

6 ONEČIŠĆENJE KAPLJICAMA METALA - PRSKOTINE

Onečišćenje kapljicama metala ili prskotine smatraju se jednim od čestih zavarivačkih pogrešaka. To su kapljice koje su nastale u procesu rada kao produkt zavarivanja. One nisu završile na mjestu zavara, nego na zoni utjecaja topline ili u dodatnom materijalu.

Kod nelegirani čelika kad se to dogodi ne postoji bojazan da bi moglo utjecati na površinsku čvrstoću cjelokupne konstrukcije. To se smatra estetskom pogreškom. Što je dovoljan razlog da se na taj spoj utroši dodatno vrijeme za čišćenje u zadovoljavanju određenih kvaliteta i estetike. Veći problem stvaraju prskotine koje se nalaze na CrNi čelicima. One mogu dovesti do stvaranja početka korozije i smatraju se ozbiljnom tehničkom pogreškom. Predstavljaju najveći problem su za površinsku čvrstoću.

Početna korozija se vremenom povećava i uzrokuje smanjenje površinske čvrstoće te povećava mogućnost otkazivanja konstrukcije.

Mjesta gdje se nalaze raspršene kapljice metala treba nakon zavarivanja očistiti.

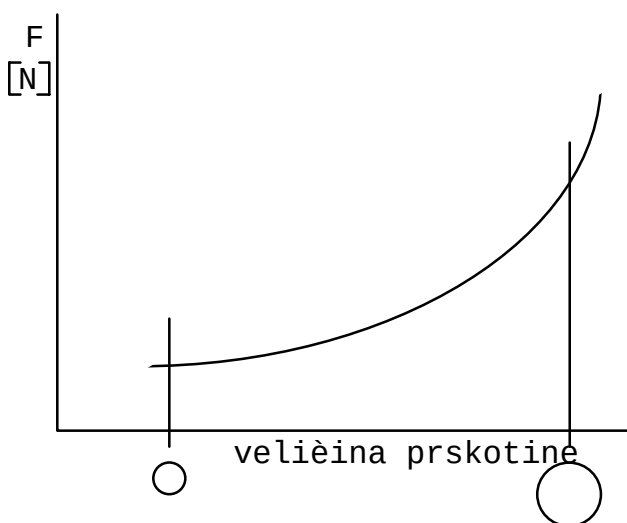
Postoji više načina čišćenja kao što su: skidanje ostrim alatima (tzv. čekićem), iza kojih ostaje zasječen materijal, brušenje, grubo brušenje polirani površina iza kojih ostaju urezi na materijalu, čišćenje običnom čeličnom četkom, podbrušavanjem, koje dovodi do smanjenja debljine zavara itd.

Čišćenje se najčešće obavlja struganjem a nakon struganja, kod nekih čelika (npr. CrNi i aluminija), potrebno je vršiti i poliranje. Čišćenje takvih mjesta stvara dodatna mehanička opterećenja na površini osnovnog metala ili zavara, što neminovno utječe na zavarenu konstrukciju.

Skidanje čestica ostrim alatima može se kvalitativno prikazati na dijagramu koji ovisi o sili koja je upotrijebljena za skidanje (uređaj za mjerenje se nalazi na samom alatu) i veličini prskotine koju treba skinuti.

Čišćenje površine je važno za kvalitetu zavarenog spoja.

Kvaliteta je skup karakteristika: mehanički svojstava, kemijski sastav, dimenzija, a ocjenjuje se na temelju mjerenja zahtijevanih karakteristika, koje se moraju nalaziti u propisanim granicama.



Slika 6.1 Shematski prikaz odnos upotrijebljene sile o veličini prskotine

Iz dijagrama je vidljivo da sa povećanjem veličine prskotine raste i sila koju treba uporabiti za njeno skidanje.

Dodatno čišćenje iziskuje utrošak vremena i sredstava. Vrijeme i sredstva nisu direktno vezani za zavarivanje te ekonomski znatno utječu na zavareni spoj.

Estetika je također jedan dio zbog kojeg se mora provesti čišćenje.

Uzroci koji povećavaju rasprskavanje kapljica metala tijekom postupka zavarivanja su:

- kod REL zavarivanja je predugačak električni luk, puhanje luka, pogrešan pol na elektrodi i prevelika struja zavarivanja koja preopterećuje elektrodu;
- kod MAG zavarivanja gdje su i najveća rasprskavanja uzrok je, kao i kod REL presjeka struja, zavarivanja i preveliki napon luka u odnosu na jačinu struje zavarivanja. Za to se kod MAG zavarivanja preporuča upotreba punjenih žica ili mješavine plina. Pri zavarivanju MAG postupkom s čistim CO₂ javlja se izraženije prskanje, a da bi se ono smanjilo preporuča se dodavanje kisika ili argona. Posebnu pozornost treba posvetiti parametrima zavarivanja, odnosno uvjetima koje oni trebaju ispuniti.

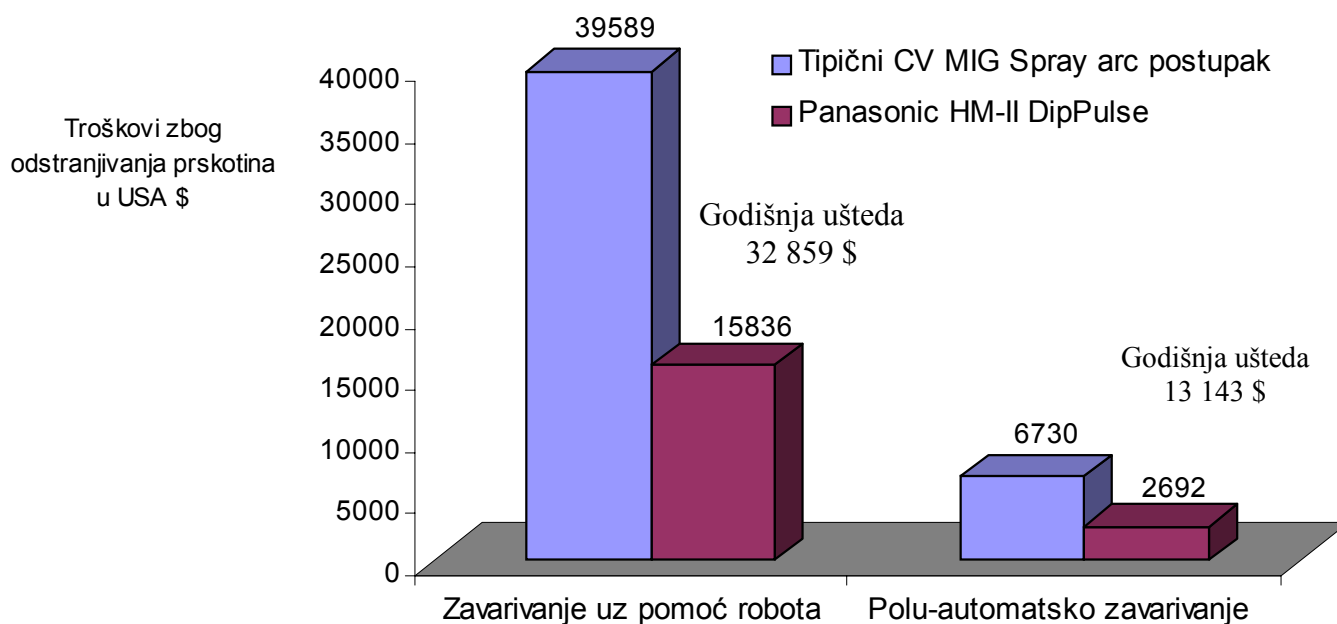
Gubitak materijala koji je prisutan kod rasprskavanja jedan je od razloga koji je privukao pozornost na ove pogreške pri zavarivanju. Na malom broju zavarenih komada gubitak materijala je neznatan i na to se dugo vremena nije obraćala pažnja. Međutim ispitivanja koja su provedena u SAD-u pokazala su potpuno suprotno. [6]

Ispitivanja koja su provedena u posljednji godinu dana govore da je ušteda u vremenu na novom umjetno inteligentnom kontroliranom stroju 98%, dok je ušteda na usporednom stroju bila samo 53% .

Prikazani dijagram nam govori o godišnjim uštedama u SAD dolarima zbog smanjenja udjela prskotina kod zavarivanja, kao i o troškovima zbog odstranjivanja prskotina.

Vidljivo je da su gubici znatni i da su opravdan razlog privlačenja veće pozornosti na sebe. Još jedan od razloga zašto treba obratiti veću pozornost na spomenute gubitke je zahtjev za kvalitetom zavarenog spoja i cijele konstrukcije.

Godišnje uštede zbog smanjenja udjela prskotina kod zavarivanja



Slika 6.2 Godišnje uštede zbog smanjenja udjela prskotina kod zavarivanja [6]

Na mekom čeliku zavar je napravljen s optimalnom kontrolom tradicionalnog izvora struje. Uspoređen je sa sličnim zavarenim komadom, koji je potpuno bez prskotina napravljenog Panasonic DipPulse procesom, koji se kontrolira pomoću umjetne inteligencije.

Stvaranje prskotina (g./min.) usporedba DipPulse procesa i konvencionalnog postupka:

Godišnja ušteda zbog redukcije prskotina za polu-automatsko i zavarivanje robotom, prikazana je na slici 6.2 Smanjeni troškovi izrade su rezultat redukcije prskotina zbog upotrebe DipPulse procesa.

6.1 TENDENCIJA ZAVARIVANJA U CILJU SMANJENJA PRSKOTINA

Uvođenje automatizacije zavarivanja u cilju veće produktivnosti tradicionalno je naglašavalo "hardware" kao što je strojna obrada i prijenos opreme. Činjenica da je brzina bilo koje zavarivačke operacije ograničena brzinom kojom strujni luk kod zavarivanja može obavljati svoju funkciju bila je razlog što se nije pozornost obraćala na gubitke izvora energije za zavarivanje. Maksimalna brzina luka je, prilikom bilo koje primjene, kontrolirana pomoću mnogo faktora, pa tako i samim izvorom energije.

Od 1950-tih i uvođenja prvog spray arc GMAW postupka zavarivanja, kojeg je pratio prijenos pomoću kratkog spoja i nakon toga pulsno GMWA zavarivanje, ključ uspješnog elektrolučnog zavarivanja je priroda električnog luka koji je kontroliran pomoću izvora struje. Uspoređivati današnje izvore struje i one napravljene tehnologijom koja se smatrala naprednom prije samo 10 godina je kao uspoređivati moćni laptop i električnu pisaću mašinu.

Sve MIG tehnike stvaraju luk plazme između neprekidno dovodene žice i kupke zavara. Žica se tali da bi osigurala dodatno ispunjavanje metala upotrebom dvije metode: direktnim kontaktom s kupkom, kao u slučaju prijenosa pomoću kratkog spoja, i prijenosom sprejem, pri kojem vrh žice formira male otopljene kapljice na tekućim nivoima iznad takozvanog "transition current". Kapljice se prenose preko luka u kupku zavara u neprekidnom toku. U pulsnom spray luku, kapljice se formiraju kada struja pulsira iznad prijenosa; u nižim nivoima, otvoreni luk se održava bez prijenosa metala.

6.1.1 Problemi

U prijenosu pomoću kratkog spoja, opskrbu energijom osigurava nisko-naponski DC izvor struje s dodanom induktivnosti da bi se ograničila amperaža kratkog spoja. Radi se o I^2R zagrijavanju žice i povlačenju topline iz kupke tokom žica – kupka kontakta, a koji je odgovoran za taljenje žice. Kupka se tako dovoljno hladi da omogući vertikalno zavarivanje i zavarivanje iznad glave, jer vrlo brzo dolazi do njenog skrućivanja.

Kod ovakvog zavarivanja, mogu se pojaviti pogreške u zavaru, posebno pri zavarivanju nekih drugih osim tanjih materijala, jer reducirana energija luka niske struje i niža temperatura kupke ograničavaju penetraciju u osnovni materijal. Osim toga, eksplozivna separacija žice od kupke zavara uzrokuje prskotine i nešto dima i para zbog oksidacije rastopljenog metala.

U “spray” prijenosu materijala otvoreni luk stvara značajnu količinu dima i para zbog količine rastaljene žice u ovom visokoproduktivnom procesu, a i zbog velike količine manjih kapljica povećava se površina i vrijeme leta kroz plin koji sprječava oksidaciju.

Uobičajeni cilj pri zavarivanju robotom je da se poveća brzina kretanja luka radi povećanja produktivnosti, obično pri “spray” transferu – prijenosu metala ili pri upotrebi metode kratkog spreja s visokom vrijednosti struje. Ipak, ovaj je cilj ograničen pri nekim aplikacijama, jer luk teži da “leti ispred” “skrutnjavajuće” kupke pri velikim brzinama kretanja. Tada se javlja nedovoljna penetracija korijena zavara zajedno s nezadovoljavajućim izgledom zavara i ruba zavara. Kao rezultat toga, potencijalno povećanje produktivnosti nije ostvareno.

6.1.2 Prva rješenja

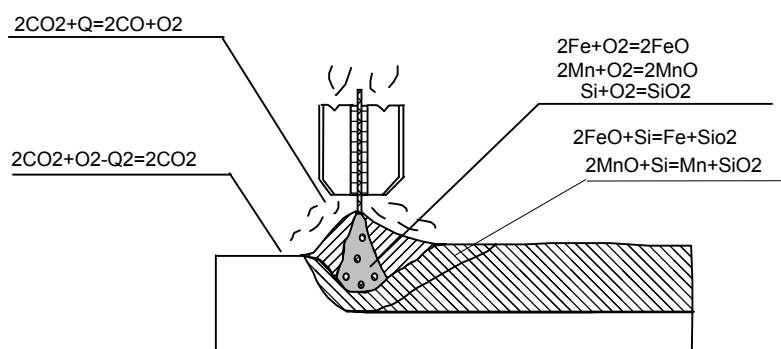
Nakon godina iskustva pri MIG zavarivanju, industrija je “izbacila” parametre koji se preporučavaju za promjer žice, struju i napon luka, i zaštitni plin za dobivene vrste legura i debljine materijala. Pojava izvora energije upravljanog mikroprocesorom 1980.-ih udružila je ove kombinacije s kompjutorskim čipovima, a rezultat je bio “izbor pomoću jednog dugmeta” (“one-knob” selection).

“Ipak, zahtjevi za kvelitetom i produktivnosti prvoklasnih zavara povećali su razumjevanje mikro-ponašanja luka kod zavarivanja”, prema Kevinu Pagano, rukovodiocu zavarenih proizvoda (welding product manager), Panasonic Factory Automation, Franklin Park, IL: “U svakom slučaju, zahtjevana ekonomičnost i kvaliteta su povezane s kontrolom luka pri zavarivanju. [2] Moderni strojevi s umjetnom inteligencijom (Artificial Inteligency) dokazuju da se set pravila može instalirati u stroj kako bi se kontrolirali izlazni struja i napon nakon unošenja dinamički promjenjivih upravljačkih podataka (dynamics operating data). Ako Artificial Inteligency izvor energije može dovoljno brzo reagirati, tada je moguće postići kontrolu prijenosa metala u realnom vremenu i realno utjecati na izvođenje zavarivanja. Raniji strojevi su se fokusirale na implementaciju tranzistora i električnih induktora da se poboljša izvedba. Danas je razvoj softwarea zajedno sa poznavanjem luka kod zavarivanja ono što je budućnost kontrole luka pri zavarivanju”.

Uvođenje automatizacije kod zavarivanja se vrši s ciljem veće produktivnosti. Brzina bilo koje zavarivačke operacije ograničena je brzinom kojom strujni luk može obavljati svoju funkciju, a ujedno to je bio i razlog zbog kojeg pozornost nije obraćana na gubitke izvora energije kod zavarivanja. Maksimalna brzina luka, prilikom bilo koje primjene, je kontrolirana pomoću mnogo faktora, pa tako i samim izvorom energije.

Uvođenjem prvog “spray arc” postupka zavarivanja, kojeg je pratio prijenos pomoću “kratkog spoja” i nakon toga “impulsnog zavarivanja”, su ključ uspješnog elektrolučnog

zavarivanja. Njegov način kontroliranja je pomoću izvora struje. Uspoređivati današnje izvore struje i one napravljene tehnologijom koja se smatrala naprednom prije samo 10 godina je nemoguće.



Slika 6.3 Prikaz kemijskih reakcija u pojedinim fazama prilikom zavarivanja

Kod zavarivanja MIG postupkom je karakteristično da se stvara luk plazme između neprekidno dovođene žice i kupke zavara. U tom postupku se žica tali, što je uvjet da se osigura dodatno ispunjavanje metala. Za taljenje žice upotrebljavaju se dvije metode:

- direktni kontakt s kupkom;
- “sprey transferom materijala”, pri kojem vrh žice formira male rastopljene kapljice, koje se neprekidno preko luka prenose u kupku zavara.

Postoje dva osnovna načina prijenosa metala u električnom luku, a to su prijenos metala slobodnim letom i prijenos metala premošćivanjem. Prijenos metala slobodnim letom može se ostvariti štrcajućim i impulsnim lukom, a prijenos metala premošćivanjem se ostvaruje kratkim i mješovitim lukom.

a) Prijenos metala kratkim lukom (short arc)

Kod prijenosa metala kratkim lukom kapljica se formira na vrhu elektrode i raste uz održanje luka sve dok se ne spoji s talinom na mjestu zavara. Tad nastaje kratki spoj, uslijed čega dolazi do prekida luka, napon trenutačno pada na nulu, a jakost struje se naglo povećava. Presjek žice se smanji, kapljica se otkida i ponovo se uspostavlja električni luk. Ako je porast struje brz, dolazi do pojave rasprskavanja, a ako je porast spor otežano je odvajanje kapljice od vrha elektrode, te se narušava stabilnost električnog luka.

Područje kratkog luka postiže se malim jakostima struje zavarivanja (50 - 170 A) i malim naponima luka (13 - 21 V). Zavarivanje kratkim lukom primjenjuje se za tanke limove, korijene zavara, te za zavarivanje u prisilnom položaju u zaštiti CO_2 i mješavina.

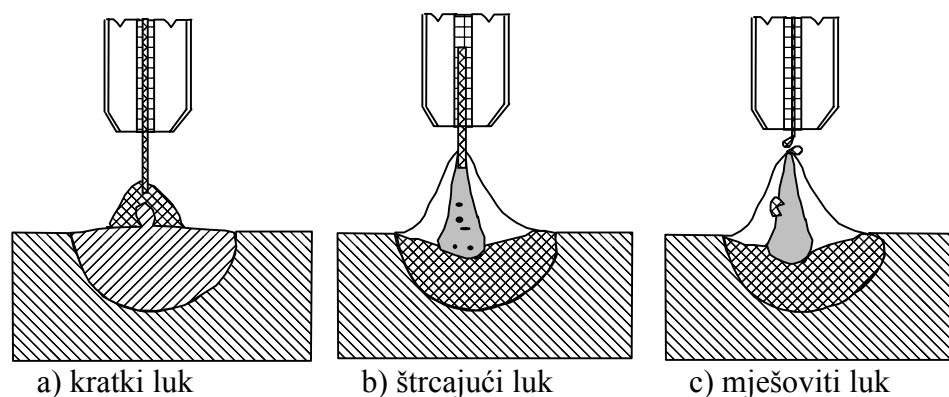
b) Prijenos metala štrcajućim lukom (spray arc)

Prijenos metala štrcajućim lukom karakterizira tanki mlaz sitnih kapljica metala pri čemu elektroda ni u jednom trenutku ne dolazi u dodir s talinom.

Područje štrcajućeg luka postiže se velikim jakostima struje zavarivanja (200-600 A) i naponima luka (25-40 V). Time se ostvaruju velika penetracija i velik unos topline, što je povoljno za zavarivanje debljih materijala, ali samo u vodoravnom položaju uz zaštitu argona i njegovih mješavina.

c) prijenos metala mješovitim lukom

Prijenos metala mješovitim lukom je kombinacija štrcajućeg i kratkog luka sa krupnijim kapljicama. Ovaj način prijenosa metala se izbjegava.



Slika 6.4 Shematski prikaz prijenosa metala različitim lukovima

U prijenosu pomoću kratkog spoja, opskrbu energijom osigurava nisko-naponski DC izvora struje s dodanom induktivnosti da bi se ograničila amperaža kratkog spoja. Radi se o I^2R zagrijavanju žice i povlačenju topline iz kupke tokom kontakta žica – kupka, a koji je odgovoran za taljenje žice.

$$\Delta I^2 \cdot R \cdot t = Q$$

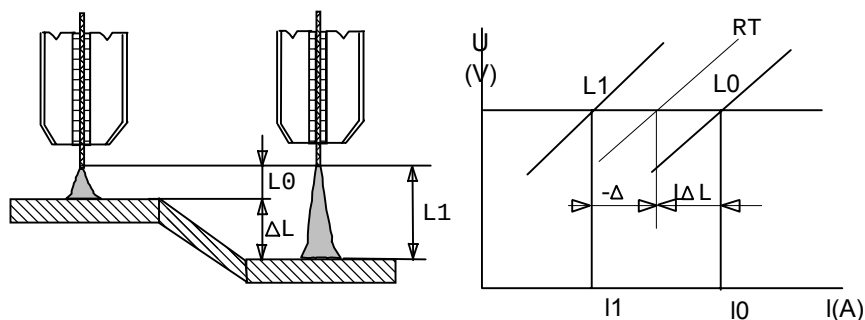
Q – manji – sporije se žica tali,

Q – veći – brže se žica tali.

Kupka se tako dovoljno hladi da omogući vertikalno i nadglavno zavarivanje, jer vrlo brzo dolazi do njenog skrućivanja.

Duljina slobodnog kraja žice se smatra ona duljina koja se nalazi izvan kontaktne cjevčice pištolja za zavarivanje, a sama duljina žice ovisi o udaljenosti od mjesta zavarivanja.

Na sljedećoj slici je prikazana ovisnost duljine luka o automatskoj regulaciji.



Slika 6.5 Automatska regulacija duljine luka

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}, (\Omega)$$

$$I = \frac{U}{R}, (A)$$

gdje su:

U - napon struje zavarivanja, (V)

I - jakost struje zavarivanja, (A)

R - otpor struje zavarivanja, (Ω)

ρ - specifični otpor, ($\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$)

l - duljina vodiča, (m)

A - površina presjeka vodiča, (mm^2)

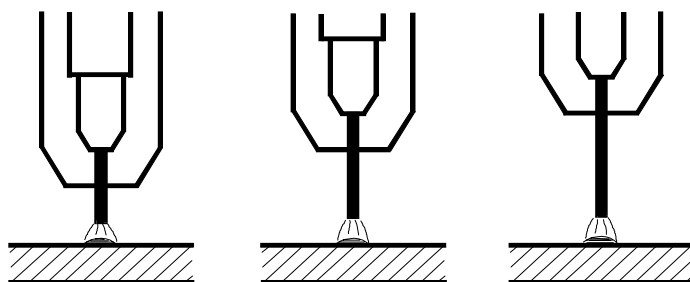
Ako se slobodni kraj žice poveća pri konstantnoj brzini dovođenja, automatski uzrokuje smanjuje se jakost struje zavarivanja. Da bi vrijednost jakosti struje zavarivanja ostala konstantna, brzina dovođenja žice mora rasti, što u procesu zavarivanja osigurava regulator. Kod ovakvog zavarivanja, mogu se pojaviti greške u zavaru, posebno pri zavarivanju tanjih metala. Tu je još karakteristično da eksplozivna separacija žice od kupke zavara uzrokuje **prskotine** dim i paru zbog oksidacije otopljenog metala.

Zahtjevnost ekonomičnost i kvaliteta su povezane s kontrolom luka pri zavarivanju. Ono što će se u budućnosti upotrebljavati za kontrolu luka pri zavarivanju, kao jednog od najbitniji segmenata pri zavarivanju, je dobro poznavanje luka zajedno sa razvojem softwarea.

U spray transferu materijala otvoreni luk stvara značajnu količinu dima i para zbog količine rastaljene žice u ovom visokoproduktivnom procesu, a i zbog velike količine manjih kapljica povećava se površina i vrijeme leta kroz plin koji sprječava oksidaciju.

Uobičajeni cilj pri zavarivanju robotom je da se poveća brzina kretanja luka radi povećanja produktivnosti, obično pri metodi spreja ili pri upotrebi metode kratkog spoja s visokom vrijednosti struje. Ipak, ovaj je cilj ograničen pri nekim aplikacijama, jer luk teži da "leti ispred" "skrutnjavajuće" kupke pri velikim brzinama kretanja. Tada se javlja nedovoljna penetracija korijena zavara zajedno s nezadovoljavajućim izgledom zavara i ruba zavara. Kao rezultat toga, potencijalno povećanje produktivnosti nije ostvareno.

Duljina slobodnog kraja žice izravno utječe na produktivnost kroz povećanje ili smanjenje brzine dovođenja, to se najbolje vidi iz slike 6.6



Razmak između kontrolne cjevčice i radnog komada, (mm)	10	18	25
Brzina dovođenja žice, (cm/min)	8	9,5	11
Jakost struje zavarivanja, (A)	300	300	300
Količina nataljenog materijala, (kg/h)	4,2	5,0	5,8

Slika 6.6 Utjecaj duljine slobodnog kraja žice na količinu nataljenog materijala kod iste jakosti struje zavarivanja [2]

Nakon godina iskustva u zavarivanju industrija je razvila parametre koji se preporučuju za promjer žice, struju i napon luka, kao i za zaštitni plin za dobivene vrste legura i debljine materijala.

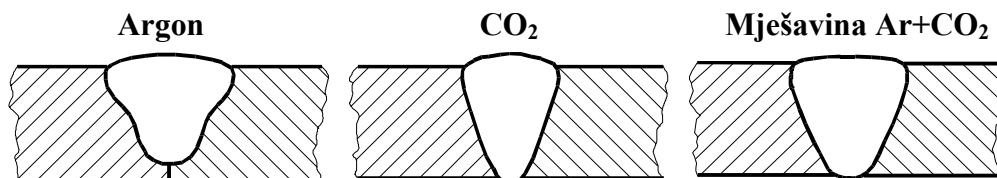
6.1.3 Izbor optimalne brzine zavarivanja

Za, zavarivanje s velikom količinom depozita i visokom amperažom, krajnji korisnik mora uzeti u obzir mnoge faktora pri odabiru brzine zavarivanja. Ovo uključuje dodatni materijal, zaštitni plin, i oblik penetracije. Poznavanje utjecaja zaštitnog plina je neophodno za procjenu njegovog djelovanja na:

- fizikalno-električna svojstva električnog luka, odnosno prijenos metala sa elektrode na radni komad i
- tehnološke parametre.

Tipični izbor zaštitnog plina u visokoproduktivnom/brzom MIG zavarivanju je klasični: mješavina argon-kisik. Ova se mješavina često izabire, jer radi na nižim naponima i zbog toga uzrokuje manje dima i minimalizira penetraciju u pulsnom obliku zavarivanja metalnih limova.

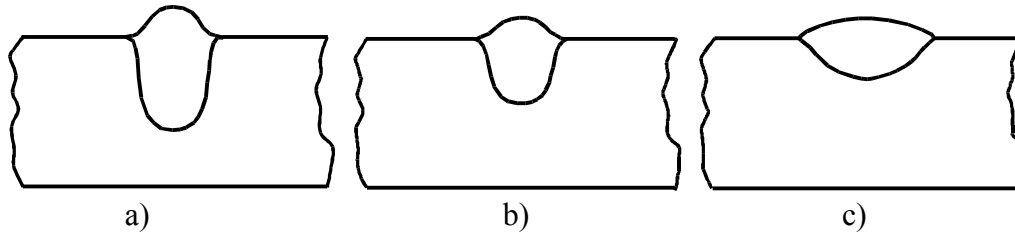
Viši sadržaj CO_2 povećava tendenciju kratkom spoju, koji tipični izvor energije ne može podnijeti. Ako se usporede najčešće uporabljivani plinovi, može se uočiti da argon (Ar), koji ima nisku toplinsku vodljivost, daje usku zonu jezgre luka za razliku od ugljičnog dioksida (CO_2), koji ima veću toplinsku vodljivost i prema tome daje širu jezgru luka. Ova se svojstva nadalje odražavaju na dubinu protaljivanja i izgled zavora.



Slika 6.7 Izgled zavora u ovisnosti o primijenjenom zaštitnom plinu

Količina zaštitnog plina se određuje prema jakosti struje zavarivanja, promjeru žice, obliku spoja, te mjestu i uvjetima rada. U procesu zavarivanja strogo treba voditi računa o količini zaštitnog plina jer ona ima direktan utjecaj na kakvoću zavora.

Ipak, pri zavarivanju s visokom strujom i velikom količinom depozita sadržaj vodika može uzrokovati šiljati, duboko penetrirani korijen. Napon na električnom luku utječe na dubinu protaljivanja, širinu i nadvišenje zavora i može se poistovjetiti sa duljinom luka pa tako većem naponu električnog luka odgovara veća duljina luka. Na slici je prikazan utjecaj napona električnog luka na protaljivanje i širinu zavora uz istu jakost struje u području štrcajućeg luka.



Slika 6.8 *Utjecaj napona luka na protaljivanje i širinu zavora pri istim jakostima struje u području štrcajućeg luka*
(a-niski napon, b-srednji napon, c-visoki napon)

Iz slike je vidljivo da viši napon uz istu struju zavarivanja daje manju dubinu protaljivanja i veću širinu zavora (ljepši zavar). Previsok napon luka uzrokuje povećano rasprskavanje kapljica rastaljenog metala zavora. Prevelika duljina luka smanjuje zaštitu metalnih kapljica u prijelazu i loše utječe na svojstva zavarenog spoja.

Ovo se lako može usporediti sa širokim oblikom korijena kod CO_2 , koji daje konzistentniji oblik penetracije.

Kod nedostatne brzine zavarivanja veći je unos topline, a time je i veća količina rastaljenog materijala, zbog čega dolazi do bježanja taline ispred električnog luka na hladnom materijalu, što uzrokuje pojavu pogreške naljepljivanja.

Pri prevelikoj brzini zavarivanja dolazi do rasipanja energije po većoj površini, uslijed čega je protaljivanje slabo i dolazi do pojave zareza, a zavar je uzak i nadvišen.

Optimalna brzina se određuje u skladu sa drugim parametrima zavarivanja.