obavlja glavno gibanje po orbitali uz pomoć vodeće nazubljene letve?
7. Čemu služi zavarivački šator ili zavarivačka kućica kod zavarivanja cjevovoda ili konstrukcija na terenu?
8. Koji se materijali u današnje vrijeme najčešće koriste pri izgradnji cjevovoda za transport nafte i plina?
9. Koji plinovi se koriste za zaštitu kod plazma rezanja?
10. Nabrojati parametre za rezanje laserom.
11. Nabrojati parametre za rezanje plazmom.
12. Na koji način se, pri plazma rezanju, održava visina električnog luka tj. udaljenost između vrha pištolja i površine materijala, a na koji način kod rezanja laserom?
13. Opišite ukratko HC-Heat Controlled MAG postupak zavarivanja.
14. Koji su osnovni parametri navarivanja?
15. Na što djeluje parametar balansa kod navarivanja HC MAG postupkom?
16. Nabrojati načine prijenosa materijala kod konvencionalnih postupaka zavarivanja?
17. Navesti klasifikaciju prijenosa metala prema IIW-u (*International Institute of Welding*).
18. Nabrojati suvremene postupke MAG zavarivanja. (Navest barem tri.)
19. Ukratko objasniti STT – Surface Tension Transfer postupak zavarivanja.
20. Ukratko objasniti FastROOT postupak zavarivanja.
21. Što znači kratica CMT?
22. Ukratko objasniti CMT – Cold Metal Transfer postupak zavarivanja.
23. Ukratko objasniti AC MIG postupak zavarivanja.
24. Ukratko objasniti RMT Rapid MIG/MAG Technology postupak zavarivanja.
25. Ukratko objasniti TIP TIG postupak zavarivanja.
26. Navesti prednosti TIP TIG zavarivanja.
27. Koji parametri se mogu podesiti na uređaju za dodavanje žice kod TIP TIG zavarivanja?
28. Koje dvije varijante TIP TIG postupka postoje?
29. Nabrojati značajke TIP TIG postupka zavarivanja s vrućom žicom.

30. Koji su zahtjevi robotiziranog i automatiziranog zavarivanja obzirom na eleketrični luk, prijenos metala, hlađenje, regulacije i kontrole električnog luka, itd.?
31. U kojem smjeru ide razvoj dodatnih materijala (elektroda) za zavarivanje?
32. Na primjeru objasniti pad napona.
33. Skicirati spoj izvora struje i držača elektrode pri REL zavarivanju.
34. Kakva je statička karakteristika kod uređaja za REL zavarivanje?
35. Što je to induktivnost?
36. Koja je razlika između običnog pulsa i dvostrukog pulsa kod konvencionalnog MIG zavarivanja?
37. Koje su uobičajene greške koje se javljaju kod zavarivanja aluminijskih legura?
38. Što je to naljepljivanje?
39. Navesti osnovne vrste programiranja zavarivačkih robota.
40. Koje su bitne značajke o kojima je potrebno voditi računa kod školovanja operatera za rad na robotu?
41. Što je sve potrebno za uspješno funkcioniranje robotske linije?
42. Koje su osnovne karakteristike STT postupka zavarivanja?
43. Nabrojati parametre kod STT postupka zavarivanja.
44. Nabrojati razloge i preduvjete uvođenja automatizacije u tehnici zavarivanja.
45. Koji se preduvjeti moraju ispuniti za uvođenje robota?
46. Koji su nedostaci uvođenja novih tehnologija i robota u proizvodnju?
47. Objasniti razlike između prve, druge i treće generacije robota.
48. Što je to „*teach in*“ metoda programiranja?
49. Ukratko objasniti on line programiranje robota.
50. Ukratko objasniti off-line programiranje robota.