



ZAVARIVANJE NEHRĐAJUĆIH ČELIKA MIG IMPULSNIM POSTUPKOM

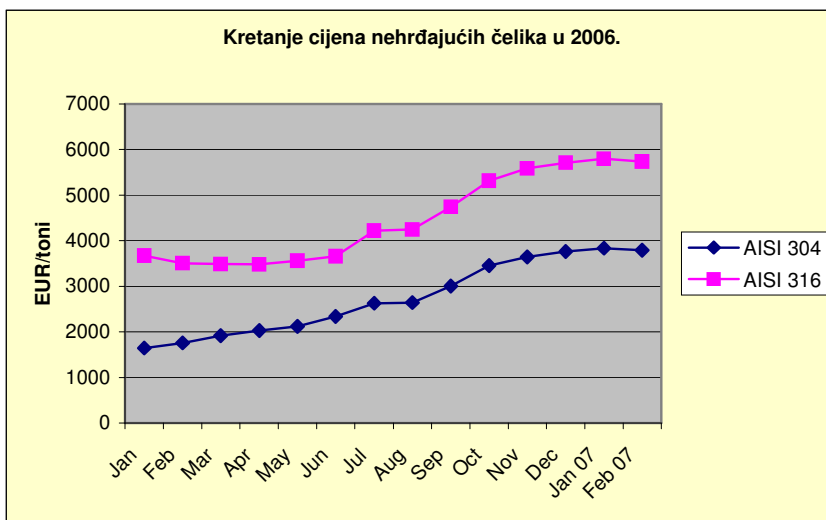
Marijan Rudan, dipl. ing.
OPTIMUS d.o.o., 52212 FAŽANA, Valbandon 606
Tel: 098 / 219 533
Fax: 052/ 520 813
E-mail: optimus@inet.hr

Sažetak: *U radu je opisan MIG impulsni postupak zavarivanja nehrđajućih čelika, kroz opis glavnih obilježja postupka, opreme koja se koristi te načina i područja primjene.*

Ključne riječi: MIG impulsni postupak, zavarivanje, nehrđajući čelici

1. UVOD

Nehrđajući čelici se danas susreću svuda oko nas u širokoj primjeni, od industrije, domaćinstva, do dekorativnih elemenata u arhitekturi i umjetnosti, najviše zahvaljujući svojstvu antikorozivne postojanosti u dodiru s atmosferskim zrakom, vodom, kiselinama, lužinama, visokim ili niskim temperaturama. Povećana potrošnja na taj način generira i rast cijena nehrđajućih čelika, dijagram promjene cijena na tržištu EU u posljednjih godinu dana prikazan je na slijedećem dijagramu:



Antikorozivna postojanost se postiže odgovarajućim legiranjem čelika s kromom (Cr) i drugim legirajućim elementima kao nikel (Ni), molibden (Mo), titan (Ti), mangan (Mn), bakar (Cu) i dušik (N).

Ostvarenje antikorozivne postojanosti je utjecalo na neka druga svojstva nehrđajućih čelika, tako da su oni specifični i po pitanju manipulacije, obrade, zavarivanja i tretiranja nakon zavarivanja.

U ovom radu će se malo detaljnije obraditi samo jedan mali dio mogućih postupaka zavarivanja nehrđajućih čelika, MIG impulsno zavarivanje, o kojem je gotovo sve poznato, ali se u našem okruženju koristi vrlo malo.

2. NEHRĐAJUĆI ČELICI

2.1 Osnovna terminologija

Svaki čelik s minimalnim sadržajem iznad 10,5% kroma mogao bi se uvrstiti pod zajednički naziv "nehrđajući čelici".

Pri očvršćivanju, svaki čelik kristalizira u prostornoj strukturi određenoj elementima koje sadrži, pa se tako kod nehrđajućih čelika formiraju austenit, ferit i martenzit. Povezanost struktura i legirajućih elemenata definirana je Schaeffler-ovim dijagramom.

Nehrđajući čelici su definirani nacionalnim standardima (HRN, DIN, AISI,), a vjerojatno zbog utjecaja brodogradnje u našem se okruženju ustalila upotreba oznaka za nehrđajuće čelike prema američkom standardu AISI (**A**merican **I**ron and **S**teel **I**nstitute).

U literature se za nehrđajuće čelike koriste različiti nazivi ili skraćenice, pa su tako najčešće:

- INOX (od francuskog INOXidable – "neoksidirajući")
- NIROSTA® (od njemačkog Nicht Rostender Stahl – nehrđajući čelik)
- Ss=stainless (od engleskog "bez korozivskih mrlja")

2.2 Razlike između nehrđajućih i nelegirani čelika, važne za zavarivanje

Postoje značajne razlike između nehrđajućih i nelegiranih čelika u koeficijentu toplinskog širenja, toplinskoj vodljivosti i električkom otporu (vodljivosti), o čemu treba voditi računa prilikom konstruiranja sklopova i zavarivanja.

U priloženoj tabeli navedene su konkretne vrijednosti za ugljični čelik i tipični, često u upotrebi austenitni čelik AISI 304 (Č.4580 po HRN, X5CrNi 18 10 po DIN 17440):

	Ugljični čelik	AISI 304
Tipična boja	sivi-crna	srebrno-siva
Linearni koef. topl. širenja kod 20-800°C ($\times 10^{-6} \text{°C}^{-1}$)	13	20
Toplinska vodljivost kod 20-100°C (W/m°C)	47	16
El. otpor kod 20°C (nΩm)	150	700
Magnetičnost	da	ne

Iz ovih podataka se može zaključiti slijedeće:

- Koeficijent širenja je oko 50% veći kod nehrđajućeg čelika, što znači da kod zagrijavanja nastaju viša unutarnja naprezanja i laka krivljenja
- Koeficijent toplinske vodljivosti je oko 3 puta manji kod nehrđajućeg čelika, što znači da toplina dulje ostaje u zavarenom spoju i što može prouzročiti daljnje probleme
- Električki otpor kod nehrđajućeg čelika je preko 4 puta veći, što znači materijal više zagrijava i kod prolaza električne struje, a preneseno na dodatni materijal to znači da se žice i elektrode mogu manje strujno opteretiti za isti promjer.

3. POSTUPCI ZA ZAVARIVANJE NEHRĐAJUĆIH ČELIKA

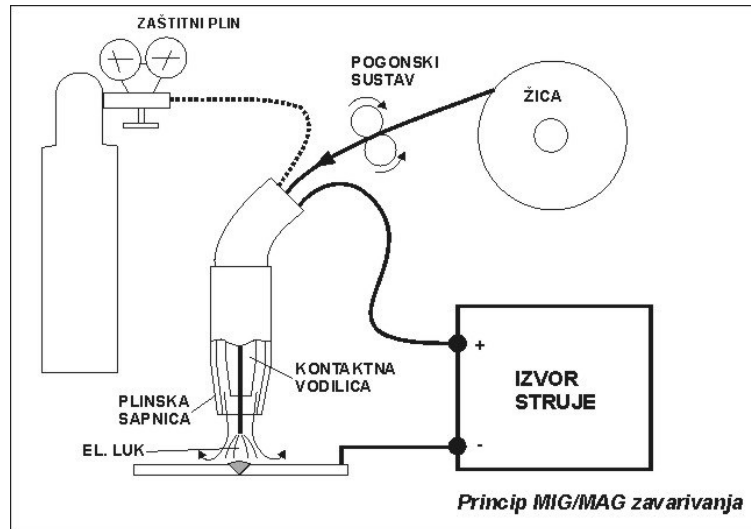
U našem okruženju najčešće se koriste nehrđajući čelici AISI 304 (Č.4580 po HRN, X5CrNi 18 10 po DIN 17440) i AISI 316 (Č.4573 po HRN, X5 CrNiMo 17 12 2 po DIN 17440). Oni se ubrajaju u dobro zavarljive austenitne čelike, za njih postoji širok izbor proizvođača dodatnih materijala i moguće je koristiti standardne postupke zavarivanja:

- a) Ručno elektrolučno obloženim elektrodama (REL, MMA)
- b) Netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina (TIG, WIG)
- c) Taljivom elektrodom (žicom) u zaštiti inertnog i aktivnog plina (MIG, MAG)
- d) Elektrolučno pod praškom (EPP, SAW, UP)

U daljnjem tekstu baviti ćemo se samo posebnom varijantom točke c), impulsnim MIG/MAG postupkom zavarivanja nehrđajućih čelika.

3.1 MIG/MAG zavarivanje

Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi plina (MIG/MAG) je postupak zavarivanja taljenjem, gdje se električki luk uspostavlja i održava između taljive žice i radnog komada koji se zavaruje.



Slika 1. Princip MIG/MAG postupka zavarivanja

Zbog utjecaja topline električkog luka, tali se žica (koja se dovodi konstantnom brzinom) i osnovni materijal na mjestu zavarivanja, čime se ostvaruje zavareni spoj. Proces se odvija u zaštitnoj atmosferi koju omogućuje plin ugljični dioksid (CO_2), argon (Ar) ili mješavine plinova. Ovim postupkom se mogu zavarivati svi komercijalno značajni materijali, kao npr. konstrukcijski čelici, nehrđajući čelici, vatrootporni čelici, aluminij i njegove legure, bakar i njegove legure, raznorodni metali itd. Postupak je izuzetno pogodan za mehanizaciju, automatizaciju i robotizaciju.

Jedna od važnih specifičnosti MIG/MAG postupka je mogućnost izbora (podešavanja) načina prijenosa metala kroz električki luk:

- Elektrolučno zavarivanje topljivom žicom u zaštiti aktivnog plina, kod kojeg se prijenos materijala vrši kratkim spojevima (short arc, kratki luk), oznaka MAGk
- Elektrolučno zavarivanje topljivom žicom u zaštiti aktivnog plina, kod kojeg se prijenos materijala vrši krupnim kapljicama uz pojavu kratkih spojeva (mixed arc, mješoviti luk), oznaka MAGi
- Elektrolučno zavarivanje topljivom žicom u zaštiti plina, kod kojeg se prijenos materijala vrši u štrcajućem mlazu, bez kratkih spojeva (spray arc, štrcajući luk), oznaka MIGs ili MAGs
- Elektrolučno zavarivanje topljivom žicom u zaštiti plina, kod kojeg se prijenos materijala vrši impulsno, kontroliranim preletom kapljica bez kratkih spojeva (pulsed arc, pulzirajući ili impulsni luk), oznaka MIGp ili MAGp.

Kod navođenja razlika između ugljičnih i nehrđajućih čelika već je napomenuto da veliko unošenje energije stvara probleme kod zavarivanja nehrđajućih čelika, što automatski navodi kao optimalan postupak MIG zavarivanje kratkim lukom, kod kojeg se zavaruje malim strujama i naponima. Ipak, baš zbog obaveznog kratkog spoja tu dolazi do neminovnog rasprskavanja

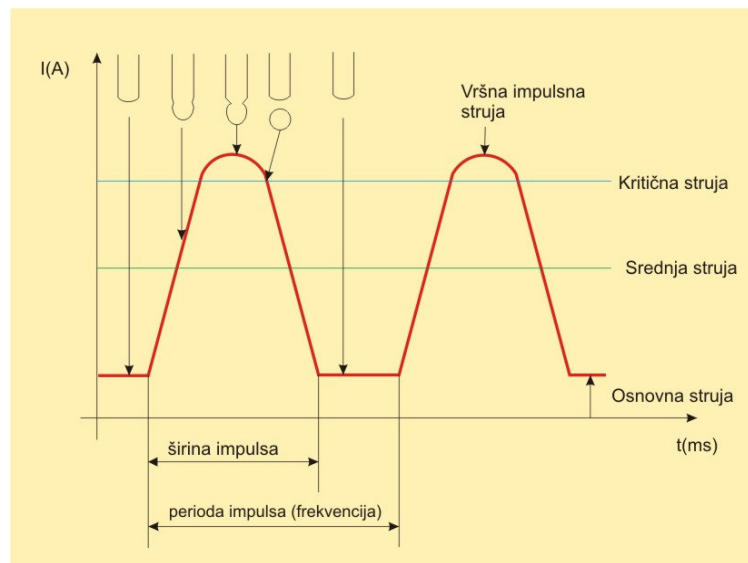
dodatnog materijala koje loše utječe na korozionu postojanost i povećava troškove naknadne obrade.

Sa stajališta mirnog prijenosa materijala optimalno bi bilo zavarivanje štrcajućim lukom (spray arc), kod kojeg praktički nema rasprskavanja, ali ovaj način zahtijeva velike struje, a naročito napone, što znači veliku energiju i eventualnu primjenu samo kod debljih materijala. Jedno od rješenja ovog problema je zavarivanje impulsnim lukom.

4. MIG IMPULSNI POSTUPAK

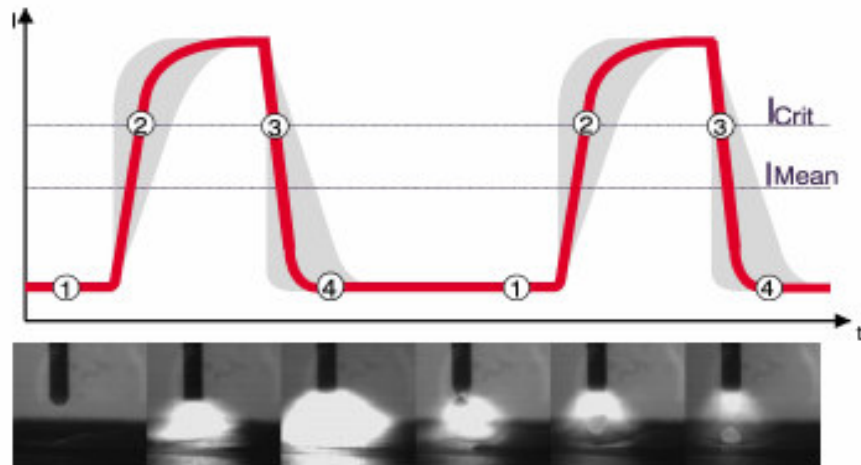
4.1 Opis postupka, prednosti i nedostaci

Kod ovog postupka izvor struje generira promjenljiv oblik struje (impuls), koji omogućava otkidanje samo jedne kapljice tijekom impulsa, a količina prijenosa materijala se regulira promjerom žice i brojem impulsa (frekvencijom).



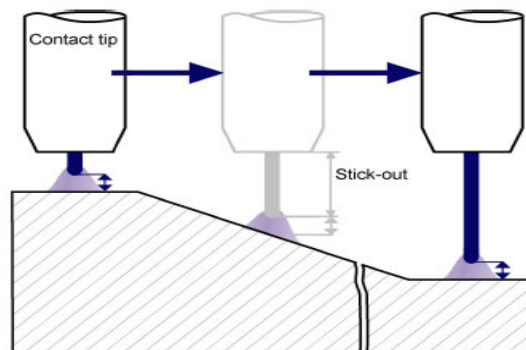
Slika 2. Grafički prikaz impulsnog postupka i načina otkidanja kapljice

Ovim načinom se osigurava stabilan i miran električni luk, praktički bez rasprskavanja. Daljnje mogućnosti razvoja postupka omogućili su digitalno upravljani tranzistorski izvori, kojima je moguće stvarati strujne impulse proizvoljnog oblika, što znači utjecati na način odvajanja i veličinu kapljice.



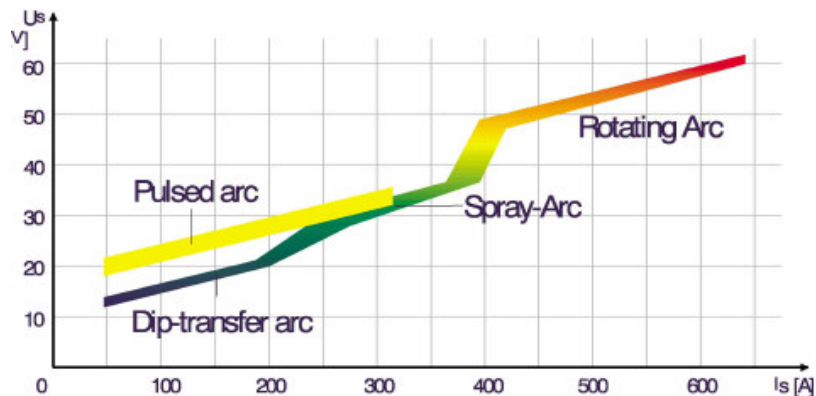
Slika 3. Mogućnosti podešavanja parametara impulsa radi postizanja optimalnog prijenosa kapljice (Fronius)

Pored toga, dobro podešena dinamika impulsnog luka osigurava i konstantnu dužinu luka, praktički neovisno o pokretima ruke zavarivača ili oblika predmeta rada.



Slika 4. Regulacija održava dužinu luka konstantnom

Analizirajući navedeno i dijagram koji prikazuje načine prijenosa metala u el. luku (u strujno naponskom području), mogu se navesti i osnovne prednosti postupka kod zavarivanja nehrđajućih čelika:



- proces se može potpuno kontrolirati u smislu stabilnosti parametara i unošenja energije
- zavarivanje bez rasprskavanja prenijeto je i u nisko područje parametara zavarivanja, što znači da se uspješno mogu zavarivati tanji limovi, ili zavarivati u prisilnim položajima debljim žicama, s boljim rezultatima nego kratkim lukom
- zavarivanje impulsnim lukom unutar područja štrcajućeg luka omogućava bolju penetraciju u materijal
- oblik zavara je konstantan (nadvišenje, širina, oblik)
- precizno odvajanje kapljice onemogućuje njihovo pregrijavanje čime se smanjuje i emisija dimova

Postupak ima i svoje nedostatke kao npr.:

- skuplji uređaji za zavarivanje
- općenito manja produktivnost u području velikih parametara u odnosu na štrcajući luk

4.2. Osnovni parametri kod impulsnog zavarivanja i njihov utjecaj

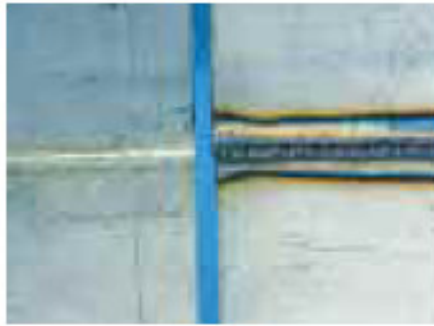
Postoji pet osnovnih parametara koji utječu na način i stabilnost prijenosa metala kroz električni luk kod impulsnog zavarivanja:

- Vršna impulsna struja, koja se određuje prema vrsti osnovnog materijala, promjera žice i mješavine zaštitnog plina. Obično se kreće u granicama 250-650A.
- Osnovna struja služi da onemogući gašenje luka nakon prestanka impulsa. Podešava se na što manju vrijednost i obično se kreće u granicama 20-50A. Veća struja povećava stabilnost, ali i unešenu energiju i dužinu luka
- Širina impulsa, odabire se tako da omogućí odvajanje samo jedne kapljice tijekom trajanja impulsa. Kreće se u granicama 1 – 3ms.
- Frekvencija je parametar koji ustvari predstavlja broj kapljica u sekundi, a odabire se tako da kod određene brzine žice odvajanje kapljica bude stabilno. Podešava se području od 20-300 Hz.
- Brzina žice je parametar kojim određujemo količinu istaljenog materijala i kojem je podređeno podešavanje ostalih parametara. Zavisno od promjera žice, kreće se u granicama od 2-15m/min.

Pored ovih parametara postoji još nekoliko korekcijskih faktora koji se moraju podesiti kako bi se osigurao potpuno stabilan lik i željeni način prijenosa materijala. Jasno je da zbog kompleksnosti nije moguće prepustiti zavarivaču podešavanje uređaja, pa moderni uređaji za to koriste programske, obično mikroprocesorske jedinice u kojima su pohranjeni podaci o pojedinim parametrima i njihovoj međusobnoj povezanosti u odnosu na materijal i zaštitni plin. Zavarivač nakon odabira ponuđene kombinacije materijala, promjera žice i zaštitnog plina postavlja samo jedan parametar (obično brzinu žice), a uređaj sve ostalo (impulsnu struju, širinu impulsa, osnovnu struju, frekvenciju, korekcijske faktore). Ovakav način sinhroniziranog podešavanja parametara u praksi je poznat kao SYNERGIC.

4.3. Zaštitni plinovi kod MIG impulsnog zavarivanja nehrđajućih čelika

Sa stajališta prijenosa materijala kroz el. luk, bilo bi najbolje koristiti čisti argon kao zaštitni plin. Međutim, radi osiguranja pravilnijeg izgleda zavara, veće penetracije, manje visine zavara, kao i postizanja veće brzine zavarivanja, koriste se mješavine. Uobičajeno je korištenje mješavina Ar+1-3% O₂, kao i Ar+2-5% CO₂ kao zaštitnog plina, dok se za zaštitu korijena od oksidacije uobičajeno koristi Ar.



Na lijevoj strani slike pokazan je zavar kojem je korijen tijekom zavarivanja štíćen argonom.

Na desnoj strani je prikazan zavar kojem korijen nije štíćen pa je oksidirao.

4.4. Dodatni materijali kod MIG impulsnog zavarivanja

Obzirom na proces, dodatni materijali standardno dolaze na tržište u obliku žica, punih ili punjenih, pakiranih na standardne kolute promjera 300mm, obično težine 12kg. Standardne dimenzije i strujna opteretivost punih žica za zavarivanje nehrđajućih čelika dana je u tablici:

Promjer žice (mm)	Srednji napon luka (V)	Srednja struja (A)
0,8	16-22	50-140
1,0	16-24	80-190
1,2	20-28	180-280
1,6	24-28	230-350

Iz navedenih podataka je vidljivo manja strujna opteretivost žice, radi većeg električnog otpora. Na tržištu postoji širok izbor žica za zavarivanje nehrđajućih čelika, odabiru se uglavnom prema sastavu materijala koji će se zavarivati i eksploatacijskim uvjetima konstrukcije koja se izrađuje.

5. UREĐAJI ZA MIG IMPULSNO ZAVARIVANJE

S klasičnim uređajima za MIG/MAG zavarivanje kakvi se većinom koriste u našim pogonima, impulsno zavarivanje nije moguće, dok svaki uređaj za MIG impulsno zavarivanje može dobro raditi i klasičnim MIG/MAG postupkom, a vjerojatno još i REL i TIG DC postupkom.

5.1 Tiristorski izvori struje

Minimum tehnološkog nivoa uređaja da bi uopće mogli razmišljati o nekoj vrsti impulsnog zavarivanja je tiristorska tehnologija. Ovi uređaji su bili prvi s kojima se je komercijalno zavarivalo impulsnim strujama, a koriste se i danas. Iako ograničenih mogućnosti (samo fiksna frekvencija od 50,100 i 150Hz i ograničenih mogućnosti podešavanja dimenzija impulsa), oni zbog relativno pristupačne cijene, pouzdanosti tiristorske tehnologije, i dobrih karakteristika zavarivanja nalaze upotrebu u proizvodnim pogonima u kojima se izrađuju konstrukcije od nehrđajućih čelika debljina 3-10mm.



Kod ovih uređaja se podešavanje parametara izvodi ručno, što podrazumijeva dobru obučenost zavarivača, kao i njegovo razumijevanje osnovnih principa MIG impulsnog načina zavarivanja. Kod ručnog podešavanja se uvijek koriste i neki iskustveni podaci koji se u obliku tablica stavljaju na raspolaganje zavarivaču.

Ovi uređaji dobro zavaruju i normalnim MIG postupkom, tako da im ta mogućnost malo i proširuje područje uporabe.

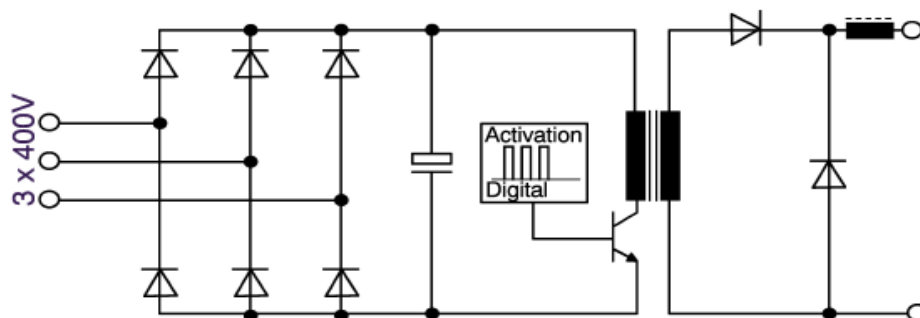
Širok opseg rada omogućuje odvojivi uređaj za dodavanje žice, a kod zavarivanja nehrđajućih čelika većim intenzitetom obvezna je uporaba gorionika hladnog rashladnom tekućinom.

Slika 5. Tiristorski upravljani izvor za MIG impulsno zavarivanje

5.2. Tranzistorski izvori struje

Prava primjena MIG impulsnog zavarivanja počela je početkom proizvodnje tranzistorski upravljanih izvora struje, prije nekih dvadesetak godina.

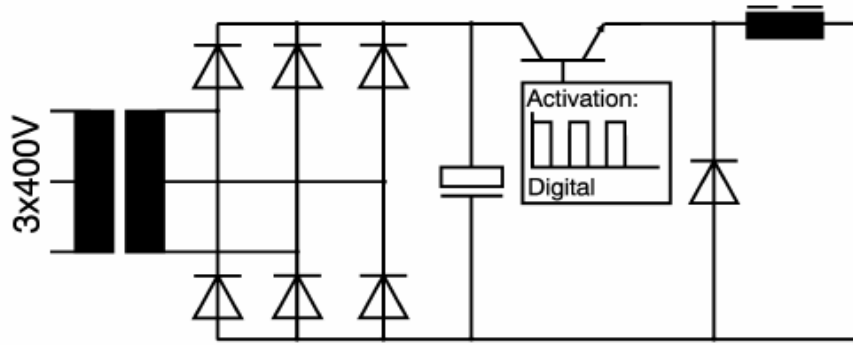
Postoje dva načina gradnje tranzistorskih izvora za zavarivanje, s tranzistorima na primarnoj ili sekundarnoj strani izvora:



Slika 6. Princip primarno upravljano tranzistorskog izvora (inverter)

Kod primarno upravljanoj izvora, konverzija energije se vrši na primarnoj strani gdje se ispravljena izmjenična struja ponovno pretvara u izmjeničnu, ali sada na frekvenciji 30-200kHz. Ova pretvorba omogućava drastično smanjenje dimenzija transformatora i težine uređaja, a ovakvi uređaji su poznatiji kao inverteri.

Transformirana visokofrekventna struja se ponovno ispravlja i koristi za zavarivanje.



Slika 7. Princip sekundarno upravljanoj tranzistorskoj izvora (chopper)

Sekundarno upravljani tranzistorski izvori (za zavarivanje) su se komercijalno pojavili tek unatrag nekoliko godina, jer to ranije nije bilo tehnološki moguće (nije bilo dovoljno snažnih tranzistorskih modula na tržištu). Ovdje se konverzija vrši na sekundarnoj strani, gdje se nalazi elektronička sklopka koja ispravljenu struju iz ispravljača pretvara u istosmjernu visokofrekventnu struju, frekvencije oko 20-40kHz, koja se onda koristi za zavarivanje.

Ova vrsta izvora ima istu težinu kao klasični izvor, ali uz dobre karakteristike upravljanja tranzistorskoj izvora.



Prema vanjskoj konstrukciji i koncepciji, tranzistorski izvori se ne razlikuju bitno od klasičnih uređaja, ako zanemarimo upravljačke panele.

Klasična koncepcija izvor struje, dodavač žice, vozno postolje, eventualno sustav za hlađenje gorionika i ovdje je zastupljena.

Ovdje se povećan radijus djelovanja također s mogućnošću odvajanja uređaja za dodavanje žice od izvora, a ponovno napominjemo obvezu korištenja gorionika hlađenog tekućinom kod impulsno zavarivanja.



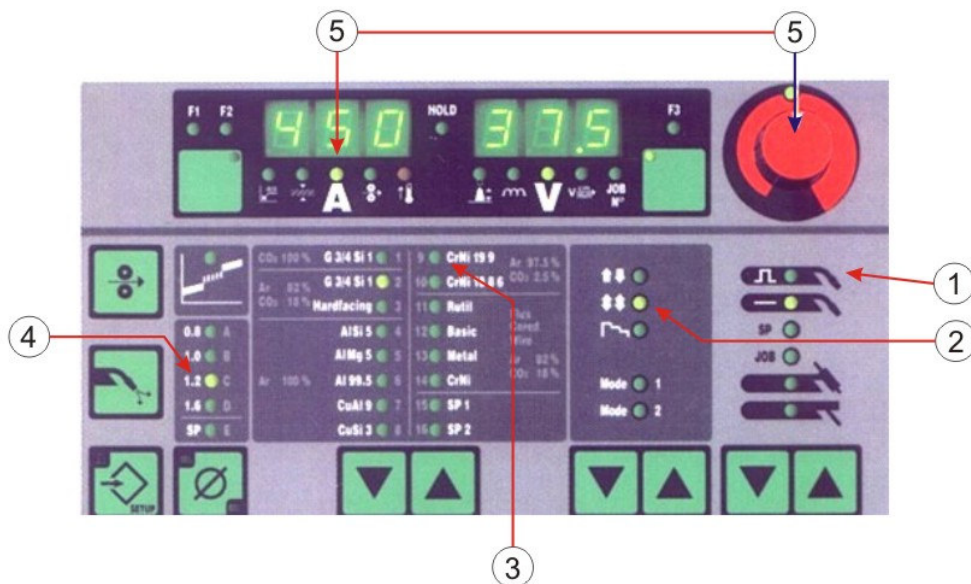
Zahvaljujući naprednoj invertorskoj tehnologiji moguće je proizvesti i veoma male i lagane uređaje koji su namijenjeni zavarivanju tanjih materijala.

Uređaj na slici ima svega 27kg i kompaktne je izvedbe, što znači da u istom kućištu sadrži izvor struje i uređaj za dodavanje žice, s prostorom za kolut s žicom D300(15kg).

Male dimenzije i težina omogućuju lako prenošenje ili promjenu mjesta zavarivanja

Uređaji za MIG impulsno zavarivanje obično imaju mogućnost zavarivanja više vrsta materijala, uz upotrebu više promjera žica i zaštitnih plinova, kao i rad s više postupaka.

Kako rad s takvim uređajem ne bi bio kompliciran, proizvođači uređaja su razvili razne načine komunikacije operatora s uređajem, jedan od upravljačkih panela prikazan je na slici 8.:



Slika 8. Upravljački panel



Iako na prvi pogled podešavanje izgleda komplicirano, zahvaljujući jasnim simbolima i tekstu ono je vrlo intuitivno.

Za podešavanje uređaja kod MIG impulsnog zavarivanja nehrđajućeg čelika, konkretan postupak bi bio slijedeći (brojke označavaju opisane korake):

1. Odaberemo impulsni postupak (svijetli dioda)
2. Odaberemo način rada uređaja (2T,4T, specijal, svijetli dioda)
3. Odaberemo vrstu dodatnog materijala (žice) kojim želimo raditi (npr. CrNi 19 9 koji je pogodan za zavarivanje čelika 304-308, svijetli dioda)
4. Odaberemo promjer žice koju koristimo (npr. 1,2mm, svijetli dioda)
5. Odaberemo snagu zavarivanja (prema struji, brzini žice, debljini materijala ili visini kutnog zavara), vrijednost se prikazuje na displeju
6. Otvorimo bocu sa zaštitnim plinom i podesimo protok na regulatoru (12-16l/min)
7. Započnemo zavarivanje. Uređaj odmah daje stabilan impulsni luk, a ukoliko je potrebno (snaga nam je mala ili prevelika), promjena snage se može vršiti i za vrijeme zavarivanja

Ovaj redoslijed odgovara praktički za podešavanje uređaja svih važnijih proizvođača uređaja za impulsno zavarivanje.

Kako je vidljivo iz panela, ovi uređaji omogućuju rad i klasičnim MIG/MAG postupkom, REL postupkom i TIG istosmjernom strujom (paljenje luka dodirrom). Time se povećava njihova primjenljivost i na neki način kompenzira relativno visoka cijena.

6. ZAKLJUČAK

MIG impulsno zavarivanje je visokoproduktivni postupak zavarivanja s najširoom primjenom kod zavarivanja nehrđajućih čelika. Mogućnost kvalitetnog zavarivanja materijala s kontrolom unosa energije praktički bez rasprskavanja, te odlične mogućnosti automatizacije, čine ga vrlo primjenljivim ali premalo zastupljenim postupkom u našem proizvodnom okruženju.