

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Kristijan Jurgec**

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Zoran Kožuh

Student:

Kristijan Jurgec

Zagreb, 2017.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Kristijan Jurgec

*Zahvaljujem se prof. dr. sc. Zoranu Kožuhu na pruženom povjerenju, stručnim savjetima strpljenju i pomoći u izradi ovog rada.*

*Također se zahvaljujem Ivanu Juriću, mag. ing. mech. na konstantnoj pomoći i korisnim savjetima pri realizaciji ovog završnog rada bez čije pomoći bi njegova izrada bila znatno teža.*



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student:

**KRISTIJAN JURGEČ**

Mat. br.: 0035193774

Naslov rada na  
hrvatskom jeziku:

**ANALIZA DINAMIČKE KARAKTERISTIKE IZVORA STRUJE PRI  
MAG ZAVARIVANJU**

Naslov rada na  
engleskom jeziku:

**DYNAMIC CHARACTERISTIC ANALYSIS OF POWER SOURCE  
AT MAG WELDING**

Opis zadatka:

Opisati postupak MAG zavarivanja s posebnim naglaskom na izvore struje za zavarivanje. Dati pregled zaštitnih plinova koji se koriste pri MAG zavarivanju i detaljno obraditi trokomponentne plinske mješavine argona, ugljičnog dioksida i kisika. Navesti moguće prijenose metala u električnom luku zajedno s karakterističnim parametrima koji ih definiraju, kao i odgovarajuće kombinacije zaštitnih plinova. Opisati proces snimanja dinamičke karakteristike izvora struje, potrebnu opremu kao i svrhu primjene.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je spojiti svu potrebnu mjernu opremu za snimanje dinamičke karakteristike odabranog izvora struje. Snimiti i analizirati dinamičke karakteristike za različite načine prijenosa metala kao i zaštitne plinske mješavine. Dobivene oscilogramе potrebno je analizirati sa stanovišta primjene trokomponentnih plinskih mješavina s postojećim izvorima struje za zavarivanje i tvornički definiranim sinergijskim krivuljama. Na kraju, dati mišljenje o pogodnosti korištenja postojećih sinergijskih krivulja pri MAG zavarivanju s trokomponentnim plinskim mješavinama.

Zadatak zadan:

30. studenog 2016.

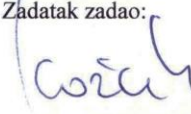
Rok predaje rada:

**1. rok:** 24. veljače 2017.  
**2. rok (izvanredni):** 28. lipnja 2017.  
**3. rok:** 22. rujna 2017.

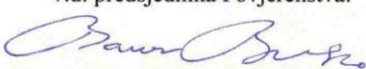
Predviđeni datumi obrane:

**1. rok:** 27.2. - 03.03. 2017.  
**2. rok (izvanredni):** 30. 06. 2017.  
**3. rok:** 25.9. - 29. 09. 2017.

Zadatak zadao:

  
Prof.dr.sc. Zoran Kožuh

v.d. predsjednika Povjerenstva:

  
Izv. prof. dr. sc. Branko Bauer

## SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. MAG ZAVARIVANJE .....	2
2.1. Oprema za MAG zavarivanje .....	3
2.1.1. Značaj gubitaka u kabelu .....	4
2.1.2. Brzina zavarivanja.....	4
2.2. Pregled statičkih i dinamičkih karakteristika izvora napajanja.....	6
2.2.1. Statičke karakteristike izvora napajanja.....	6
2.2.2. Dinamičke karakteristike izvora napajanja .....	7
2.3. Sile koje djeluju na prijenos materijala.....	10
2.4. Načini prijenosa metala u električnom luku kod MAG zavarivanja.....	12
2.4.1. Prijenos metala kratkim spojevima (engl. short-circuit transfer).....	12
2.4.2. Prijenos metala štrcajućim lukom (engl. spray transfer).....	13
2.4.3. Prijenos metala mješovitim električnim lukom (engl. Globular transfer) .....	14
2.4.4. Prijenos metala impulsnim strujama .....	15
2.4.5. Controlled Bridge Transfer (CBT).....	16
2.5. Pregled zaštitnih plinova koji se koriste pri MAG zavarivanju .....	19
2.5.2. Osnovna svojstva najkorištenijih zaštitnih plinova.....	23
2.5.3. Dvokomponentne plinske mješavine .....	25
2.5.4. Trokomponentne plinske mješavine argona, ugljikovog dioksida i kisika .....	27
2.6. Poroznost – najčešći tip pogreške kod MAG zavarivanja .....	28
2.7. Unos topline u zavar .....	30
2.8. Predgrijavanje osnovnog materijala.....	31
3. EKSPERIMENTALNI DIO .....	32
3.1. Izvor struje za zavarivanje Welbee P500L.....	32
3.2. Tektronix TDS 210 .....	34
3.3. Modularni sustav pogona MDS – 1002 .....	36
3.4. Strujna kliješta.....	38
3.5. Zaštitni plin C18.....	39
3.6. Zaštitni plin C12X2.....	39
3.7. Zaštitni plin C6X1.....	40
3.8. Dodatni materijal.....	41
3.9. Eksperimentalni dio rezultati .....	43
3.9.1. C18 zaštitna plinska mješavina .....	44
3.9.2. C6X1 zaštitna plinska mješavina .....	48
3.9.3. C12X2 zaštitna plinska mješavina .....	52
4. ZAKLJUČAK.....	56

## POPIS SLIKA

Slika 2.1	MAG zavarivanje .....	2
Slika 2.2	Oprema kod MAG zavarivanja [1].....	3
Slika 2.3	Utjecaj brzine zavarivanja na protaljivanje, širinu i oblik zavara .....	4
Slika 2.4	Pad napona na vodiču ovisan o duljini i struji zavarivanja kod .....	5
Slika 2.5	Statička karakteristika izvora struje uz održavanje konstantnog napona prilikom MAG zavarivanja [1].....	7
Slika 2.6	Utjecaj induktiviteta na uspon i silaz električnog impulsa [5] .....	8
Slika 2.7	Trofazni fazno upravljivi tiristorski ispravljač u mosnom spoju [6].....	8
Slika 2.8	Izlaz napona i struje trofaznog fazno upravljivog tiristorskog ispravljača u mosnom spoju [6].....	9
Slika 2.9	Prikaz djelovanja sila na kapljicu metala u električnom luku [17] .....	10
Slika 2.10	Ciklus prijenosa materijala kratkim spojem [7] .....	13
Slika 2.11	Prijenos metala štrcajućim lukom [2].....	14
Slika 2.12	Prijenos metala mješovitim lukom [2] .....	15
Slika 2.13	Pulsirajuće struje [2].....	16
Slika 2.14	Princip rada CBT metode zavarivanja [10] .....	17
Slika 2.15	Uvjet predviđanja uspostave električnog luka [13].....	18
Slika 2.16	Utjecaj odabira zaštitnog plina kod MAG zavarivanja [8].....	20
Slika 2.17	Ovisnost toplinske vodljivosti plinova o temperaturi [15].....	21
Slika 2.18	Moguće kemijske reakcije kod MAG zavarivanja s CO <sub>2</sub> kao zaštitnim plinom [15] .....	23
Slika 2.19	Razlike u penetraciji kod dvokomponentnih plinskih mješavina [2] .....	26
Slika 2.20	Pore jednako raspoređene u metalu zavara [11].....	28
Slika 2.21	Površinske pore[11].....	29
Slika 2.22	Utjecaj unesene topline na brzinu ohlađivanja [14] .....	30
Slika 2.23	Ovisnost temperature predgrijavanja i unosa topline zavarivanja.....	31
Slika 3.1	Welbee P500L izvor struje za zavarivanje .....	33
Slika 3.2	Tetronix TDS 210 dvokanalni osciloskop.....	34
Slika 3.3	Shema spoja osciloskopa, izvora struje i računala .....	35
Slika 3.4	Modularni sustav pogona MDS – 1002.....	36
Slika 3.5	Kontrolna ploča MDS -1002 modularnog sustava za zavarivanje .....	36
Slika 3.6	Kontrolna ploča MDS -1002 modularnog sustava za zavarivanje .....	37
Slika 3.7	Strujna kliješta PR-1030.....	38
Slika 3.8	Spremnik C18 Ferroline zaštitnog plina.....	39
Slika 3.9	Spremnik Ferroline C12X12 zaštitnog plina.....	40
Slika 3.10	Spremnik C6X1 zaštitnog plina .....	40
Slika 3.11	Kolut SG2 pobakrene žice.....	41
Slika 3.12	Specifikacije SG2 dodatnog materijala korištenog u eksperimentu.....	42
Slika 3.13	Oscilogram prikazuje vrijednosti jakosti i napona struje tijekom CBT prijenosa metala u zaštiti C18 plinske mješavine .....	44
Slika 3.14	Oscilogram prikazuje vrijednosti jakosti i napona struje tijekom prijenosa metala štrcajućim lukom u zaštiti C18 plinske mješavine .....	45
Slika 3.15	Oscilogram prikazuje vrijednosti jakosti i napona struje tijekom prijenosa metala kratkim spojevima u električnim lukom u zaštiti C18 plinske mješavine.....	46
Slika 3.16	Oscilogram prikazuje vrijednosti jakosti i napona struje tijekom prijenosa metala mješovitim električnim lukom u zaštiti C18 plinske mješavine.....	47

Slika 3.17	Oscilogram prikazuje vrijednosti jakosti i napona struje tijekom CBT prijenosa metala u zaštiti C6X1 plinske mješavine .....	48
Slika 3.18	Oscilogram prikazuje vrijednosti jakosti i napona struje tijekom prijenosa metala mješovitim prijenosom u zaštiti C6X1 plinske mješavine .....	49
Slika 3.19	Oscilogram prikazuje vrijednosti jakosti i napona struje tijekom prijenosa metala štrcajućim lukom u zaštiti C6X1 plinske mješavine .....	50
Slika 3.20	Oscilogram prikazuje vrijednosti jakosti i napona struje tijekom prijenosa metala kratkim spojevima električnim lukom u zaštiti C6X1 plinske mješavine.....	51
Slika 3.21	Oscilogram prikazuje vrijednosti jakosti i napona struje tijekom prijenosa metala CBT načinom prijenosa u zaštiti C12X2 plinske mješavine .....	52
Slika 3.22	Oscilogram prikazuje vrijednosti jakosti i napona struje tijekom prijenosa metala štrcajućim lukom u zaštiti C12X2 plinske mješavine .....	53
Slika 3.23	Oscilogram prikazuje vrijednosti jakosti i napona struje tijekom prijenosa metala kratkim spojevima električnim lukom u zaštiti C12X2 plinske mješavine.....	54
Slika 3.24	Oscilogram prikazuje vrijednosti jakosti i napona struje tijekom prijenosa metala mješovitim električnim lukom u zaštiti C12X2 plinske mješavine.....	55



**POPIS TABLICA**

Tablica 2.1 Plinovi i plinske mješavine prema normi HR EN ISO 14175:2008 .....	19
Tablica 2.2 Osnovna svojstva zaštitnih plinova [2] .....	20
Tablica 2.3 Svojstva osnovnih zaštitnih plinova kod MAG zavarivanja prema normi HR EN ISO 14175:2008 .....	22
Tablica 2.4.1 Dvokomponentne plinske mješavine i njihovo područje primjene [2] .....	25
Tablica 3.1 Specifikacije P500L izvora struje za zavarivanje.....	32
Tablica 3.2 Brzine zavarivanja u ovisnosti o zaštitnom plinu i načinu prijenosa materijala .	43

**POPIS OZNAKA**

Kratica	Hrvatski	Engleski
AC	Izmjenična struja	Alternating current
Ar	Argon	Argon
CO	Ugljikov monoksid	Carbon monoxide
CO <sub>2</sub>	Ugljikov dioksid	Carbon dioxide
DC	Istosmjerna struja	Direct current
engl	Engleski	English
He	Helij	Helium
MAG	Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom uz zaštitu aktivnim plinom	Metal active gas
MIG	Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom uz zaštitu inertnim plinom	Metal inert Gas
TIG	Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom uz zaštitu inertnim plinom	Tungsten Inert Gas
O <sub>2</sub>	Kisik	Oxygen

## **SAŽETAK**

Tema ovog završnog rada je „Analiza dinamičke karakteristike izvora struje pri MAG zavarivanju“. Sastoji se od teoretskog i praktičnog dijela.

U početnom, teoretskom dijelu, opisan je MAG postupak zavarivanja. Analiziran je princip rada, opisane su dinamičke karakteristike te načini prijenosa metala u električnom luku pri MAG zavarivanju. Obrađeni su zaštitni plinovi koji se koriste pri MAG zavarivanju.

U eksperimentalnom dijelu rada provedena su mjerenja struje i napona u vremenu u ovisnosti o načinu prijenosa materijala i vrsti zaštitnog plina prilikom MAG zavarivanja. Dobiveni rezultati u suglasnosti su s teorijskim pretpostavkama uz zanemarive razlike koje postoje zbog korištenja realne opreme i nesavršenih uvjeta što se teoriji često zanemaruje.

**Ključne riječi:** MAG zavarivanje, dinamičke karakteristike, prijenos metala, trokomponentne plinske mješavine

**ABSTRACT**

This paper provides analysis of dynamic properties of current sources at MAG welding. The paper consists of theoretical and practical part. In the first, theoretical part, MAG welding process is analysed through work principles, dynamic characteristic, methods of metal transfer and protective gas used.

In this experiment there were performed measurement of current and voltage waveforms during welding with different combinations of transfer types and shielding gas. The obtained results are supported with the theoretical assumptions with minor differences caused by imperfections in the real equipment and imperfect conditions which the theory often neglects.

**Keywords:** MAG welding, dynamic characteristics, power supplies, metal transfer, ternary mixtures

## **1. UVOD**

Postupak zavarivanja je korišten u mnogim proizvodnim procesima i zbog njegove široke primjene u industriji postoji sve veća potreba za njegovim kontinuiranim poboljšanjem kako bi se smanjili troškovi proizvodnje i povećala kvaliteta krajnjih proizvoda. Provode se mnoga istraživanja kako bi se poboljšala kvaliteta i povećala ekonomičnost zavarenih konstrukcija.

Napredak u tehnologiji poput mikroprocesorski upravljanih izvora struje koji pomoću predefiniranog algoritma reguliraju prijenos metala u električnom luku osiguravaju stabilnost postupka i omogućavaju nove, modificirane načine prijenosa metala električnim lukom koji konvencionalnim izvorima struje i postupcima nisu mogući.

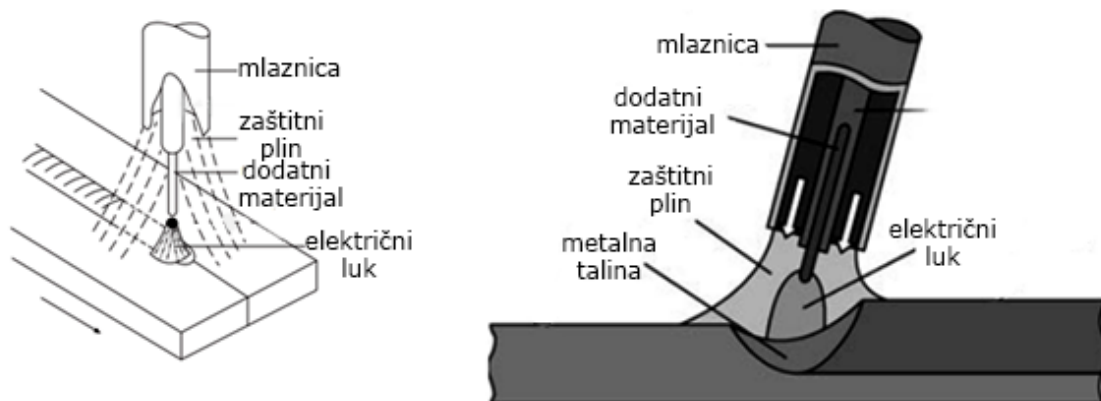
Razvojem postupka zavarivanja olakšava se zavarivanje tankih limova, smanjuju se deformacije zbog mogućnosti kontroliranja unosa topline i omogućava se spajanje velikog broja poznatih materijala i postiže poboljšana penetracija.

U ovom radu dan je pregled elektrolučnog zavarivanja metalnom taljivom elektrodom u kombinaciji sa zaštitnim plinom (MAG postupak zavarivanja). Promatraju se osnovni načini prijenosa materijala jer se njihovom modifikacijom dolazi do modernijih i naprednijih prijenosa metala koji daju puno veću kvalitetu spoja.

Također je dan pregled zaštitnih plinova koji se koriste kod MAG postupka zavarivanja kao i pregled osnovne opreme s naglaskom na svojstva izvora struje kod postupka zavarivanja.

## 2. MAG ZAVARIVANJE

MAG zavarivanje je postupak elektrolučnog zavarivanja taljivom žicom u zaštiti plina. Sastoji se od stalnog dovođenja gole žice (elektrode), a zavareni spoj je od zagađenja štićen aktivnim zaštitnim plinom.



Slika 2.1 MAG zavarivanje

Električni luk se održava između taljive elektrodne žice i radnog komada pri čemu je elektrodna žica dodavana konstantnom brzinom pomoću pogonskog sustava.

Zaštitni plin je aktivan. Svrha zaštitnog plina je da zaštiti područje zavarivanja od atmosferskih plinova poput kisika, dušika, ugljik dioksida ( $\text{CO}_2$ ) i vodene pare. Plin vlastitim svojstvima utječe na količinu rastaljenog metala, oblik i dubinu penetracije, izgled površine i mehanička svojstva zavara te značajno utječe na udarni rad loma, korozijsku postojanost i čvrstoću spoja.

Postupak MAG zavarivanja je poluautomatski pri čemu je vođenje pištolja ručno, a dodavanje žice je regulirano automatski, ali je postupak moguće i u potpunosti automatizirati.

Prednosti MAG postupka zavarivanja su mogućnost zavarivanja većine poznatih materijala, puno načina prijenosa metala, omogućeno zavarivanje u svim položajima zavarivanja, mogućnost zavarivanja u zatvorenom i na otvorenom prostoru, mogućnost primjene različitih plinskih mješavina, mogućnost automatizacije postupka, široki raspon debljina osnovnog materijala te velika učinkovitost.

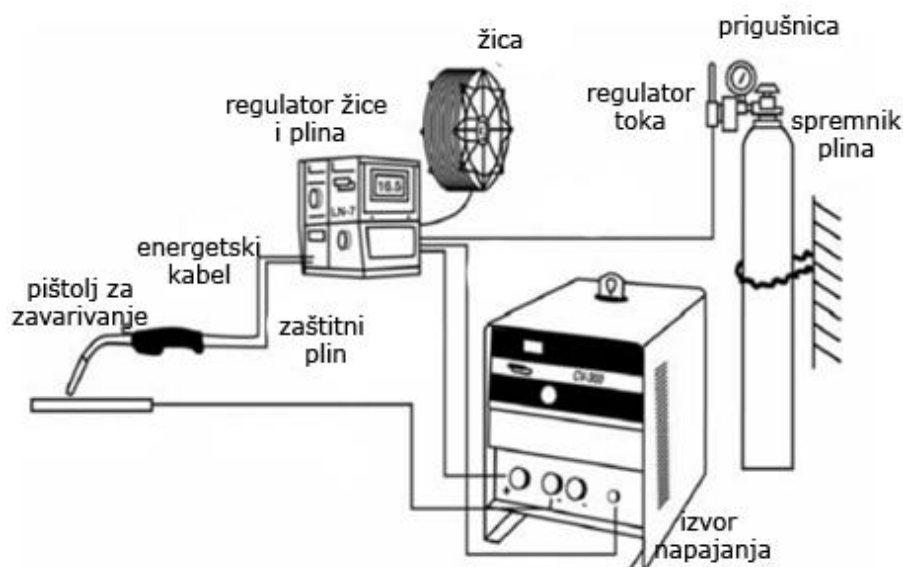
Postupak je podložan pojavi štrcanja što u konačnici rezultira gubitcima efektivnosti i porastom cijene rada jer je potrebno naknadno obrađivati površinu. Također je potrebna složeniya oprema koja osigurava dovođenje žice (automatska regulacija).

Dodatno, prilikom rada na otvorenom prostoru, gdje postoji strujanje vanjskog zraka, smanjena je učinkovitost zaštitnog plina, a to često rezultira nečistoćama u zavarenom spoju koje imaju negativne utjecaje na svojstva zavarenog spoja.

Kod dovođenja dodatnog materijala (posebno aluminijska žica), zbog neodgovarajuće tehnike rada i parametra zavarivanja javljaju se greške poput poroznosti (pore u zavaru) ili naljepljivanja.

Prednosti MAG zavarivanja su relativne jer ovise o položaju zavarivanja, vrsti i debljini osnovnog materijala te zahtjevima kvalitete zavarenog spoja.

## 2.1. Oprema za MAG zavarivanje



Slika 2.2 Oprema kod MAG zavarivanja [1]

Oprema potrebna za MAG zavarivanje sastoji se od izvora istosmjerne ili izmjenične struje, polikabela koji objedinjava više crijeva i vodiča koji služe za dodavanje zaštitnog plina, dovoda električne energije, boce sa zaštitnim plinom, pištolja za zavarivanje, dodatnog materijala (žice), uređaja za kontrolu dovoda žice.

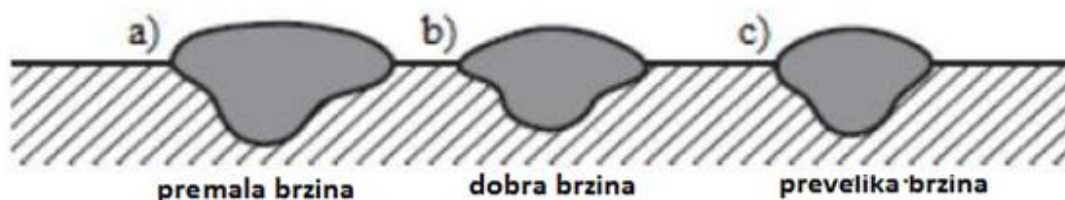
Kod visokih radnih opterećenja tj. kad se radi s većim jakostima struje ili kad je korištena žica veće toplinske provodljivosti tada pištolj za zavarivanje može biti hlađen vodom, a hlađen zrakom ako se zavaruju tanki limovi [2].

### 2.1.1. Značaj gubitaka u kabele

Svaki dio korištene opreme utječe na krajnju kvalitetu zavarenog spoja pa je potrebno dobro poznavati utjecaj svakog dijela opreme. Tako, na primjer, zbog dužine kabela i pada napona kojim su povezani izvor struje za zavarivanje i pištolj za zavarivanje kao što prikazuje slika 2.2, iznos napona električnog luka je manji od onoga na priključnim stezaljkama izvora struje za zavarivanje. Pad napona na kabele značajno utječe na konvencionalne izvore s ravnom karakteristikom (slika 2.4). Ova greška se može ispraviti povećanjem napona u samom ispravljaču.

### 2.1.2. Brzina zavarivanja

Brzina zavarivanja utječe na produktivnost i bira se u ovisnosti o položaju zavarivanja i jakosti struje. Brzina zavarivanja definirana je kao brzina kojom se električni luk giba po liniji spajanja zavara materijala. Brzinu zavarivanja potrebno je uskladiti s količinom taline, odnosno ako je nedovoljno velika dolazi do naljepljivanja, a prebrzo zavarivanje daje preveliko nadvišenje zavara. Utjecaj brzine zavarivanja na protaljivanje, širinu i oblik zavara prikazuje slika 2.3.

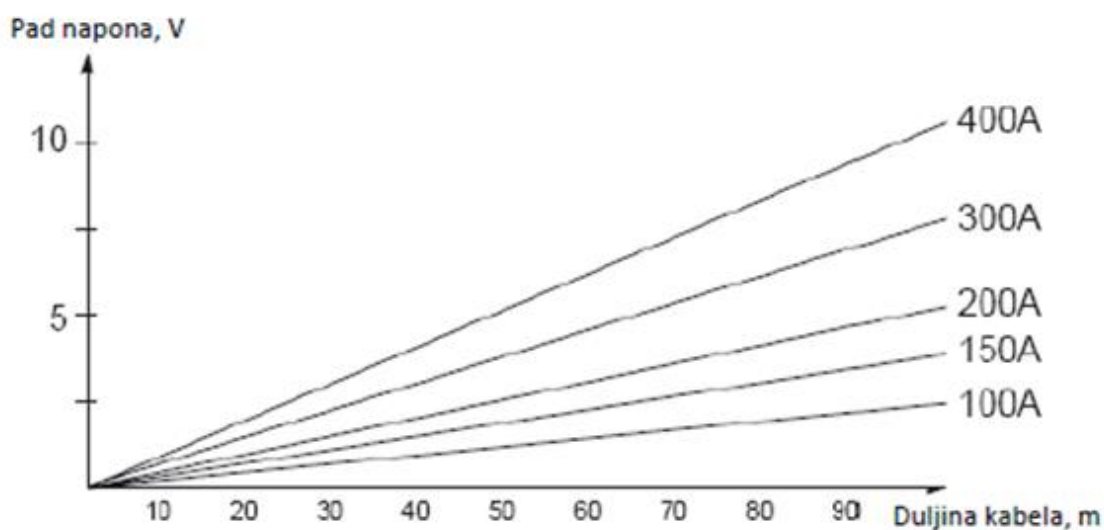


Slika 2.3 Utjecaj brzine zavarivanja na protaljivanje, širinu i oblik zavara



### 2.1.2.1. Dinamički gubitci kod MAG zavarivanja

Ravni kabel se može promatrati kao zavojnica s jednim zavojem, a osnovno svojstvo zavojnice je da sprječava naglu promjenu iznosa struje koja kroz nju prolazi. Navedeno svojstvo kabela predstavlja problem kod impulsnog MIG zavarivanja gdje se struja trenutno mijenja (porast iz osnovne vrijednosti struje na vršni iznos vrijednosti struje). Umjesto namatanja kabela na motalice za kabel čime se povećava broj zavoja i induktivitet, kabeli su skraćeni, a zbog toga izvor struje mora biti puno bliže radnom mjestu. Pad napona na kabelu presjeka  $S = 70 \text{ mm}^2$  i različitim strujama zavarivanja prikazuje slika 2.4.



Slika 2.4 Pad napona na vodiču ovisan o duljini i struji zavarivanja kod kabela presjeka  $70 \text{ mm}^2$  [3]

## 2.2. Pregled statičkih i dinamičkih karakteristika izvora napajanja

Kod MAG zavarivanja najčešće je korišten izvor istosmjerne struje gdje je polaritet elektrode pozitivan pri čemu se postiže stabilan električni luk. Primjena konstantnog negativnog polariteta na žici kod zavarivanja metalnom taljivom elektrodom u zaštiti plina nije moguća zbog nestabilnog električnog luka, prskanja te loše penetracije i kvašenja što je neprihvatljivo kod uobičajenih zavarivačkih operacija [4].

Dinamička karakteristika (relacija trenutne vrijednosti napona i trenutne vrijednosti struje) i statička karakteristika (relacija iznosa srednje vrijednosti struje i iznosa srednje vrijednosti napona) izvora napajanja može imati značajni utjecaj na postupak zavarivanja [1].

### 2.2.1. *Statičke karakteristike izvora napajanja*

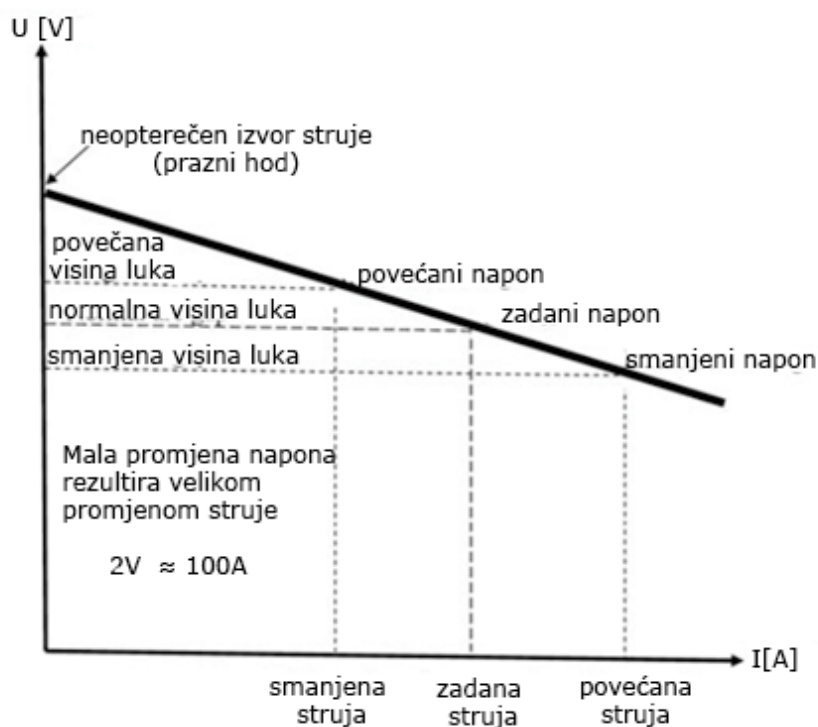
Kod konvencionalnih izvora napajanja zavarivanja uobičajeno se koristi ravna strujna karakteristika kako bi se postiglo optimalno stvaranje luka i zadržao konstantni iznos struje uz bilo koju promjenu napona prilikom zavarivanja.

Izvor napajanja također može imati ravnu strujno-naponsku karakteristiku kao što prikazuje slika 2.5. Napon takvog ispravljača je približno konstantan pri gotovo svakoj promjeni struje zavarivanja. Ovakva karakteristika izvora uz konstantnu brzinu dovođenja žice omogućava održavanje konstantne dužine luka (engl. self-adjusting arc) jer na visinu luka utječe uređaj, a ne čovjek.

Uz povećanje visine električnog luka, vrijednost napona poraste i vrijednost struje padne. Struja je također kontrolirana brzinom dovođenja žice pa će se zbog toga žica sporije taliti, a visina luka će se smanjiti na originalnu visinu.

Ako se visina luka smanji, vrijednost napona padne, a vrijednost struje poraste. Zbog veće vrijednosti struje žica se brže tali dok se električni luk ne produlji, tj. vrati na predefiniranu visinu.

Statičke karakteristike su predodređene konstrukcijom samog izvora napajanja i korisnik ih ne može mijenjati.



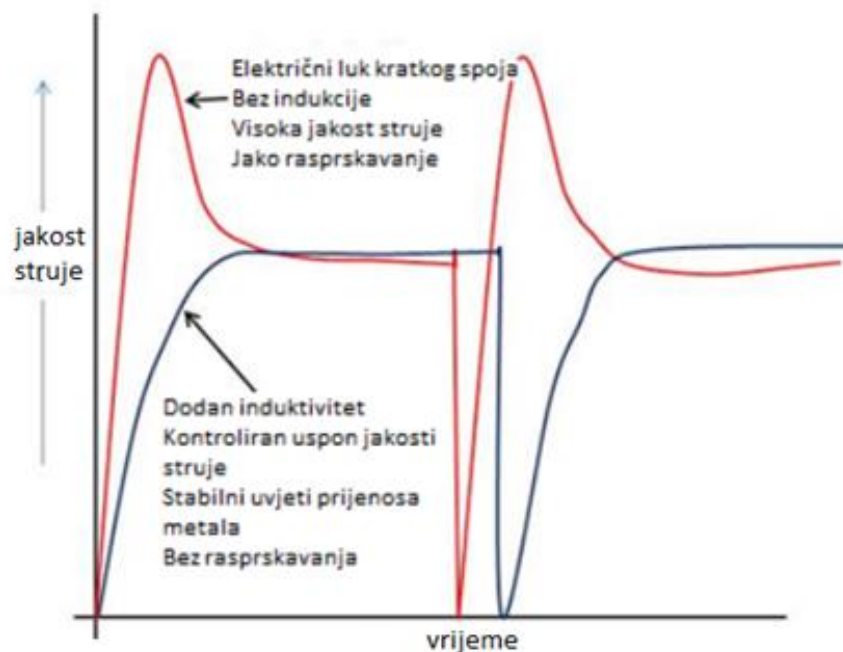
**Slika 2.5** Statička karakteristika izvora struje uz održavanje konstantnog napona prilikom MAG zavarivanja [1]

### 2.2.2. Dinamičke karakteristike izvora napajanja

Dinamička karakteristika prikazuje trenutne promjene napona i struje tijekom postupka zavarivanja zbog analiziranja ponašanja električnog luka prilikom formiranja i odvajanja rastaljene kapljice dodatnog materijala. Trenutne vrijednosti struje i napona tijekom prijenosa metala mjere se pomoću osciloskopa, a dobiveni graf trenutnih vrijednosti struje i napona naziva se oscilogram.

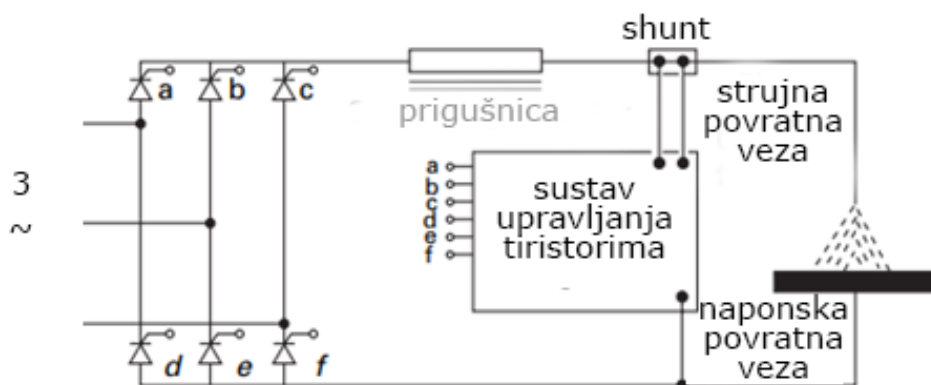
Kod konvencionalnih izvora nižih cijena uobičajeno je korišten induktivitet u izvoru napajanja kako bi se postavilo ograničenje na rast struje prilikom trajanja kratkog spoja kad se radi o prijenosu metala kratkim spojevima. Induktivitet kod starijih uređaja se regulira grebenastim sklopkama, potenciometrima ili pomičnim kotvama [5].

Cilj je osigurati što ujednačeniji i prikladniji prijelaz materijala ovisno o vrsti zavarenog spoja koji se izvodi. Induktivitet je vrlo suptilan i osjetljiv parametar koji u konačnici može poboljšati ili narušiti potencijalno dobar prijenos materijala te samu uspostavu električnog luka. Slika 2.6 prikazuje utjecaj induktiviteta na uzlaz i silaz električnog impulsa.



Slika 2.6 Utjecaj induktiviteta na uspon i silaz električnog impulsa [5]

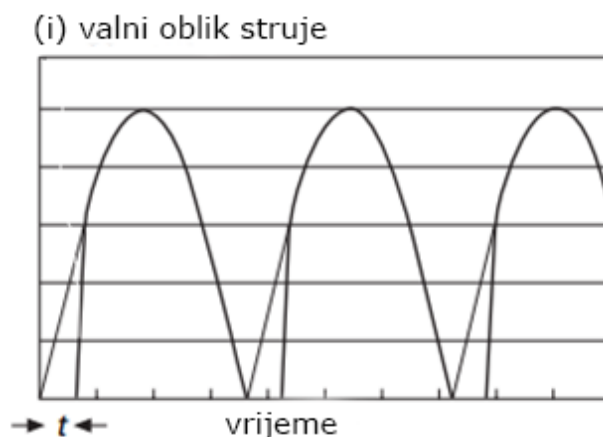
U novije vrijeme razvojem učinske elektronike dolazi do alternativnih, elektronički upravljanih izvora koji se temelje na učinskim poluvodičkim ventilima (IGBT, MOSFET). Primjer jednog takvog izvora prikazuje Slika 2.7.



Slika 2.7 Trofazni fazno upravljivi tiristorski ispravljač u mosnom spoju [6]

Koristeći povratnu vezu moguće je postići puno stabilniji izlaz izvora u odnosu na prethodno korištene konvencionalne izvore napajanja. Fazno upravljeni ispravljač prikazan na slici 2.7 može biti korišten kao izvor napajanja kod DC REL, MIG/MAG, pravokutnog AC TIG, MIG/MAG i EPP zavarivanja [6].

Slika 2.8 prikazuje izlaz napona i struje trofaznog fazno upravljivog tiristorskog ispravljača u mosnom spoju opterećenog djelatnim trošilom.



**Slika 2.8 Izlaz napona i struje trofaznog fazno upravljivog tiristorskog ispravljača u mosnom spoju [6]**

Ovisno o jačini narinute struje i napona ostvaruju se različiti prijenosi metala u električnom luku. Moderni izvori struje omogućavaju kontinuirano i brzo upravljanje iznosima struje i napona zavarivanja i tako stvaraju modificirane načine prijenosa materijala gdje se prijenos materijala električnim lukom sastoji od kombinacije više osnovnih načina prijenosa materijala tijekom jednog radnog ciklusa.

Moderni izvori struje za zavarivanje također mogu generirati struju za zavarivanje promjenjivog polariteta (engl. variable polarity - VP). To znači da se na metalnoj elektrodi izmjenjuju pozitivna i negativna perioda određenog trajanja i intenziteta. 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 karakteristike koje se zahtijevaju pri navarivanju [5].

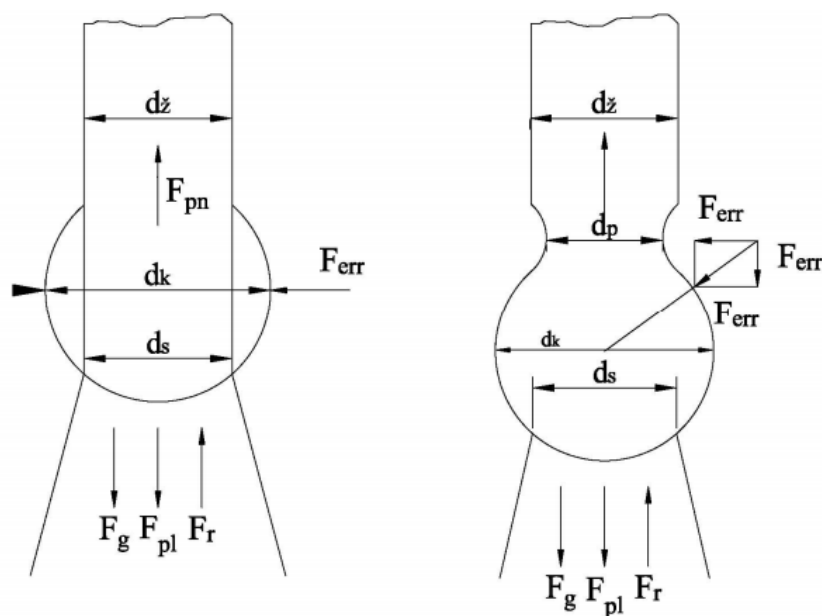
Uza sve svoje prednosti moderniji izvori napajanja koriste znatno složeniju opremu što je vidljivo u njihovoj cijeni. Za modernu opremu je potrebno poznavati područja u kojima postupci zavarivanja imaju bitno bolje karakteristike od konvencionalne opreme. U protivnom investicija u najmoderniju opremu nema smisla. Tipično je modernija oprema isplativa ako se radi o potpuno automatiziranom zavarivanju, gdje se povećava produktivnost i doseže kvaliteta zavara kakva s konvencionalnom opremom nije moguća.

### 2.3. Sile koje djeluju na prijenos materijala

Kod MAG zavarivanja dodatni materijal se kroz električni luk prenosi u kapljicama do taline. Na kapljicu između elektrode i radnog komada djeluju sile koje se javljaju u električnom luku. Sve sile koje se javljaju ovisno o položaju zavarivanja nužno ne pomažu prijenosu kapljica dodatnog materijala, već djeluju u smjeru suprotnom od prijenosa dodatnog materijala. Tako sila gravitacije koja uvijek djeluje prema dolje pomaže prijenosu kapljica kad se postupak zavarivanja provodi u vodoravnom položaju, dok je za sve ostale položaja djelovanje sile gravitacije na prijenos dodatnog materijala u električnom luku negativno.

Na prijenos dodatnog metala kod MAG zavarivanja djeluju sljedeće sile [17]:

- elektromagnetska sila  $F_{cb}$
- sila reaktivnog djelovanja  $F_t$
- sila površinske napetosti  $F_{pn}$
- sila plazme električnog luka  $F_{pl}$
- sila zbog eksplozija u kapljicama metala  $F_e$
- sila gravitacije  $F_g$ .



**Slika 2.9** Prikaz djelovanja sila na kapljicu metala u električnom luku [17]

U svakom vremenskom trenutku na kapljicu dodatnog materijala djeluje sila koja je po iznosu i smjeru jednaka zbroju svih nabrojanih sila.

Slika 2.9 Prikazuje djelovanje sila na kapljicu metala u električnom luku gdje je [17]:

$d_z$  – promjer elektrodne žice,

$d_k$  – promjer kapljice,

$d_s$  – promjer stupa električnog luka,

$d_v$  – promjer vrata kapljice,

$F_g$  – sila gravitacije,

$F_{em}$  – elektromagnetska sila,

$F_{emr}$  – radijalna komponenta elektromagnetske sile,

$F_{ema}$  – aksijalna komponenta elektromagnetske sile,

$F_{pn}$  – sila površinske napetosti,

$F_r$  – sila reaktivnog djelovanja.

Po iznosu je najveća elektromagnetska sila, njezine radijalne i aksijalne komponente stvaraju *pinch* efekt koji doprinosi odvajanju kapljice rastaljenog metala u talinu. Elektromagnetskom silom se pomoću upravljanja jačinom struje indirektno omogućava kontrolirano prenošenje materijala kroz električni luk što je osnova formiranja stabilne taline i homogenosti metala zavara [17].

Sila površinske napetosti javlja se kada je rastaljena kapljica dodatnog materijala na vrhu elektrodne žice i djeluje suprotno smjeru prijenosa ako se radi o prijenosu kapljica slobodnim letom jer sila površinske napetosti djeluje tako da sprječava otkidanje kapljice, no kada je riječ o prijenosu premošćivanjem, sila površinske napetosti je glavna sila koja povlači kapljicu prema talini [17].

Zbog visokih temperatura na kojima se odvija postupak zavarivanja nastaje sila reaktivnog djelovanja zbog isparavanja metala na elektrodama. Isparavanje je proporcionalno kvadratu struje zavarivanja [17].

Sila zbog eksplozije u kapljicama nastaje zbog reakcija koje se javljaju zbog djelovanja plinova u kapljici tijekom prijenosa dodatnog metala. U kapljici tijekom transfera postoje plinovi koji ekspandiraju i često dovode do prsnuća kapljice. Smjer ove sile je nasumičan [17].

Sila plazme električnog luka djeluje na gibanje i usmjeravanje kapljice dodatnog materijala u ioniziranom području. Zbog strujanja plazme ostvaruje se pritisak na kapljicu te se tako podržava njezino gibanje koje pomaže prijenosu dodatnog materijala.

#### **2.4. Načini prijenosa metala u električnom luku kod MAG zavarivanja**

Postoje različiti načini prijenosa dodatnog metala preko električnog luka, a ovise o brzini dodavanja dodatnog materijala, tipu zaštitnog plina, jakosti struje i naponu napajanja.

Prirodni prijenosi metala su prijenos metala kratkim spojevima (engl. short-circuit transfer), prijenos metala mješovitim lukom (engl. globular transfer) i prijenos metala štrcajućim lukom (engl. spray transfer).

Dobro poznavanje načina prijenosa metala je bitno kako bi se ostvarila željena kvaliteta i ekonomičnost postupka zavarivanja. Parametri koji utječu na način prijenosa materijala su: kemijski sastav i promjer dodatnog materijala, sastav zaštitnog plina, jakost i polaritet struje te visina električnog luka [18]. Kod električnog zavarivanja taljivom elektrodom materijal od elektrode do radnog komada može doći slobodnim letom kapljica ili premošćivanjem (krupnokapljičasti prijenos).

Krupnokapljičasti prijenos je prijenos metala kratkim spojevima i prijenos materijala mješovitim lukom, a prijenos slobodnim letom je prisutan kod prijenosa metala štrcajućim i impulsnim lukom [18]. Prijenos materijala kratkim spojevima, štrcajućim i mješovitim lukom su prirodni prijenosi, dok je impulsni prijenos dodatnog materijala u električnom luku kontrolirani.

##### **2.4.1. Prijenos metala kratkim spojevima (engl. short-circuit transfer)**

Kad su napon i struja relativno niski tada je brzina dovođenja žice veća od brzine taljenja žice. Žica se onda „umoči“ u talinu gušeći pritom električni luk i kratko se spaja s osnovnim materijalom odnosno talinom. Zbog kratkospojenog kruga i malog otpora, struja u krugu poraste i vrh žice se rastali. Zbog magnetskog efekta (engl. pinch effect ) i sile gravitacije na vrh elektrode, vrh elektrode se odlomi od ostatka elektrode i padne u talinu kao kapljica. Nakon toga se ponovno uspostavi električni luk i cijeli ciklus počinje opet.

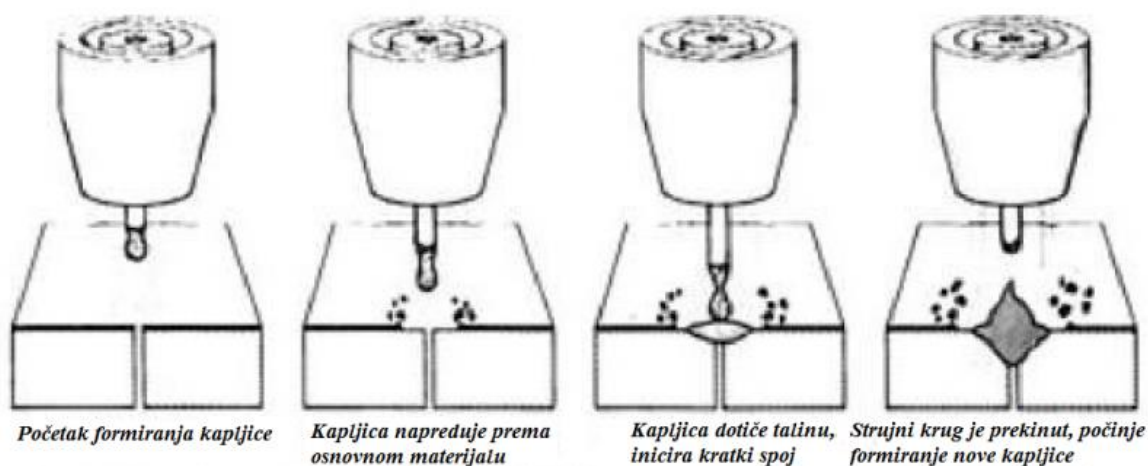
U ovakvom načinu zavarivanja struja mora biti dovoljno visoka da spriječi „lijepljenje“ žice (elektrode), a napon dovoljno visok da se ponovno uspostavi električni luk. Ovakav način



prijenosa ima mali unos topline i pogodan je za zavarivanje tankih materijala i ostvariv u svim položajima zavarivanja zbog malog minimalnog volumena taline.

Kao zaštitni plin kod prijenosa metala kratkim spojevima tipično je korištena mješavina (75-80) % Ar i (20-25) % CO<sub>2</sub> ili 100 % CO<sub>2</sub> [2].

Ciklus prijenosa materijala kratkim spojem prikazan je na slici 2.10.

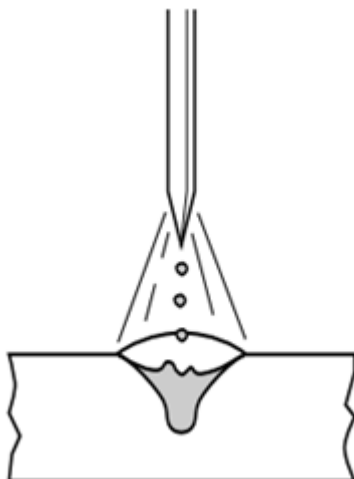


Slika 2.10 Ciklus prijenosa materijala kratkim spojem [7]

#### 2.4.2. Prijenos metala štrcajućim lukom (engl. spray transfer)

Prijenos metala štrcajućim električnim lukom javlja se u području visokih struja i napona. Uz povećanje iznosa struje povećava se tok kapljica preko električnog luka, a promjer kapljica postaje manji, uz dovoljno velik iznos struje stvori se tok fino raspršenog materijala. Prijenos materijala se dakle odvija kroz štrcanje materijala u obliku sitnih kapljica što rezultira velikim stupanjem taloženja i povećanim volumenom taline. Promjer kapljice je manji od promjera žice kojom se zavaruje. Prijenos dodatnog materijala štrcajućim električnim lukom prikazuje slika 2.11. Način prijenosa nije pogodan za zavarivanje u prisilnim položajima.

Kao zaštitni plin kod prijenosa metala štrcajućim električnim lukom tipično se koriste plinske mješavine s velikim udjelom argona, najčešće se koriste Ar + (1-5) % O<sub>2</sub> ili Ar + (10-12) % CO<sub>2</sub> [2].

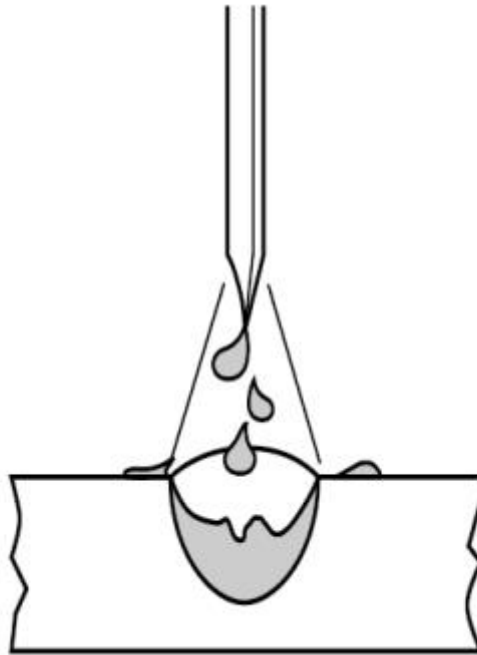


Slika 2.11 Prijenos metala štrcajućim lukom [2]

#### 2.4.3. Prijenos metala mješovitim električnim lukom (engl. Globular transfer)

Prijenos materijala mješovitim lukom javlja se kod relativno srednjih vrijednosti struje i napona, kombiniranjem prijenosa metala štrcajućim lukom i slučajnim kratkim spojevima. Promjer kapljice je veći od promjera žice kojom se zavaruje, ali ponekad kapljica zbog nižih vrijednosti struje i napona nije u potpunosti odvojena od žice te postoji kratkotrajno kratko spajanje zbog čega luk postaje nestabilan i prouzrokuje pojačano rasprskavanje. Zbog toga se postupak zavarivanja s prijenosom metala mješovitim lukom teško kontrolira. Prijenos metala mješovitim lukom prikazan je na slici 2.12.

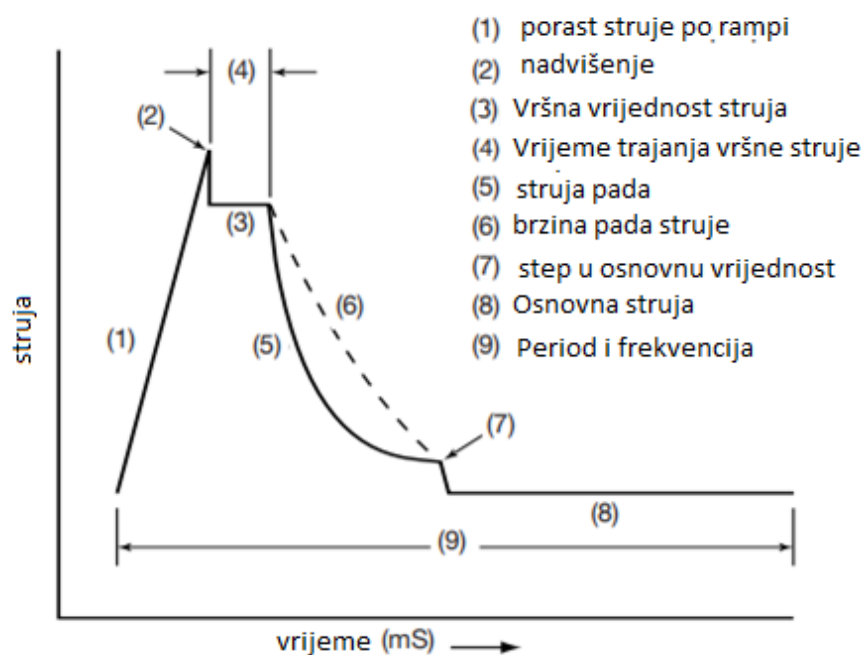
Kao zaštitni plin kod prijenosa metala mješovitim lukom tipično se koristi mješavina Ar + (1-5) % CO<sub>2</sub> ili 100 % CO<sub>2</sub> [2].



Slika 2.12 Prijenos metala mješovitim lukom [2]

#### ***2.4.4. Prijenos metala impulsnim strujama***

Luk se pulsira zbog kontrole unosa topline čime se dozvoljava smanjenje količine rastaljenog materijala prije nego što dođe do urušavanja taline. Ovo se postiže reguliranjem napona i struje kako bi se određeni dio vremena prijenos metala odvijao štrcajućim lukom, a ostalo vrijeme se napon i struja reduciraju na vrijednost gdje se održava stalni električni luk i osigurava konstantno dovođenje topline. Puls struje kod ovog načina prijenosa metala prikazuje slika 2.13. 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.



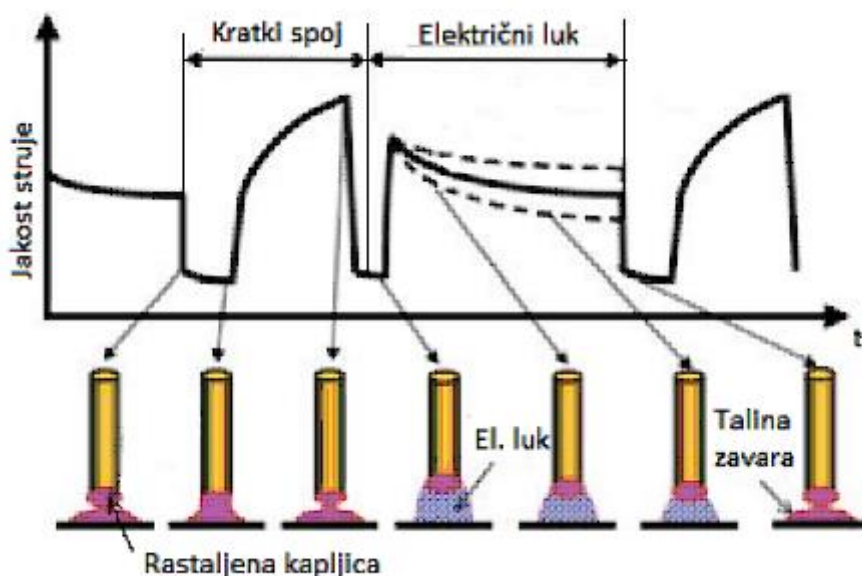
Slika 2.13 Pulsirajuće struje [2]

S dobro odabranim parametrima pulsa ne dolazi do kratkih spojeva te je visina električnog luka konstantna. Zbog pojednostavljenja primjene moderni uređaji imaju mogućnost programiranja i odabira sinergijskih krivulja za određenu kombinaciju debljine materijala, zaštitnog plina, vrste materijala i promjera žice. Korisnik odabire željenu količinu depozita (brzine žice) i unosa topline sa samo jednim potenciometrom (engl. 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 protaljivanja osnovnog materijala. Zbog nižeg unosa topline manje su deformacije te nema rasprskavanja kapljica rastaljenog materijala, a olakšana je kontrola taline u prisilnim položajima zavarivanja. No, zbog potrebe generiranja specifičnog strujnog impulsa oprema za ovakav način prijenosa materijala je skuplja, a u slučaju prevelikog impulsa struje može doći do prevelikog protaljivanja. Također, kao zaštitni plin kod prijenosa metala mješovitim lukom tipično se koristi mješavina Ar i maksimalno 18 % CO<sub>2</sub>, pa je stoga i mješavina zaštitnog plina skupa.

#### 2.4.5. *Controlled Bridge Transfer (CBT)*

Korištenje konvencionalnih MIG/MAG postupaka zavarivanja dovodi do veće količine rasprskavanja, što rezultira skupljom obradom površine. Zbog toga se sve češće razvijaju novi načini prijenosa metala koji kombiniraju prednosti različitih prijenosa materijala.

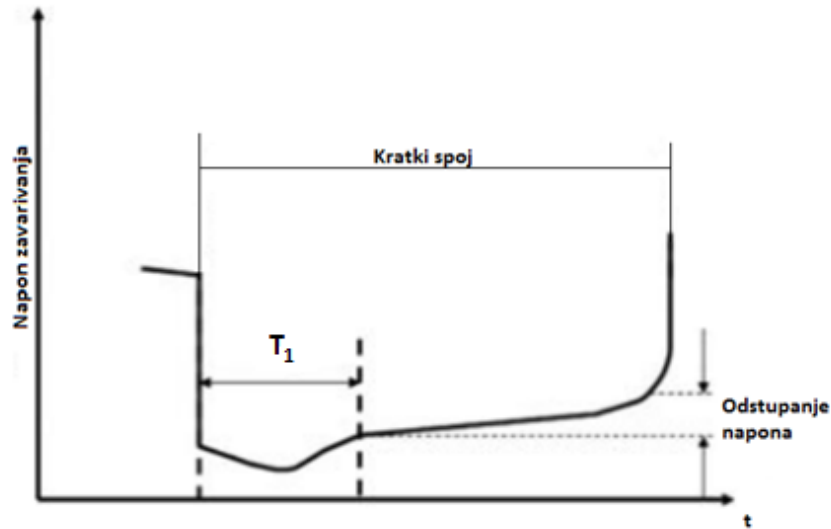
Kombinacijom impulsnog prijenosa načina i konvencionalnog prijenosa kratkim spojevima kod MAG zavarivanja dobiva se CBT (engl. Controlled bridge transfer) način prijenosa metala koji omogućuje mali unos topline i smanjeno rasprskavanje. Smanjeni unos topline postiže se smanjenjem iznosa struje neposredno prije ponovnog uspostavljanja električnog luka (slika 2.14).



Slika 2.14 Princip rada CBT metode zavarivanja [10]

Gubitak energije zbog smanjenja jakosti struje u kratkom spoju se nadoknađuje naglim povećanjem jakosti struje u trenutku uspostave električnog luka što rezultira odgovarajućom veličinom kapljice metala. Princip rada CBT metode se temelji na preciznom podešavanju jakosti struje u odnosu na napon električnog luka [13]. Kao zaštitni plin kod prijenosa metala mješvitim lukom tipično se koristi mješavina Ar i 20 % CO<sub>2</sub> [2].

Trenutak ponovnog uspostavljanja električnog luka predviđa se mjerenjem napona zavarivanja (slika 2.15). Nakon uspostavljanja kratkog spoja vrijednost napona pada u ovisnosti o jakosti struje kako bi se lakše kontrolirala pojava rasprskavanja. Referentni napon je onaj u kojem napon još ne raste i na slici je označen s  $T_1$ . Ako mjereni napon poprimi određenu vrijednost dolazi do ponovnog uspostavljanja električnog luka.



Slika 2.15 Uvjet predviđanja uspostave električnog luka [13]

Točno predviđanje trenutka ponovnog uspostavljanja električnog luka je ključno za smanjivanje rasprskavanja, ali mjerenje napona električnog luka može biti otežano ovisno o položaju zavarivanja, veličini i obliku rastaljene kapljice metala, ponašanju taline i brzini zavarivanja [13].

CBT postupak rezultira smanjenim ili u potpunosti eliminiranim rasprskavanjem, a zbog mogućnosti preciznih mjerenja i kontrole unosa topline ovaj postupak je pogodan kod zavarivanja korijenskih prolaza kao i zavarivanje ploča debljine manje od promjera dodatnog materijala [13].

## 2.5. Pregled zaštitnih plinova koji se koriste pri MAG zavarivanju

Svrha zaštitnog plina je zaštita područja zavarivanja od atmosferskih plinova i održavanje konstantnog električnog luka. Ujedno, svojim svojstvima plin utječe na mehanička svojstva zavarenog spoja.

Odabir zaštitnog plina ovisi o željenoj kvaliteti zavarenog spoja, ali ovisi i o vrsti dodatnog materijala, debljini osnovnog materijala, željenom načinu prijenosa metala u električnom luku, položaju zavarivanja, materijalu elektrode, kvaliteti pripreme zavara, željenom izgledu zavara i profilu penetracije te samoj cijeni zaštitnog plina. Utjecaj odabira zaštitnog plina kod MAG zavarivanja prikazan je na slici 2.16.

Podaci iz prakse pokazuju da najbolje rezultate kod zavarivanja MAG postupkom postiže mješavina argona s manjim udjelom kisika ili ugljikovog dioksida [2].

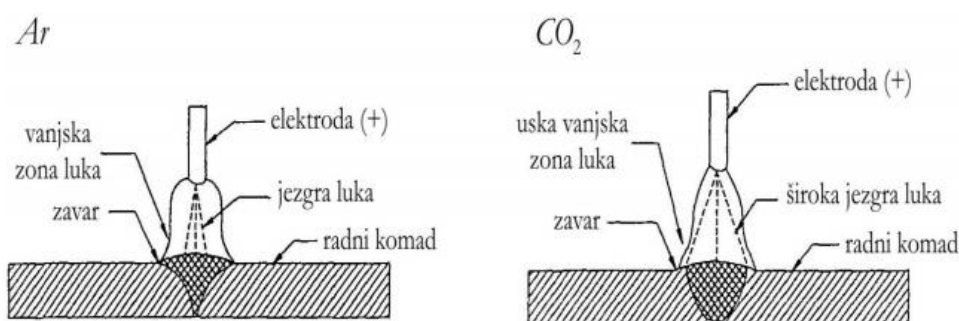
Zaštitni plinovi za zavarivanje su prema normi HR EN ISO14175:2008 raspoređeni u grupe prikazane tablicom 2.1.

**Tablica 2.1 Plinovi i plinske mješavine prema normi HR EN ISO 14175:2008**

OZNAKA PLINSKE MJEŠAVINE	OPIS MJEŠAVINE
R	Reducirajuće plinske mješavine
I	Inertni plinovi i inertne plinske mješavine
M	Oksidirajuće plinske mješavine na bazi argona s aktivnim plinom (CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> )
C	Visoko oksidirajući plinovi i plinske mješavine
F	Nereaktivni plinovi ili reducirajuće plinske mješavine

Razdjela u normi je obavljena prema najčešće korištenim plinovima u zavarivanju.

Za kvalitetan odabir zaštitnih plinova potrebno je poznavati ionizacijski potencijal plina, toplinsku vodljivost i reaktivnost plina.



Slika 2.16 Utjecaj odabira zaštitnog plina kod MAG zavarivanja [8]

### 2.5.1.1. Ionizacijski potencijal

Ion je čestica koja je električki nabijena zbog razlike u broju protona i elektrona [9].

Energija ionizacije ili ionizacijski potencijal je mjera sposobnosti nekog kemijskog elementa da ulazi u kemijske reakcije uz stvaranje iona. Izražava se u elektron voltima, jer se tako izražena odnosi na energiju potrebnu da se ukloni jedan elektron iz svakog atoma u jednom molu nekog elementa [9].

Električni luk je održavan konstantnim tokom struje kroz ionizirani plin. Energija potrebna da plin otpusti elektron direktno utječe na svojstva električnog luka. Manji ionizacijski potencijal plina znači da zadani plin pri manjoj razlici potencijala prestaje biti dielektrik i dolazi do stvaranja električnog luka (proboja dielektrika). Zbog malog ionizacijskog potencijala argon je najčešće korišteni zaštitni plin prilikom zavarivanja.

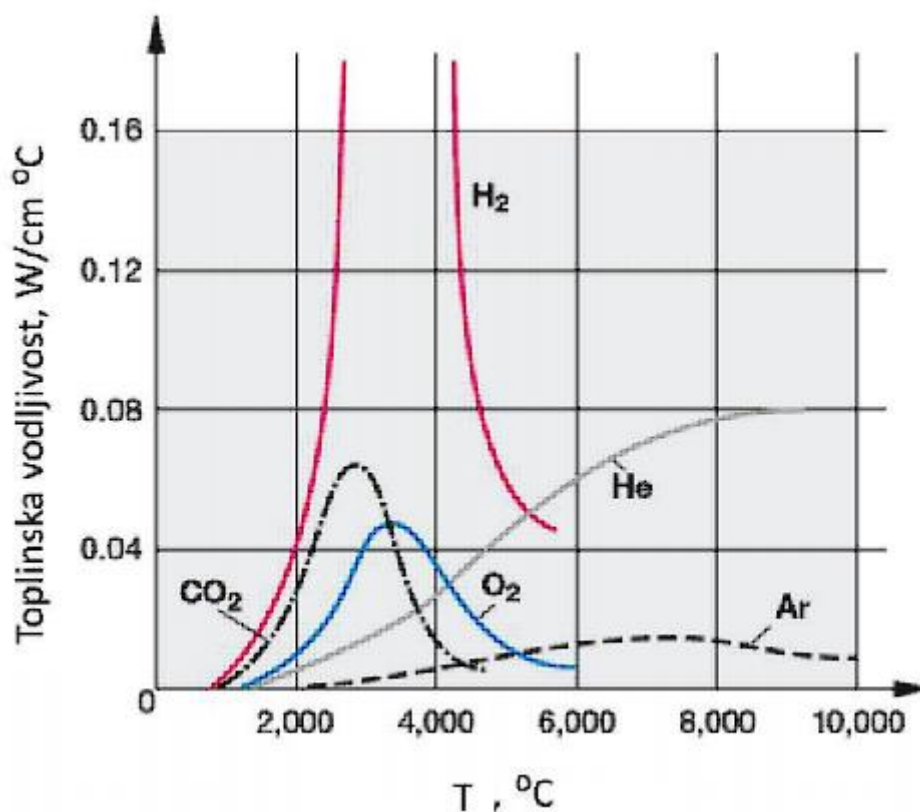
Tablica 2.2 Osnovna svojstva zaštitnih plinova [2]

Element	Potencijal prve ionizacije, eV	Gustoća, kg m <sup>-3</sup>
Argon	15.75	1.784
Helij	24.58	0.178
Vodik	13.59	0.083
Dušik	14.54	1.161
Kisik	13.61	1.326
Ugljikov dioksid	(14.0)	1.977



### 2.5.1.2. Toplinska vodljivost

Toplinska vodljivost plina također utječe na stabilnost električnog luka. Visoka toplinska vodljivost može dovesti do smanjenja promjera vodljivog dijela (jezgre) električnog luka što dovodi do povećanja napona i smanjenja stabilnosti električnog luka. Vodik koji ima manji ionizacijski potencijal, ali veću toplinsku vodljivost od argona povećava razliku potencijala električnog luka kad se pomiješa s argonom i tako utječe na stabilnost i stvaranje električnog luka. Plinovi s većom toplinskom vodljivošću stvaraju širi električni luk s boljom temperaturnom raspodjelom i daju bolju penetraciju zavara. Slika 2.17 prikazuje toplinsku vodljivost nekoliko najznačajnijih plinova u ovisnosti o temperaturi.



Slika 2.17 Ovisnost toplinske vodljivosti plinova o temperaturi [15]

2.5.1.3. *Kemijska reaktivnost*

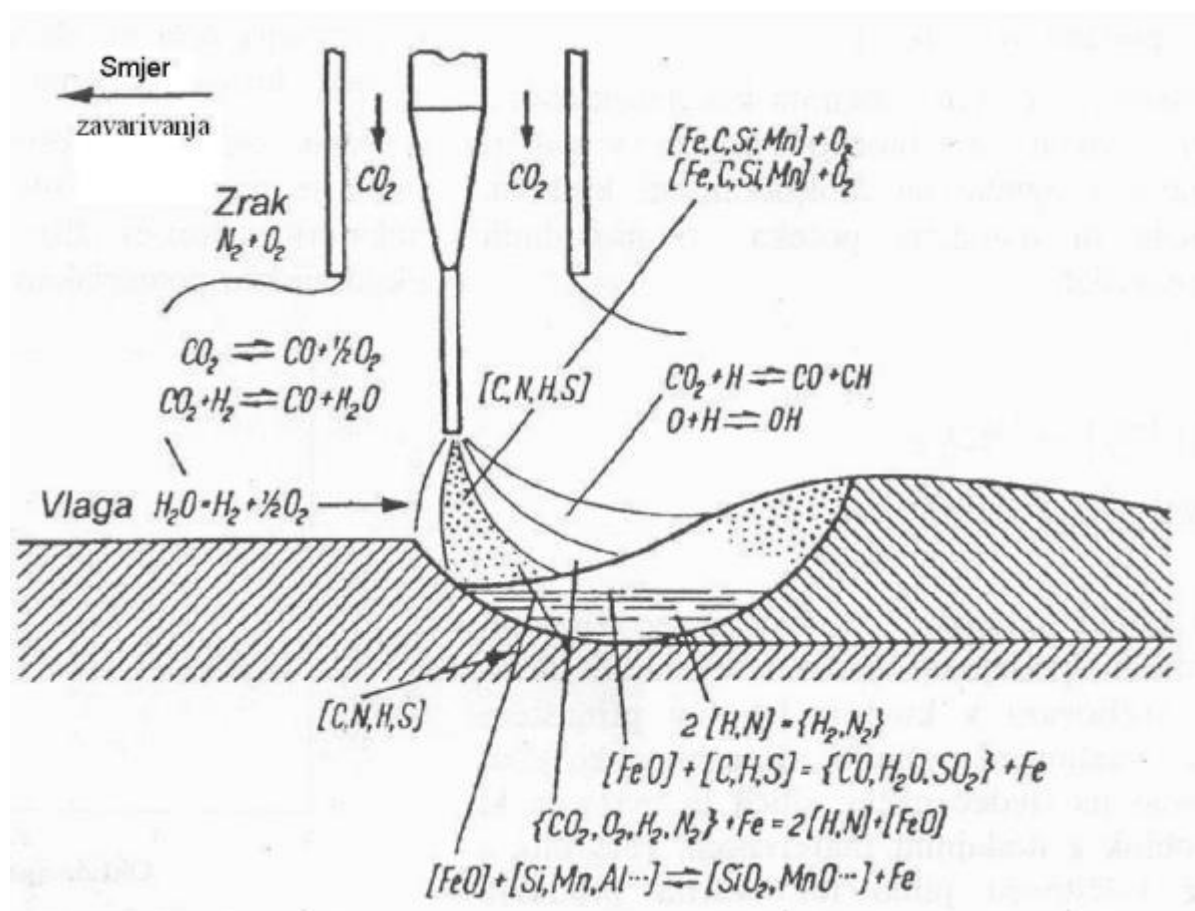
Kemijska reaktivnost plina određuje sposobnost plina da kemijski reagira ili ne reagira s drugim kemijskim elementima koji su prisutni u talini. Plin koji se kemijski ne spaja ni sam sa sobom ni s drugim elementima naziva se inertnim. Tablica 2.3 Prikazuje osnovna svojstva najčešće korištenih plinova s obzirom na njihovu sposobnost kemijske reakcije s drugim elementima.

Helij i Argon su potpuno inertni plinovi i nemaju kemijski utjecaj na zavar. Dušik koji je kemijski inertan kod sobnih temperatura pri temperaturama zavarivanja postaje reaktivan i može imati negativan utjecaj na kvalitetu zavara.

**Tablica 2.3 Svojstva osnovnih zaštitnih plinova kod MAG zavarivanja prema normi HR EN ISO 14175:2008**

PLIN	$T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}, p = 1,013\text{ bar}$		Ponašanje pri zavarivanju
	gustoća (zrak = $1,293\text{ kg/m}^3$ )	točka isparavanja uz tlak $1,013\text{ bar }^{\circ}\text{C}$	
Argon	1,784	-185,9	inertan
Helij	0,178	-268,9	inertan
Ugljikov dioksid	1,977	-78,5	oksidirajući
Kisik	1,429	-183	oksidirajući
Dušik	1,251	-195,8	varira ovisno o materijalu
Vodik	0,9	252,8	reducirajući

Slika 2.18 prikazuje moguće kemijske reakcije pri MAG zavarivanju kad se kao zaštitni plin koristi ugljikov dioksid.



Slika 2.18 Moguće kemijske reakcije kod MAG zavarivanja s  $CO_2$  kao zaštitnim plinom [15]

Ugljikov dioksid ima visoki potencijal oksidacije koji može uzrokovati probleme kao što je gubitak legirnih elemenata. Oksidacija koju može prouzročiti u čistom stanju ekvivalentna je onoj koju uzrokuje inertni zaštitni plin uz dodatak od 8 % do 10 % kisika [15].

#### 2.5.1.4. Čistoća plina

Zaštitni plin mora zadovoljiti minimalnu čistoću koja je određena normama jer nečistoće u plinu mogu imati nepovoljan utjecaj na svojstva zavara i brzinu postupka zavarivanja.

### 2.5.2. Osnovna svojstva najkorištenijih zaštitnih plinova

#### 2.5.2.1. Argon

Argon je najčešće korišteni zaštitni plin. Potpuno je inertan i ima veliku gustoću u odnosu na zrak. Mali ionizacijski potencijal omogućava olakšano stvaranje i održavanje električnog luka. Koristi se samostalno ili u primjesi s drugim plinovima zbog postizanja veće stabilnosti električnog luka. Može se koristiti kod svih načina prijenosa dodatnog materijala. Koristi se

kao zaštitni plin kod zavarivanja legura na bazi željeza, ali i za zavarivanje aluminija, bakra i titana.

#### 2.5.2.2. *Helij*

Helij je kemijski inertan, ima manju gustoću od zraka i potrebna je veća razlika potencijala (kod iste visine luka i vrijednosti struje) nego kod argona. Ima visoku toplinsku vodljivost te je zbog toga povećan unos topline. Cijena helija je značajno veća od cijene argona, ali brzine zavarivanja su puno veće, osobito za materijale velike vodljivosti. Tako na primjer kod zavarivanja konstrukcijskih čelika primjesa helija u plinskoj mješavini dovodi do većih brzina zavarivanja bez nastanka ugorina ili mijenjanja oblika penetracije. Teško je dostupan jer se dobiva separacijom iz prirodnog plina u atmosferi.

#### 2.5.2.3. *Ugljikov dioksid*

Ugljikov dioksid pri temperaturi zavarivanja postaje reaktivan i utječe na kemijski sastav materijala zavara, ima veću gustoću od zraka. Zbog mogućnosti disocijacije atoma događa se puno veće oslobađanje energije nego kod argona i helija, a posljedica je formiranje dubljeg i šireg zavara. Loše utječe na prijenos materijala u električnom luku, smanjuje stabilnost električnog luka, pogotovo kod struja većih iznosa. Veće količine ugljikovog dioksida ujedno znače i veći oksidacijski potencijal, a time i više troske na površini zavara [1]. U praksi je najčešće korišten kod MAG zavarivanja kratkim spojevima. Ima nisku cijenu i jako je dostupan što je jedan od glavnih razloga njegovog pojačanog korištenja iako zbog povećanog rasprskavanja i nestabilnog ponašanja pri većim strujama zavarivanja ekonomska isplativost nije sigurna [2].

#### 2.5.2.4. *Kisik*

Kisik se ne koristi kao zaštitni plin, ali se dodaje kao primjesa jer dodan argonu poboljšava stabilnost električnog luka, smanjuje površinsku napetost taline kod zavarivanja čelika i poboljšava ponašanje jezgre električnog luka. Smanjenje površinske napetosti, poboljšava prijenos materijala i izgled zavara. Kod automatiziranog zavarivanja je od velike važnosti jer uređaj ne može reagirati na promjene nastale u luku, te je stabilnost luka vrlo bitna. Korišten je za povećanje brzina kod rezanja plazmom i laserom [2].

#### 2.5.2.5. Vodik

Vodik miješan s argonom povećava iznos napona električnog luka i količinu unesene topline. Poboljšava kvašenje te omogućava veće brzine zavarivanja nehrđajućih čelika. Vodik spada u skupinu reaktivnih plinova iako je po svojstvima reducirajući plin koji reagira s oksidacijskim sredstvima i sprječava stvaranje oksida u talini. Vodik u većim količinama uzrokuje pojavu hladnih pukotina u zavaru i zbog toga se koristi samo kao primjesa manjeg udjela u zaštitnom plinu.

#### 2.5.2.6. Dušik

Dušik je najzastupljeniji u atmosferi i lako dostupan. Inertan na sobnim temperaturama, ali pri temperaturama zavarivanja reagira s metalima titana, magnezija i aluminijska. Najčešće korišten kao primjesa u zaštitnim plinovima korištenima za zavarivanje ugljičnih čelika. Najveću primjenu ima kod rezanja plazmom i laserom [1].

### 2.5.3. Dvokomponentne plinske mješavine

U praksi su najčešće korištene dvokomponentne plinske mješavine. Ovisno o željenim svojstvima i primjeni postupka miješaju se prethodno navedeni plinovi i dobiva se plinska mješavina. Većina dvokomponentnih mješavina se bazira na osnovi argona i ugljikovog dioksida ili argona i kisika.

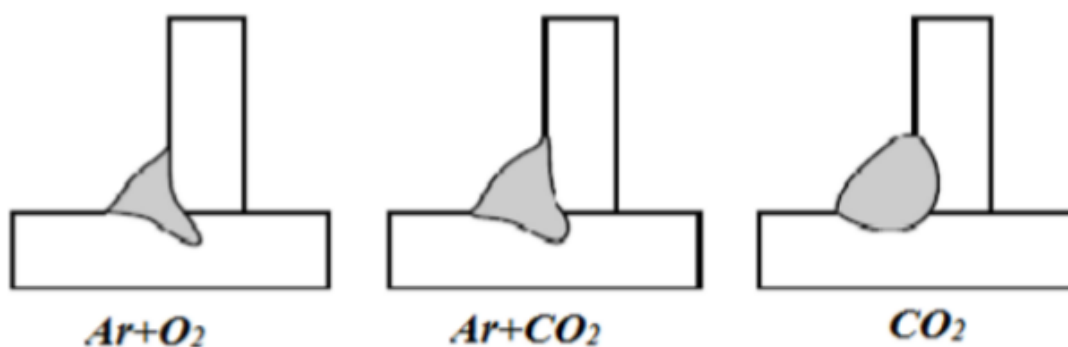
Tablica 4 prikazuje najčešće korištene plinske mješavine i njihovo područje primjene u praksi.

Tablica 2.4.1 Dvokomponentne plinske mješavine i njihovo područje primjene [2]

Plinovi i mješavine	Primjena
Ar + He (35 % - 75 %)	svi metali, posebno Al, Cu, Ni
Ar + O <sub>2</sub> (0,5 %)	Al, Al-legure
Ar + O <sub>2</sub> (1 % - 2 %)	visokolegirani CrNi čelici
Ar + O <sub>2</sub> (3 % - 5 %)	nelegirani i niskolegirani čelici
Ar + H <sub>2</sub> (5 % - 10 %)	visokolegirani CrNi čelici za zavarivanje automatom
Ar + N <sub>2</sub> (25 % - 30 %)	bakar i legure bakra
Ar + CO <sub>2</sub> (18 %)	nelegirani i niskolegirani čelici

Ar i CO<sub>2</sub> je najučestalija dvokomponentna plinska mješavina. Primjenjiva kod sva četiri načina prijenosa materijala u električnom luku. Disocijiranjem CO<sub>2</sub> u električnom luku oslobađa kisik koji poboljšava stabilnost električnog luka. CO<sub>2</sub> zbog velike toplinske vodljivosti povećava unos topline pa postoji mogućnost izgaranja. Slika 2.19 prikazuje utjecaj dodavanja argona ugljičnom dioksidu na izgled zavara.

Kod automatskog zavarivanja visokolegiranih čelika koristi se argon s primjesom vodika jer povećava brzinu zavarivanja.



**Slika 2.19** Razlike u penetraciji kod dvokomponentnih plinskih mješavina [2]

Ugljikov dioksid je inertni plin, ali pri zagrijavanju na temperature iznad 1600 °C u električnom luku, CO<sub>2</sub> disocira na ugljični monoksid (CO) i slobodni kisik koji tada reagira s rastaljenim metalom [2].

80 % Ar i 20 % CO<sub>2</sub> - mješavina za najširu primjenu jer reducira rasprskavanje i rezultira kvalitetnim izgledom zavara. Koristi se kod prijenosa metala kratkim spojevima. Kod tankostjenih osnovnih komada moguće je smanjiti udio CO<sub>2</sub> jer povećavaju učinkovitost deponiranog materijala smanjivanjem nepotrebnog rasprskavanja uz dovoljno unesene topline [2].

25 % Ar i 75 % CO<sub>2</sub> – udio argona stabilizira električni luk i smanjuje rasprskavanje, većinski udio CO<sub>2</sub> omogućava povećani unos topline i zbog toga je mješavina korišten kod zavarivanja cjevovoda debljih stijenci i rezultira dobrim rubnim spajanjem kao i dubokim provarom [2].

93 % Ar i 7 % CO<sub>2</sub> – najčešće korištena mješavina kod prijenosa metala štrcajućim lukom i impulsnim strujama. Mali udio ugljikovog dioksida povećava toplinsku vodljivost uz zanemarivo povećanje rasprskavanja [2].

97.5 % Ar i 2.5 % CO<sub>2</sub> – koristi se prilikom prijenosa materijala štrcajućim prijenosom i impulsnim strujama kod nelegiranih čelika. Zbog smanjene toplinske vodljivosti i kontroliranog prijenosa dodatnog materijala ova plinska mješavina je pogodna za zavarivanje tankih limova velikim brzinama što je značajno kod automatskog postupka zavarivanja.

50 % Ar i 50 % CO<sub>2</sub> – mješavina koja omogućava visoki unos topline i dobru penetraciju. Rezultira dobrim kvašenjem i niskom viskoznošću taline te dobrim izgledom zavara. Zbog značajnog udjela CO<sub>2</sub> u mješavini zaštitnog plina koji povećava toplinsku vodljivost postoji mogućnost od protaljivanja tijekom zavarivanja tankostjenih materijala.

#### **2.5.4. Trokomponentne plinske mješavine argona, ugljikovog dioksida i kisika**

Trokomponentne plinske mješavine uobičajene su kod zavarivanja ugljičnih i nehrđajućih čelika te rjeđe kod legura nikla [2] .

Analiziranjem efekta različitih pojedinih plinova moguće je proizvesti mješavinu koja će zadovoljiti sve zahtjeve za većinu materijala korištenih kod zavarivanja.

Pri zavarivanju čistim argonom zamjetno je nestabilno ponašanje električnog luka, a kao alternativa je primijenjena mješavina argona i relativno malog udjela ugljikovog dioksida. Funkcija ugljikovog 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<sub>2</sub> rezultiraju bitnim odstupanjima u ponašanju električnog luka i kvaliteti navarenog sloja [4]. Kod tankostjenih radnih komada kisik u mješavini zaštitnog plina poboljšava stabilnost luka i smanjuje potrebnu jakost struje što omogućuje kratki i lako upravljivi električni luk i doprinosi smanjenju prekomjernog protaljivanja i izobličenja zbog smanjenog unosa topline u području zavara [1].

Argon s udjelom (5 - 10 ) % CO<sub>2</sub> i (1 - 3 ) % O<sub>2</sub> služi za zavarivanje nehrđajućeg čelika svih debljina kod prijenosa metala kratkim spojevima, štrcajućim lukom te impulsnim strujama. Ovakva mješavina zaštitnog plina rezultira dobrim mehaničkim svojstvima zavarenih spojeva [10].

90 % Ar + 8 % CO<sub>2</sub> + 2 % O<sub>2</sub> je mješavina zaštitnog plina korištena kad je potrebno smanjiti rasprskavanje jer visoki sastav inertnog plina smanjuje rasprskavanje [2].

MAG zavarivanje je postupak s međusobno ovisnim parametrima, pa je zato odabir zaštitnog plina uvijek potrebno uskladiti s osnovnim materijalom, dodatnim materijalom, načinom zavarivanja (ručno ili automatski), vrsti spoja, položaju, načinu prijenosa materijala, brzini zavarivanja te željenom efektivnom toplinskom unosu.

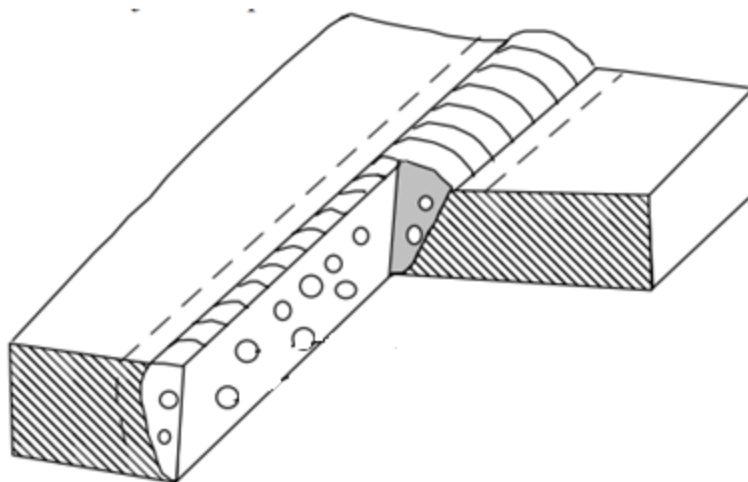
## 2.6. Poroznost – najčešći tip pogreške kod MAG zavarivanja

Poroznost (pore) su mjesta u zavaru ispunjena stlačenim plinom, promjer pora varira od mikroskopskih do milimetarskih. Nastaju jer metal u rastopljenom stanju može kemijski reagirati s plinom. Tijekom hlađenja taline plinovi u obliku mjehurića naglo izranjaju, ali ponekad je brzina skrućivanja veća od izranjanja mjehurića koji onda ostaju u zavaru.

Pore u zavaru utječu na čvrstoću zavarenog spoja ovisno o obliku, broju i mjestu poroznosti. Tako na primjer u dinamički opterećenoj konstrukciji poroznost u zavarenom spoju ima štetan utjecaj jer s vremenom dolazi do pukotina i povezivanja pojedinih pora, naročito kad su jedna do druge.

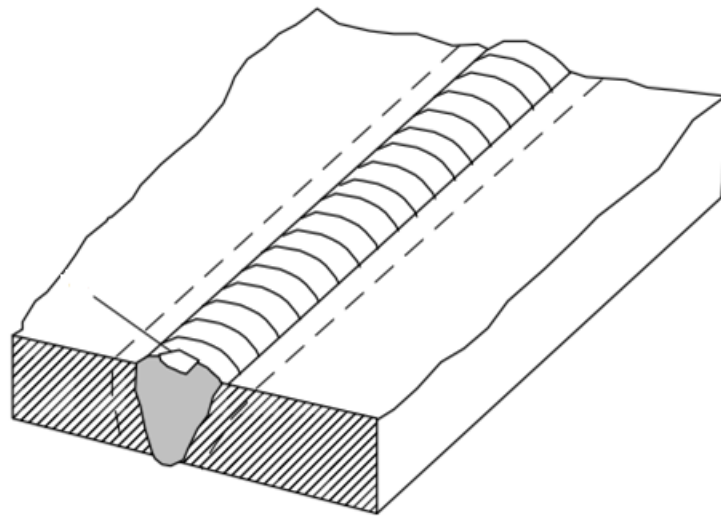
Najčešći uzročnici poroznosti u zavaru su slaba zaštita postupka zbog loše mješavine zaštitnog plina ili stranih utjecaja (strujanje okolnog zraka) te nečistoća i vlaga u dodatnom materijalu ili na mjestu zavara (hrđa, okujina, čestice oksida).

Najčešći indikator greške su pore na površini zavara čije veličine ovise o količini otopljenog plina i brzini skrućivanja, ali ponekad se ne moraju vidjeti na površini kao što prikazuju slika 2.20 i slika 2.21.



Slika 2.20 Pore jednako raspoređene u metalu zavara [11]





**Slika 2.21 Površinske pore[11]**

#### *2.6.1.1. Hladne pukotine u zavaru*

Hladne pukotine nastaju prilikom hlađenja zavarenog spoja na temperaturama ispod 250°C [1], a mogu nastati i do dva dana nakon zavarivanja. Hladne pukotine mogu nastati u zavaru i najčešće nastaju zbog same sklonosti materijala prema zakaljivanju, postojanja naprezanja ili povećanog udjela vodika. Hladne pukotine moguće je uočiti vizualnim ispitivanjem ako se nalaze na površini ili ultrazvučnim ispitivanjima ako su pukotine nastale u unutrašnjosti zavara.

## 2.7. Unos topline u zavar

Unos topline u zavar predstavlja količinu električne energije koja se unosi u materijal koji se zavaruje [1]. Slika 2.22 prikazuje utjecaj unesene topline na brzinu ohlađivanja taline.



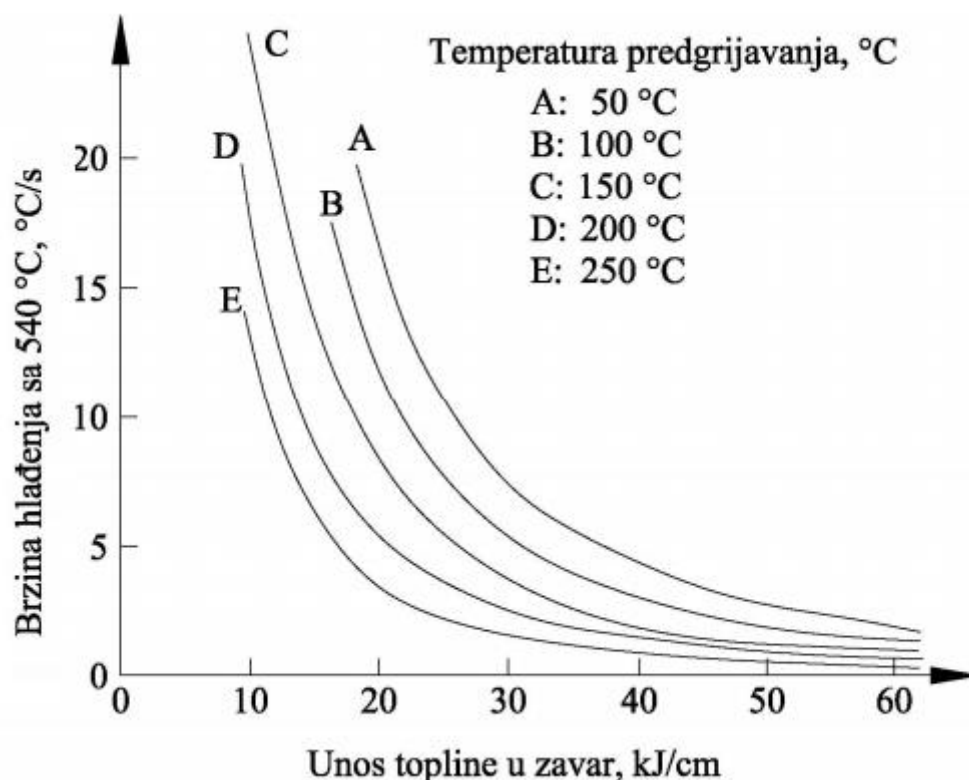
Slika 2.22 Utjecaj unesene topline na brzinu ohlađivanja [14]

Manja količina unesene topline u zavar rezultira većom brzinom hlađenja. Što je više energije u luku, dolazi do taljenja veće količine osnovnog i dodatnog materijala po jedinici duljine [15]. S obzirom na to da unos topline direktno utječe na svojstva zavara potrebno je odabrati optimalni unos topline kako bi se osigurala željena kvaliteta spoja. Unos topline moguće je kontrolirati plinskim mješavinama, različitim plinskim mješavinama moguće je dobiti različite unose topline tako ovisno o toplinskoj vodljivosti zaštitnog plina dobiti različita mehanička svojstva zavara [2].

## 2.8. Predgrijavanje osnovnog materijala

Temperatura zavara između dva prolaza i temperatura predgrijavanja vrlo su bitni čimbenici pri zavarivanju. Predgrijavanje je zagrijavanje osnovnog materijala na neku predodređenu temperaturu prije početka samog zavarivanja, a provodi se jer smanjuje brzine hlađenja zavara i osnovnog materijala s ciljem izbjegavanja tvrdih faza u mikrostrukтури, lakše otplinjavanje vodika iz zavarenog spoja, smanjuje naprezanja u zavaru i osnovnom materijalu uslijed stezanja materijala pri hlađenju, a pojedine vrste čelika se predgrijavaju na temperaturu iznad kritične temperature pri kojima se pojavljuje krhki lom.

Temperatura predgrijavanja se bira na temelju debljine osnovnog materijala, vrsti dodatnog materijala kao i kemijskom sastavu osnovnog materijala. Slika 2.23 prikazuje ovisnost unosa topline u zavar i temperature predgrijavanja.



Slika 2.23 Ovisnost temperature predgrijavanja i unosa topline zavarivanja

S nižom temperaturom predgrijavanja uz jednaki unos topline u zavar brzina hlađenja je veća. Temperatura zavara između dva prolaza je razlika početne temperature neposredno prije drugog i svakog sljedećeg prolaza višeslojnog zavara, a njoj ovise mehanička svojstva zavarenog spoja. Više temperature smanjuju čvrstoću.

### 3. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu rada spojena je sva potrebna mjerna oprema za snimanje dinamičke karakteristike odabranog izvora struje. Snimljene su dinamičke karakteristike za različite načine prijenosa metala kao i zaštitne plinske mješavine. Cilj je pronaći utjecaj zaštitnih plinova i načina prijenosa dodatnog materijala u električnom luku na valne oblike struje i napona tijekom zavarivanja.

Eksperimentalni dio rada izveden je u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Ispitivanje se vršilo za tri različite mješavine zaštitnog plina i četiri različita načina prijenosa materijala.

#### 3.1. Izvor struje za zavarivanje Welbee P500L

U eksperimentalnom dijelu korišten je izvor struje za zavarivanje Welbee P500L čije specifikacije prikazuje tablica 2.

**Tablica 3.1** Specifikacije P500L izvora struje za zavarivanje

Ulazni napon, V	400 +/- 15 %
Broj faza	3
Ulazna snaga, kVA	25
Radni ciklus, %	DC = 60 - 100 / Pulse = 80
Struja zavarivanja, A	DC = 500 - 410 / Pulse = 400
Opteretni napon, V	DC = 39 / Pulse = 34
Raspon struje, A	DC = 30 - 500 / Pulse = 30 - 400
Raspon izlaznog napona, V	DC = 12 - 39 / Pulse = 12 - 34
Maksimalni napon praznog hoda, V	80
Masa, kg	83
Dimenzije W x D x H, mm	395 / 710 / 592

Uređaj korišten u laboratoriju prikazan je na slici 3.1.



**Slika 3.1 Welbee P500L izvor struje za zavarivanje**

Uređaj posjeduje mikroprocesorsku kontrolu za sve konvencionalne načine prijenosa materijala u električnom luku kod MAG zavarivanja.

### 3.2. Tektronix TDS 210

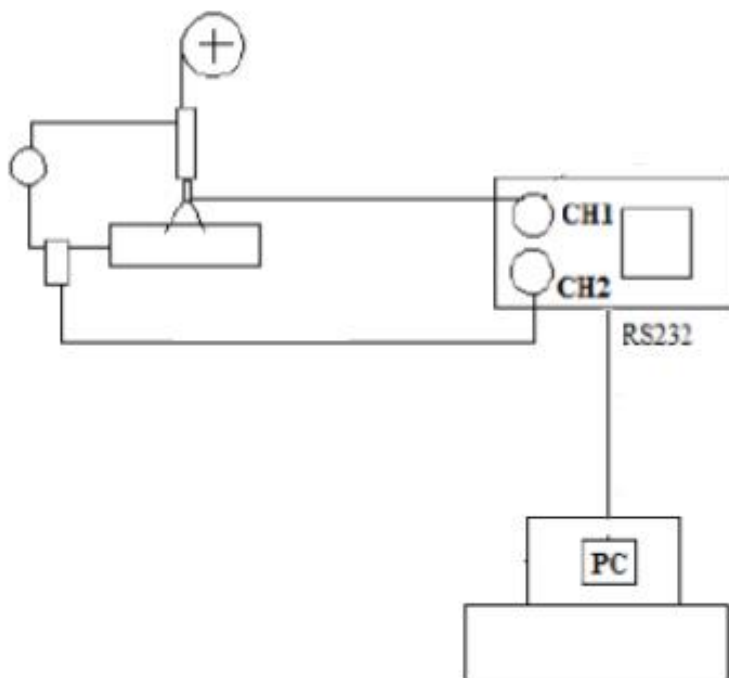
Promatrani su valni oblici pomoću dvokanalnog osciloskopa (TETRONIX TDS 2002) su prebačeni na računalo pomoću odgovarajućeg softvera.

Tektronix TDS 210 je dvokanalni osciloskop, na kanalu 1 (CH1) sniman je napon, a na kanalu 2 (CH2) snimana je struja zavarivanja. Može mjeriti na širokom rasponu frekvencija i omogućuje jednostavno korištenje. Slika 3.2 prikazuje TDS 210 dvokanalni osciloskop.



Slika 3.2 Tetronix TDS 210 dvokanalni osciloskop

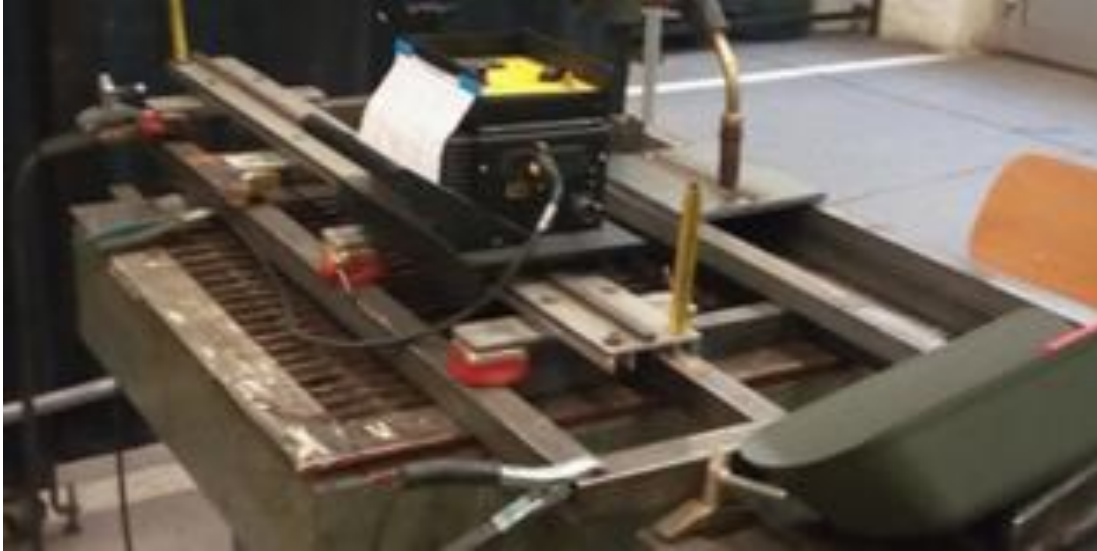
Slika 3.3 prikazuje shemu spoja osciloskopa s izvorom struje i računalom. Računalo se s osciloskopom spaja pomoću RS232 analognog kabela, a strujna kliješta su na sondu priključena preko BNC stezaljka.



**Slika 3.3** Shema spoja osciloskopa, izvora struje i računala

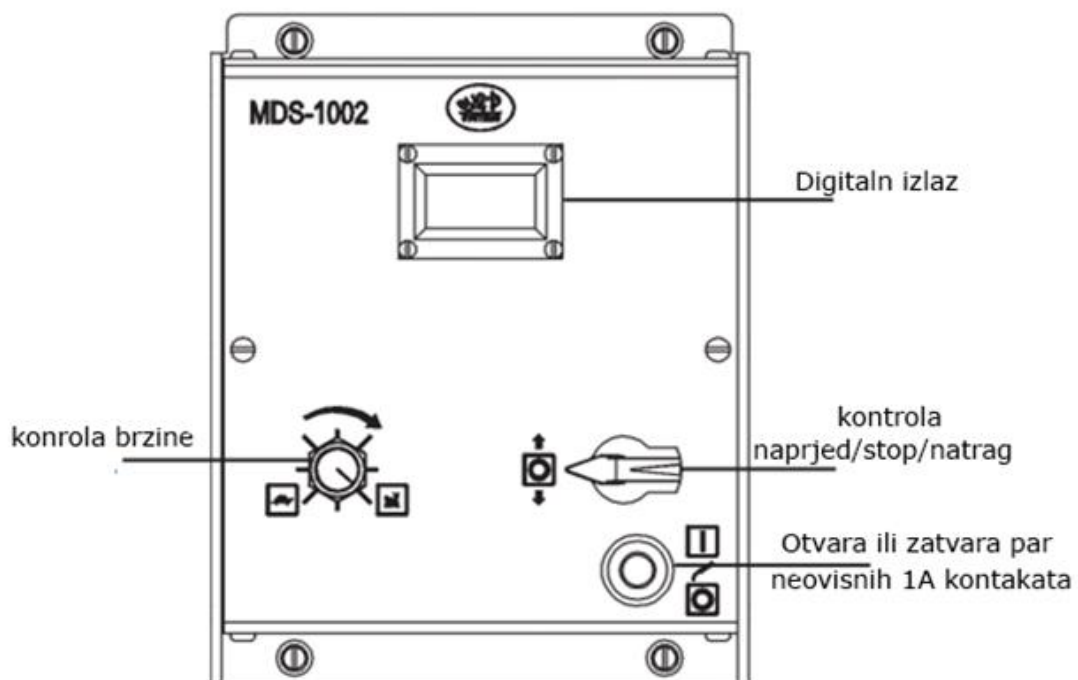
### 3.3. Modularni sustav pogona MDS – 1002

Modularni sustav pogona MDS – 1002 tvrtke Bug-O System prikazan na slici 3.4 koristi se za automatizirano zavarivanje s konstantnim smjerom i brzinom zavarivanja.



Slika 3.4 Modularni sustav pogona MDS – 1002

MDS 1002 dozvoljava kontrolu smjera i brzine za kontinuirano rezanje i zavarivanje.



Slika 3.5 Kontrolna ploča MDS -1002 modularnog sustava za zavarivanje



Slika 3.6 prikazuje kontrolnu ploču modularnog sustava pogona, digitalni ekran ovisno o smjeru kretanja prikazuje zadanu ili mjerenu brzinu. Uređaj omogućuje brzinu u rasponu od 5,1 cm/min do 304,8 cm/min.



**Slika 3.6 Kontrolna ploča MDS -1002 modularnog sustava za zavarivanje**

### **3.4. Strujna kliješta**

Za mjerenje valnih oblika struje koriste se strujna kliješta (slika 3.7) PR-1030 prijenosnog omjera 1 mV/A čiji izlaz se spaja na osciloskop.



**Slika 3.7 Strujna kliješta PR-1030**

### 3.5. Zaštitni plin C18

U prvom dijelu eksperimenta je korišten zaštitni plin *Ferroline C18 M21*, plinska mješavina s 82 % Ar i 18 % CO<sub>2</sub>. Koristi se za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika, širokog raspona debljina. Slika 3.8 prikazuje spremnik plina korišten u eksperimentu.



Slika 3.8 Spremnik C18 Ferroline zaštitnog plina

### 3.6. Zaštitni plin C12X2

Drugi plin korišten u eksperimentu je *Ferroline C12X2*, plinska mješavina s 86 % Ar, 12 % CO<sub>2</sub> i 2 % O<sub>2</sub>. Koristi se za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika automatskim i poluautomatskim MAG zavarivanjem. Posebno je pogodan za zavarivanje debljih ploča. Slika 3.9 prikazuje spremnik plina korišten u eksperimentu.



Slika 3.9 Spremnik Ferroline C12X12 zaštitnog plina

### 3.7. Zaštitni plin C6X1

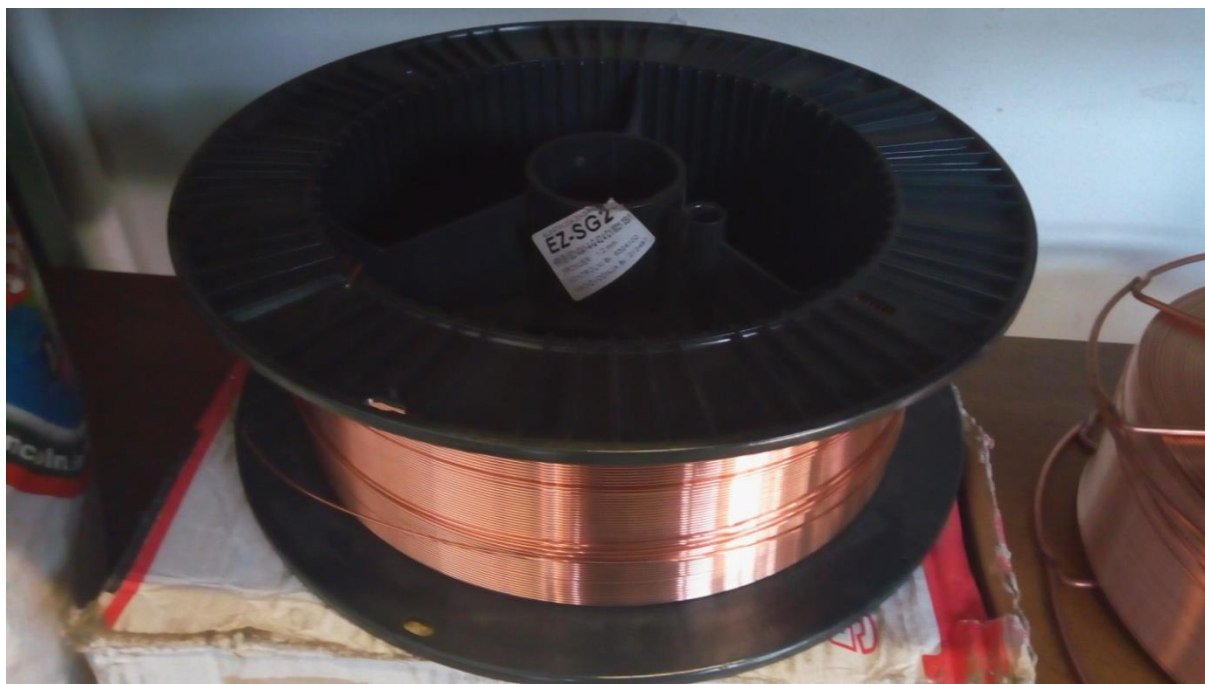
Treći plin korišten u eksperimentu je Ferroline C6X1, plinska mješavina s 93 % Ar, 6 % CO<sub>2</sub> i 1 % O<sub>2</sub>. Koristi se za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika automatskim i poluautomatskim MAG zavarivanjem. Posebno je pogodan za zavarivanje tankih i srednje debelih ploča. Slika 3.10 prikazuje spremnik plina korišten u eksperimentu.



Slika 3.10 Spremnik C6X1 zaštitnog plina

### 3.8. Dodatni materijal

Dodatni materijal korišten prilikom eksperimentalnog dijela je EZ SG2 pobakrena žica proizvođača elektroda Zagreb za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika čvrstoće do 590 N/mm<sup>2</sup> promjera 1,2 mm prikazana na slici 3.11.



**Slika 3.11** Kolut SG2 pobakrene žice

Ostale specifikacije dodatnog materijala prikazane su slikom 3.12

## EZ - SG 2

### NORME

HRN EN ISO	AWS / ASME	DIN	W. Nr.
14341-A	SFA-5.18	8559	
G 42 4 C/M 3Si1	ER70S-6	SG 2	1.5125

### SVOJSTVA I PODRUČJE PRIMJENE

Pobakrena ili pobrončana žica za zavarivanje u zaštitnoj atmosferi plina CO<sub>2</sub> ili mješavine plinova Ar/CO<sub>2</sub>. Za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika čvrstoće do 590 N/mm<sup>2</sup>.

Grupa čelika	HRN (stari)	DIN (W. Nr.)		HRN / EN / ISO
Konstruktivski čelici	Č 0261 do Č 0545	St 33 (1.0035) do St 52-2N (1.0050)		S 185 do E 295 Fe 310-0 do Fe 490-2
Kotlovski čelici	Č 1202 Č 1204 Č 3133 Č 3105	HI (1.0345) 17Mn4 (1.0481)	HII (1.0425) 19Mn6 (1.0473)	P235GH P265GH P295GH P355GH
Čelici za cijevi	Č 1212 do Č 3100	St 35.4 (1.0309) do St 52.4 (1.0581) StE 210.7 (1.0307) do StE 360.7 (1.0582)		DX55D do P355T2 L210 do L360NB
Brodski čelici	A, B, D, E AH 32 do EH 36	A, B, D, E AH 32 do EH 36		
Sitnozrnati čelici	ČRO 250 do ČRO 350 ČRV 250 do ČRV 350	StE 285 (1.0486) WStE 285 (1.0487)	StE 355 (1.0562) WStE 355 (1.0565)	P275N P355N P275NH P355NH
Čelični ljev	ČL 0300 do ČL 0500	GS-38 (1.0416) do GS-52 (1.0551)		C18D do S355JRC

### MEHANIČKA SVOJSTVA ČISTOG METALA ZAVARA

R <sub>el</sub> N/mm <sup>2</sup>	R <sub>m</sub> N/mm <sup>2</sup>	A <sub>5</sub> %	KV (-40°C) J
> 430	500 - 640	> 22	≥ 47

### ORIJENTACIJSKI KEMIJSKI SASTAV ŽICE

	C	Mn	Si	Cu
%	0,06 - 0,13	1,4 - 1,6	0,7 - 1,0	≤ 0,3

### ZAŠTITNI PLIN

C1 ili M21

### PAKIRANJE

Promjer žice mm	Namotaj
0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,6	Slobodan (S-L); žica do žice (S-S)

1 kg - plastični kolut (promjer žice 0,6 i 0,8 mm)

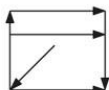
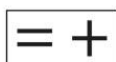
5 kg - plastični kolut (promjer žice 0,6 i 0,8 mm)

15 kg - plastični (S-L ili S-S) ili žičani kolut (S-S) (promjer žice 0,8; 1,0; 1,2 i 1,6 mm)

250 kg - bačva (promjer žice 0,8; 1,0 i 1,2 mm)

### ODOBRENJA

ABS (3YSA); BV (SA 3Y M); CRS (3YS); DB; DNV (IIIYMS); GL (3YS); LR (3S,3YS); RINA (3YS); TÜV



Slika 3.12 Specifikacije SG2 dodatnog materijala korištenog u eksperimentu

### 3.9. Eksperimentalni dio-rezultati

Poglavlje prikazuje izmjerene dinamičke karakteristike za načine prijenosa metala CBT (engl. Controlled bridge transfer), mješoviti način prijenosa, prijenos materijala kratkim spojevima i prijenos materijala štrcajućim električnim lukom uz kombinacije zaštitnih plinova C18, C12X2 i C6X1. Tablica 6 prikazuje brzine zavarivanja u ovisnosti o zaštitnom plinu i načinu prijenosa materijala prilikom provođenja eksperimenta.

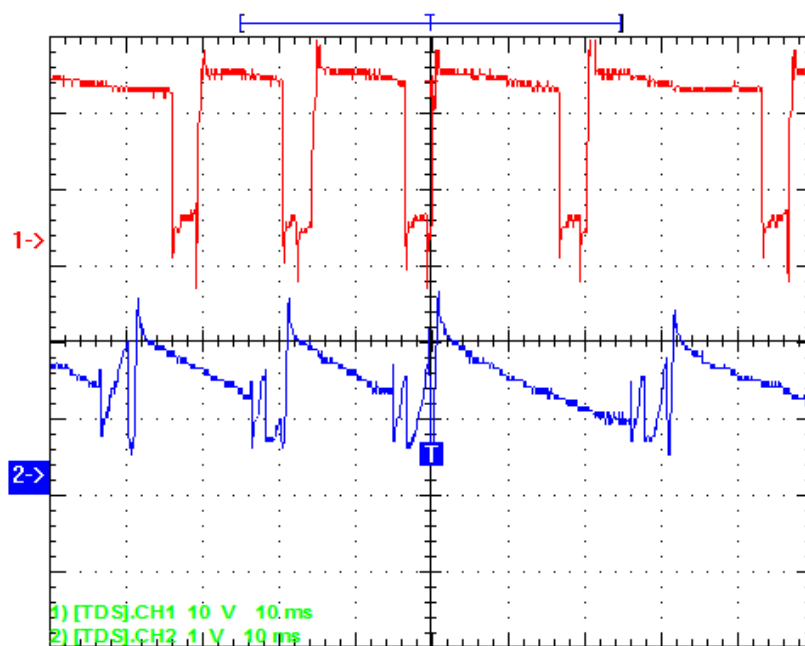
**Tablica 3.2 Brzine zavarivanja u ovisnosti o zaštitnom plinu i načinu prijenosa materijala**

	C18	C6X1	C12X2
CBT	23, cm/min	23, cm/min	23, cm/min
ML	29, cm/min	29, cm/min	29, cm/min
SL	35, cm/min	35, cm/min	35, cm/min
KS	23, cm/min	23, cm/min	23, cm/min

### 3.9.1. C18 zaštitna plinska mješavina

Kod narednih mjerenja korišten je zaštitni plin Ferroline C18 M21, plinska mješavina 82 % Ar i 18 % CO<sub>2</sub>.

Slika 3.13 prikazuje oscilogram dobiven CBT prijenosom metala u zaštiti C18 plinske mješavine.

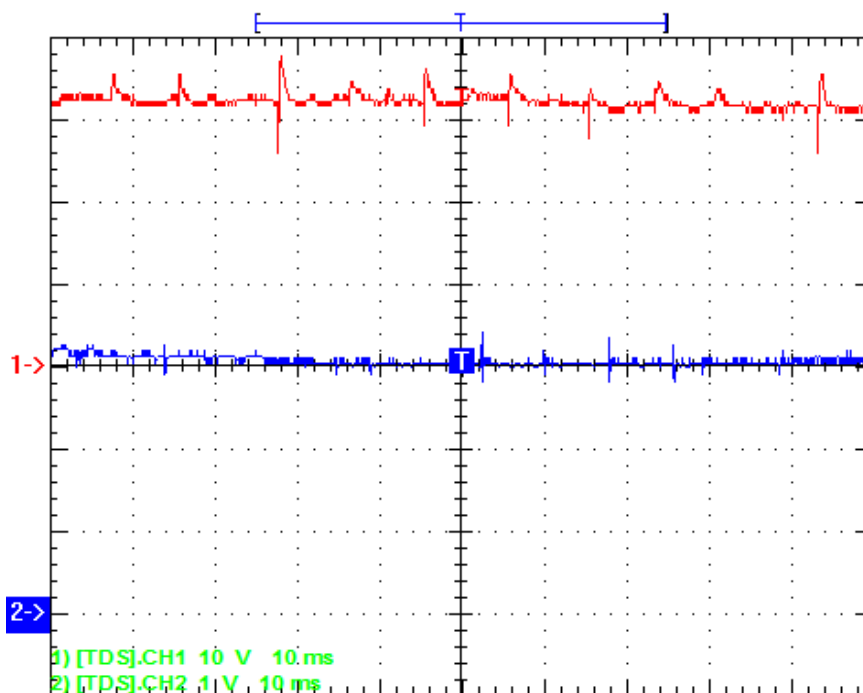


**Slika 3.13 Oscilogram prikazuje vrijednosti jakosti i napona struje tijekom CBT prijenosa metala u zaštiti C18 plinske mješavine**

CBT način prijenosa metala omogućuje mali unos topline i smanjeno rasprskavanje. Smanjeni unos topline postiže se smanjenjem iznosa struje prije ponovnog uspostavljanja električnog luka (slika 3.13).



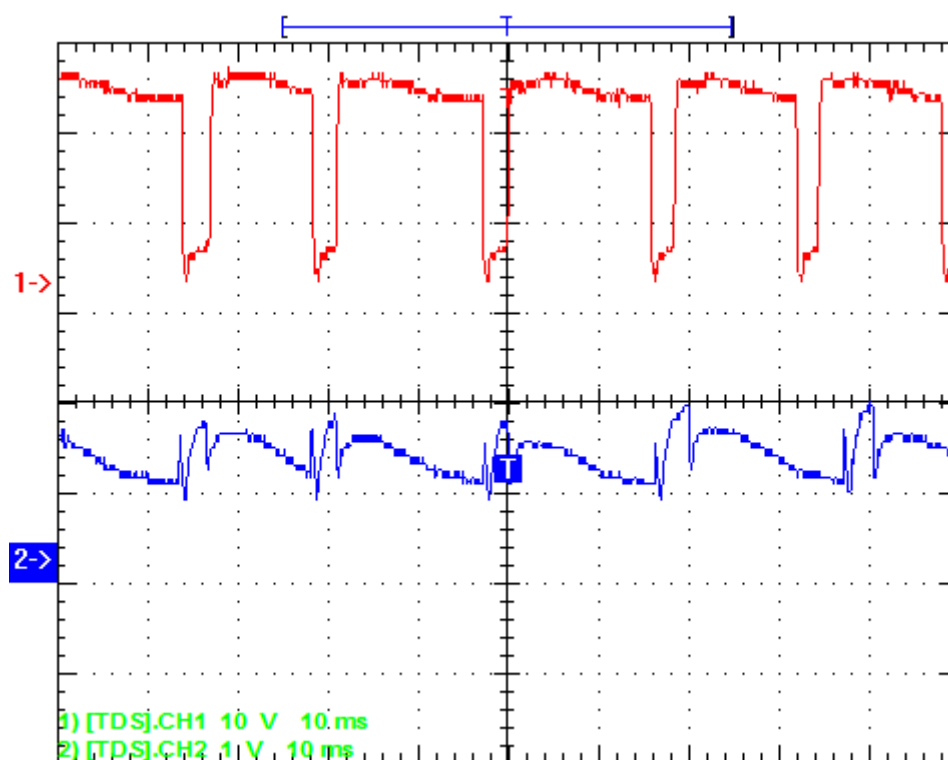
Slika 3.14 prikazuje oscilogram dobiven tijekom prijenosa metala štrcajućim lukom u zaštiti C18 plinske mješavine.



**Slika 3.14 Oscilogram prikazuje vrijednosti jakosti i napona struje tijekom prijenosa metala štrcajućim lukom u zaštiti C18 plinske mješavine**

Uspostavom električnog luka se zbog visoke vrijednosti napona struje javlja i visok električni luk, što dovodi do eliminacije kratkih spojeva, nema propada napona i struje (slika 3.14). Zbog povišenih vrijednosti struje zavarivanja povišen je unos topline i tekuća talina se sporije hladi te je podložnija negativnim utjecajima elemenata iz atmosfere. Ovaj način prijenosa topline podržava plinske mješavine s visokim udjelom argona.

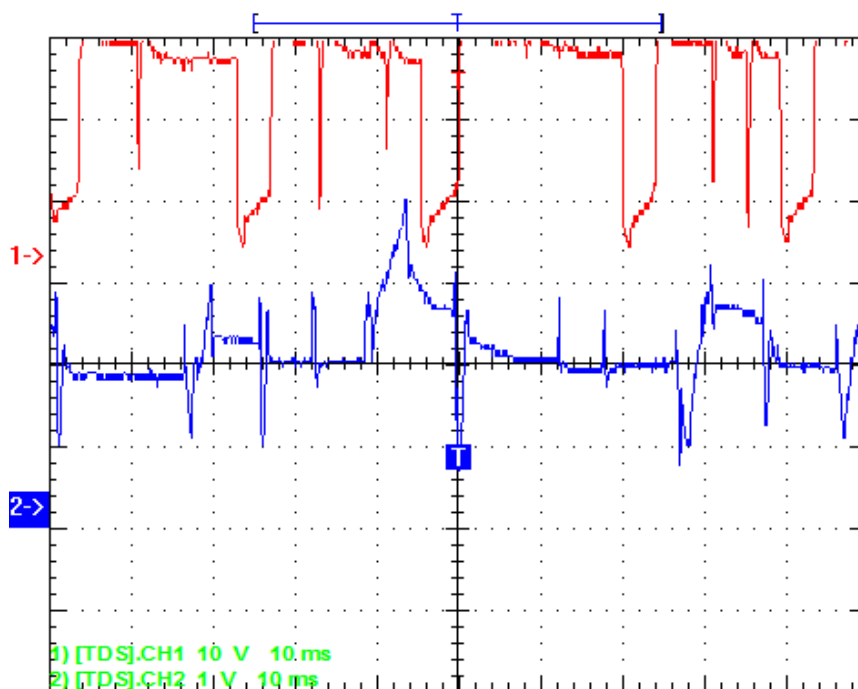
Slika 3.15 prikazuje oscilogram dobiven prijenosom metala kratkim spojevima u zaštiti C18 plinske mješavine.



**Slika 3.15 Oscilogram prikazuje vrijednosti jakosti i napona struje tijekom prijenosa metala kratkim spojevima u električnim lukom u zaštiti C18 plinske mješavine**

Kod prijenosa metala kratkim spojevima kapljica se formira na vrhu elektrode i raste uz održanje luka sve dok se ne spoji s talinom na mjestu zavora. 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. Nakon odvajanja kapljice, električni luk se nanovo uspostavlja pomoću naglog izboja napona te se jakost električne struje smanjuje. Ovakav prijenos materijala zbog niskih parametara struje i napona rezultira malim volumenom taline koja se brzo hladi i pogodan je za zavarivanje tankih limova i korijena zavora kod debljih komada.

Slika 3.16 prikazuje oscilogram dobiven prijenosom metala mješovitim električnim lukom u zaštiti C18 plinske mješavine.



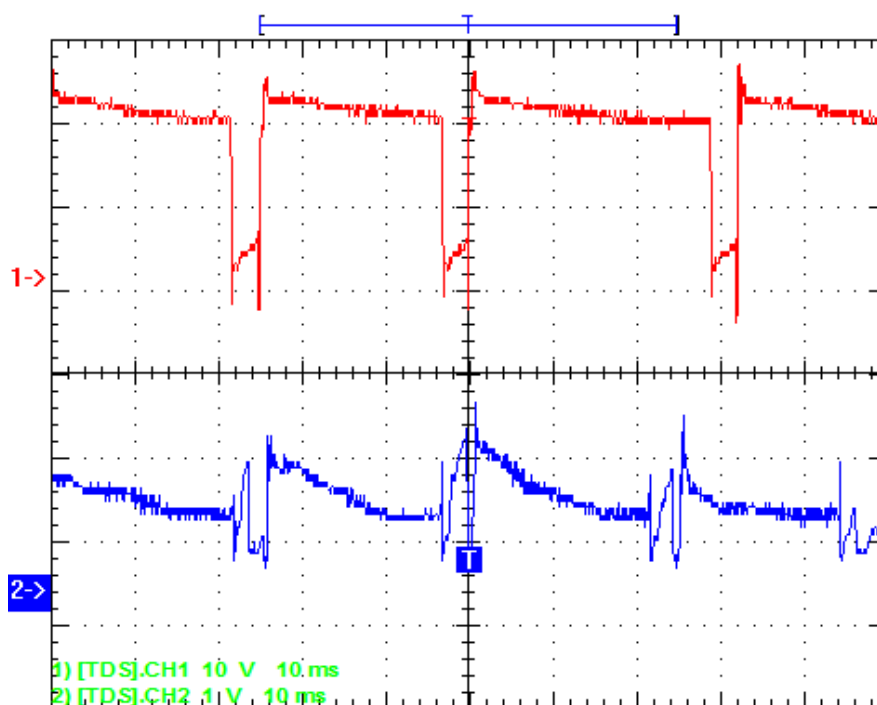
**Slika 3.16 Oscilogram prikazuje vrijednosti jakosti i napona struje tijekom prijenosa metala mješovitim električnim lukom u zaštiti C18 plinske mješavine**

Prijenos metala mješovitim lukom je kombinacija štrcajućeg i kratkog luka s krupnijim kapljicama. 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. Nakon odvajanja kapljice, električni luk se nanovo uspostavlja pomoću naglog izboja napona te se jakost električne struje smanjuje. Zbog korištenja srednje vrijednosti izvora struje i povećanog efekta uklještenja kapljice znatno manjeg promjera se mogu odvojiti i prije nego što dotaknu talinu i time je eliminiran kratki spoj, vrijednost struje i napona poprimaju približno konstantnu vrijednost. Zbog pojave kapljica velikog promjera i povećanog rasprskavanja ovaj način prijenosa se teško kontrolira.

### 3.9.2. C6X1 zaštitna plinska mješavina

Kod narednih mjerenja korišten je zaštitni plin Ferroline C6X1, plinska mješavina 93 % Ar, 6 % CO<sub>2</sub> i 1 % O<sub>2</sub>. Zbog dodanog kisika poboljšana je stabilnost električnog luka, smanjena je površinska napetost taline i poboljšana je jezgra električnog luka. Smanjenje površinske napetosti poboljšava prijenos materijala i izgled zavora.

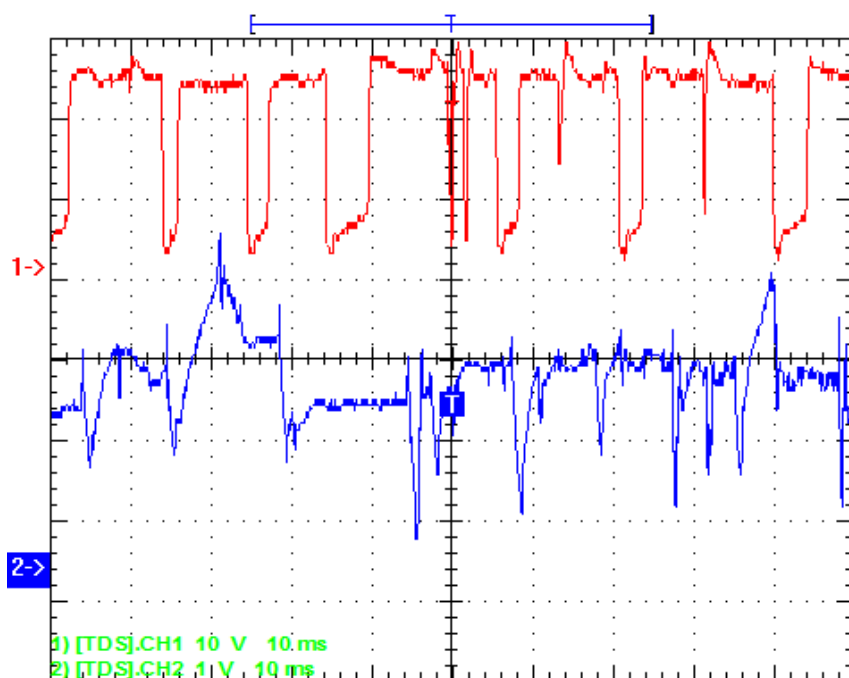
Slika 3.17 prikazuje oscilogram dobiven CBT prijenosom metala u zaštiti C6X1 plinske mješavine.



**Slika 3.17 Oscilogram prikazuje vrijednosti jakosti i napona struje tijekom CBT prijenosa metala u zaštiti C6X1 plinske mješavine**

Smanjeni unos topline postiže se smanjenjem iznosa struje prije ponovnog uspostavljanja električnog luka. Trenutak ponovnog uspostavljanja električnog luka predviđa se mjerenjem napona zavarivanja (slika 3.17). Nakon uspostavljanja kratkog spoja vrijednost napona pada u ovisnosti o jakosti struje kako bi se lakše kontrolirala pojava rasprskavanja.

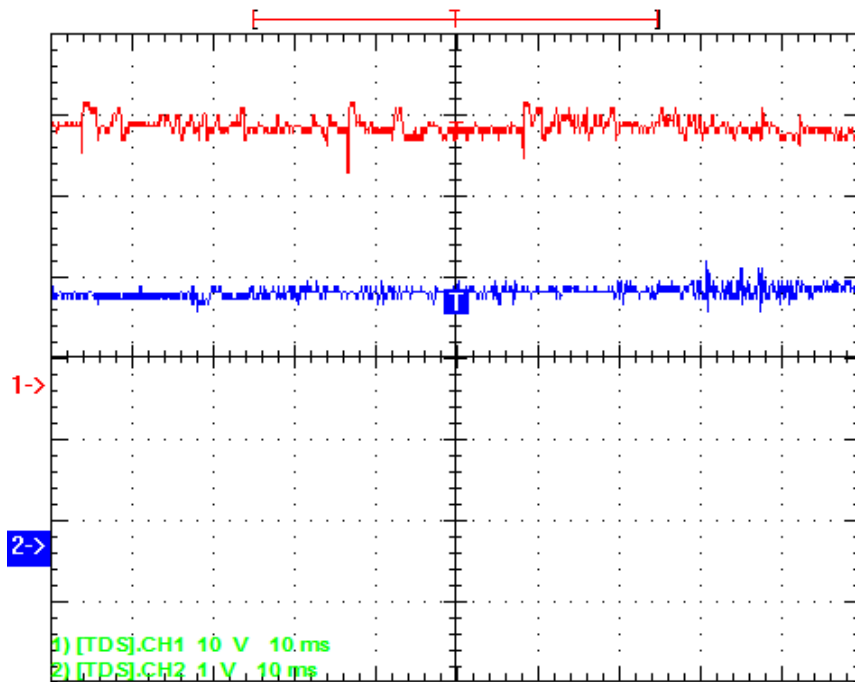
Slika 3.18 prikazuje oscilogram dobiven prijenosom metala mješovitim električnim lukom u zaštiti C6X1 plinske mješavine.



**Slika 3.18 Oscilogram prikazuje vrijednosti jakosti i napona struje tijekom prijenosa metala mješovitim prijenosom u zaštiti C6X1 plinske mješavine**

Uslijed kratkog spoja, dolazi do prekida luka, napon trenutno pada na nulu te se jakost struje naglo poveća. Nakon odvajanja kapljice, električni luk se nanovo uspostavlja pomoću naglog izboja napona te se jakost električne struje smanjuje.

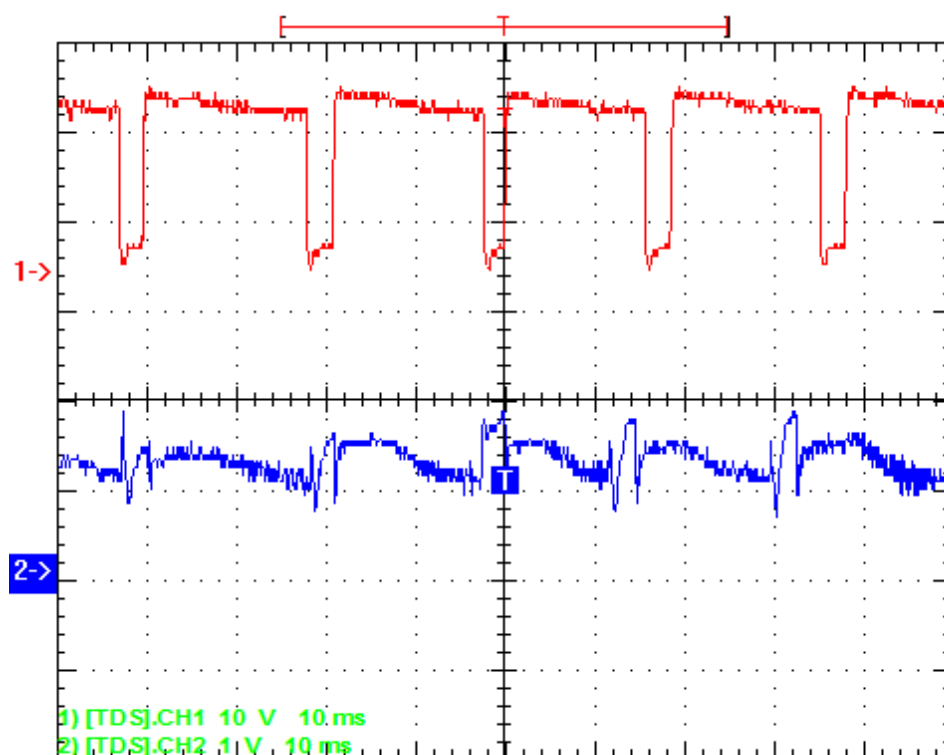
Slika 3.19 prikazuje oscilogram dobiven prijenosom metala štrcajućim lukom u zaštiti C6X1 plinske mješavine.



**Slika 3.19** Oscilogram prikazuje vrijednosti jakosti i napona struje tijekom prijenosa metala štrcajućim lukom u zaštiti C6X1 plinske mješavine

Zbog povišenih vrijednosti struje zavarivanja javlja se visok električni luk, što dovodi do eliminacije kratkih spojeva, nema propada napona i struje (slika 3.19).

Slika 3.20 prikazuje oscilogram dobiven prijenosom metala kratkim spojevima u zaštiti C6X1 plinske mješavine.



**Slika 3.20 Oscilogram prikazuje vrijednosti jakosti i napona struje tijekom prijenosa metala kratkim spojevima električnim lukom u zaštiti C6X1 plinske mješavine**

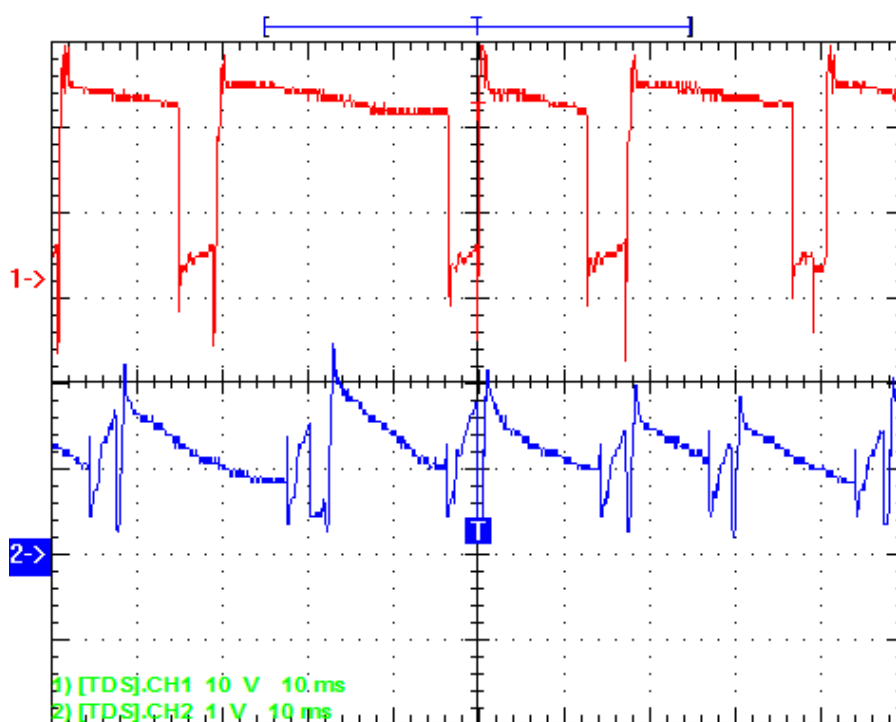
Na vrhu elektrode formira se kapljica i raste uz održanje luka sve dok se ne spoji s talinom na mjestu zavara. Tad nastaje kratki spoj, uslijed čega dolazi do prekida luka, napon trenutačno pada na nulu, a jakost struje se naglo povećava. Nakon odvajanja kapljice, električni luk se nanovo uspostavlja pomoću naglog izboja napona te se jakost električne struje smanjuje.

### 3.9.3. C12X2 zaštitna plinska mješavina

Kod narednih mjerenja korišten je zaštitni plin *Ferroline C12X2*, plinska mješavina 86 % Ar, 12 % CO<sub>2</sub> i 2 % O<sub>2</sub>. Zbog kisika je znatno poboljšana stabilnost električnog luka, smanjena je površinska napetost, što u konačnici poboljšava izgled zavora.

Princip prijenosa metala u električnom luku definira osnovni izgled oscilograma. Promjena zaštitnog plina nema velikog izražaja u izgledu valnog oblika struje i napona u oscilogramu.

Slika 3.21 prikazuje oscilogram dobiven CBT načinom prijenosa metala u zaštiti C12X2 plinske mješavine.

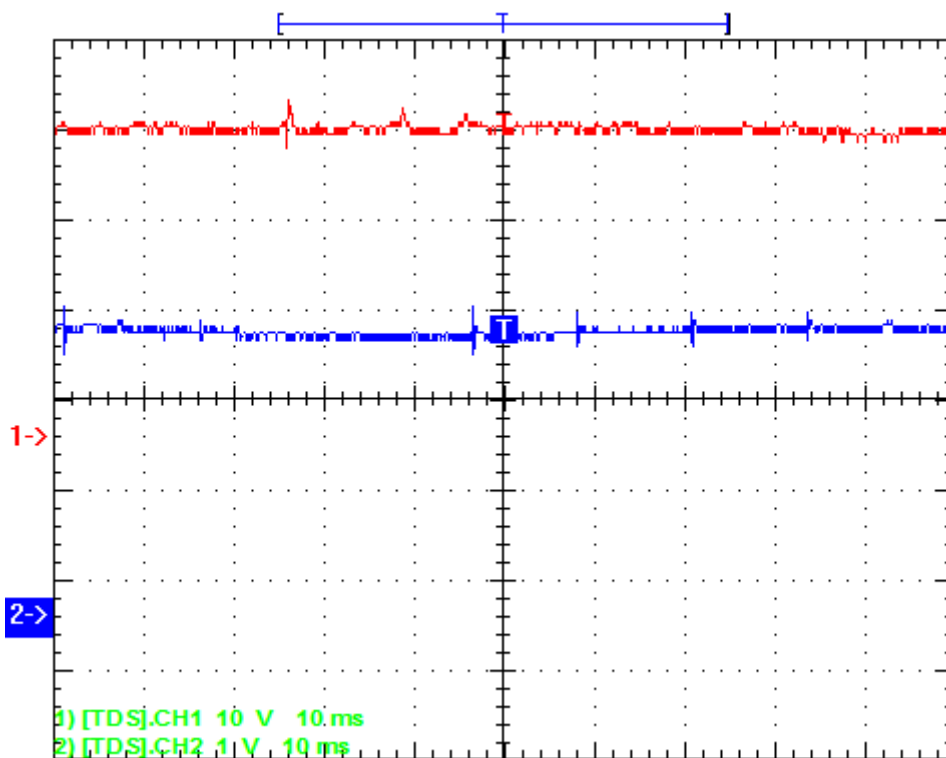


Slika 3.21 Oscilogram prikazuje vrijednosti jakosti i napona struje tijekom prijenosa metala CBT načinom prijenosa u zaštiti C12X2 plinske mješavine

Smanjenjem iznosa struje postiže se smanjeni unos topline prije ponovnog uspostavljanja električnog luka. Kako bi se lakše kontrolirala pojava rasprskavanja, nakon uspostavljanja kratkog spoja vrijednost napona pada u ovisnosti o jakosti struje.



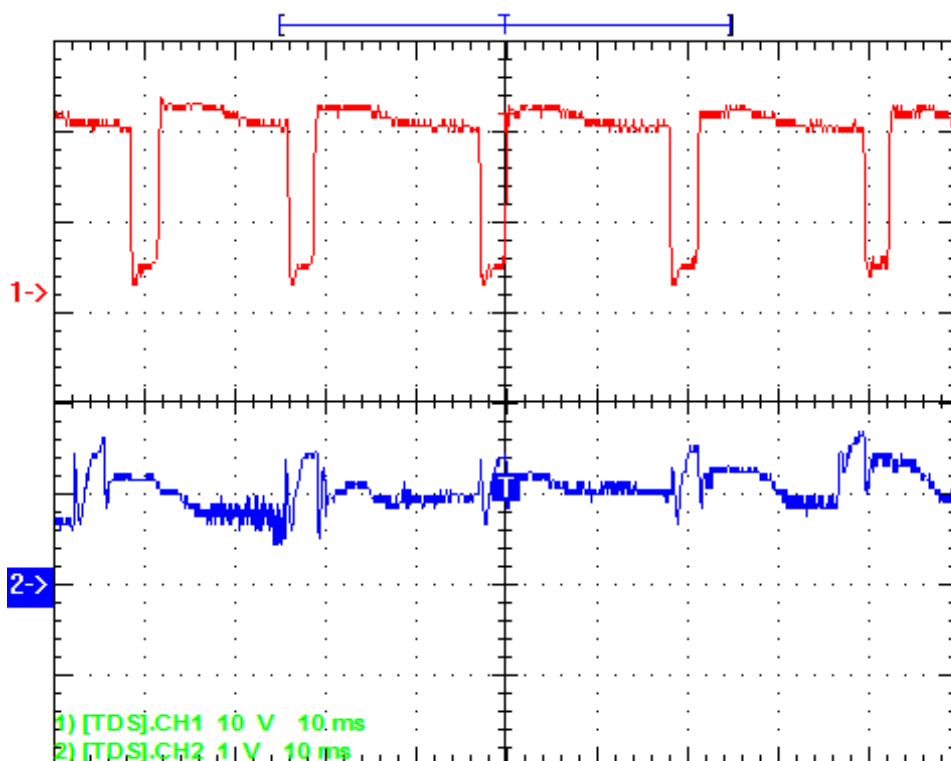
Slika 3.22 prikazuje oscilogram dobiven prijenosom metala štrcajućim lukom u zaštiti C12X2 plinske mješavine.



**Slika 3.22 Oscilogram prikazuje vrijednosti jakosti i napona struje tijekom prijenosa metala štrcajućim lukom u zaštiti C12X2 plinske mješavine**

Zbog povišenih vrijednosti struje zavarivanja javlja se visok električni luk, što dovodi do eliminacije kratkih spojeva, nema propada napona i struje (slika 3.22).

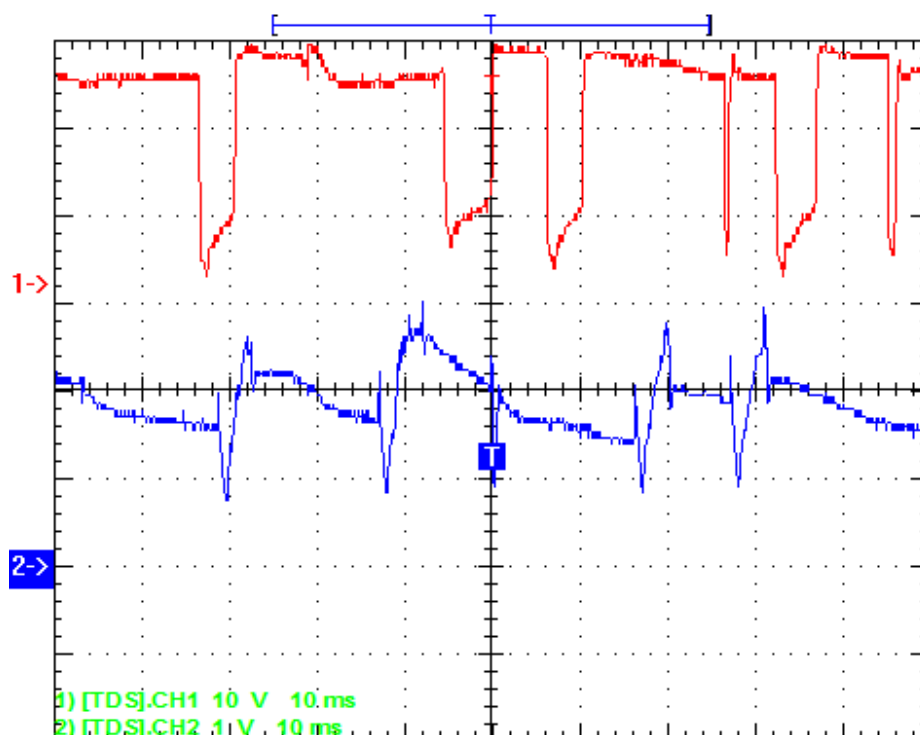
Slika 3.23 prikazuje oscilogram dobiven prijenosom metala kratkim spojevima u zaštiti C12X2 plinske mješavine.



**Slika 3.23 Oscilogram prikazuje vrijednosti jakosti i napona struje tijekom prijenosa metala kratkim spojevima električnim lukom u zaštiti C12X2 plinske mješavine**

Na vrhu elektrode formira se kapljica koja raste uz održanje luka sve dok se ne spoji s talinom na zavaru. Tad nastaje kratki spoj, uslijed čega dolazi do prekida luka, napon trenutačno pada na nulu, a jakost struje se naglo povećava. Nakon odvajanja kapljice, električni luk se nanovo uspostavlja pomoću naglog izboja napona te se jakost električne struje smanjuje.

Slika 3.24 prikazuje oscilogram dobiven prijenosom metala mješovitim električnim lukom u zaštiti C12X2 plinske mješavine.



**Slika 3.24 Oscilogram prikazuje vrijednosti jakosti i napona struje tijekom prijenosa metala mješovitim električnim lukom u zaštiti C12X2 plinske mješavine**

Kod nastanka kratkog spoja, uslijed čega dolazi do prekida električni luka, napon trenutačno pada na nulu, a jakost struje se naglo poveća. Nakon odvajanja kapljice, električni luk se nanovo uspostavlja pomoću naglog izboja napona te se jakost električne struje smanjuje. Zbog korištenja srednje vrijednosti izvora struje i povećanog efekta uklještenja kapljice znatno manjeg promjera se mogu odvojiti i prije nego što dotaknu talinu i time je eliminiran kratki spoj, vrijednost struje i napona poprimaju približno konstantnu vrijednost. Zbog pojave kapljica velikog promjera i povećanog rasprskavanja ovaj način prijenosa se teško kontrolira.

#### **4. ZAKLJUČAK**

MAG postupak zavarivanja je zbog svoje široke primjene u industriji podložan kontinuiranom poboljšanju kako bi se smanjili troškovi proizvodnje i povećala brzina i kvaliteta zavara. Kroz ovaj rad predstavljeni su osnovni pojmovi, načela i značajke tradicionalnog MAG zavarivanja koje je potrebno razmotriti i istaknuti. Sljedeći korak su znatno kompliciranije teme koje najčešće uvode potrebu potpune automatizacije i robotiziranog zavarivanja. Sofisticiranija oprema potrebna za automatiziranje postupka uvodi nove zahtjeve (potrebna veća stabilnost električnog luka, postoji zahtjev automatskog sustava kontrole itd.), ali omogućava postizanje kvalitete kakva s konvencionalnom opremom i postupcima nije moguća.

U eksperimentalnom dijelu rada mjereni su struja i napon u ovisnosti o načinu prijenosa materijala i vrsti zaštitnog plina kod MAG zavarivanja. Rezultati se podudaraju s teorijskim pretpostavkama uz zanemarive razlike koje postoje zbog korištenja realne opreme i nesavršenih uvjeta što se teoriji često zanemaruje. Kontinuirano istraživanje i daljnji rad potreban je u području materijala kako bi se omogućilo pridruživanje zahtjevnijih materijala s većim razmakom.

## LITERATURA

- [1] John Norrish, Advanced welding processes, Cambridge 1997.
- [2] [http://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable\\_MIGGMAWires-SuperArc-SuperArcL-56/c4200.pdf](http://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_MIGGMAWires-SuperArc-SuperArcL-56/c4200.pdf) , dostupno 5. 8. 2017.)
- [3] T. Mäkima, Kemppi Pronews , Impact of cable length on welding arc
- [4] Garašić I. Kožuh Z., Kralj S., Tomić T., Glogović Z, PRIMJENA IZMJENIČNE STRUJE KOD MAG NAVARIVANJA LEGURE INCONEL 625, Fakultet strojarstva i brodogradnje
- [5] Kožuh Z., Garašić I., Priručnik iz kolegija strojevi i oprema a zavarivanje, Fakultet strojarstva i brodogradnje 2016.
- [6] Grist J, 1977 ‘Solidstate controls – what solid-state controls can do for welding’, Weld Des Fabric, August.Augustt
- [7] <http://www.wballoys.co.uk/MIG/what-is-mig-welding.html>, dostupno 5. 8. 2017.
- [8] Š. Andrić, S. Kralj: Primjena plinskih mješavina pri automatiziranom i robotiziranom zavarivanju, Zavarivanje, str 271-278, (1987.)
- [9] J.E., Holum, J.R., Chemistry, John Wiley & Sons, 1993. ISBN 0-471-59979-4
- [10] [http://www.esabna.com/euweb/mig\\_handbook/592mig4\\_13.html](http://www.esabna.com/euweb/mig_handbook/592mig4_13.html), dostupno 5.8.2017.
- [11] <http://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar/tii/pitanja.html>, dostupno 5. 8. 2017.
- [12] Norrish J, Hilton D E and Mistry H R, ‘The effect of shielding gas composition in the MAG welding of line pipe Proc 3rd int conf on The Welding and Performance of Pipelines, The Welding Institute, London, 1986.
- [13] .Era, Tatsuo; Ide, Akinobu; Uezono, Toshiro; Ueyama Tomoyuki; Hirata, Yoshinori: Controlled bridge transfer (CBT) gas metal arc process for steel sheet joining, Osaka University, Osaka, Japan, 2011.
- [14] Popović, O.; Burzić, M.; Prokić - Cvetković, R.; Milutinović, Z.: The Effect Of Heat Input On The Weld Metal Toughness Of Surface Welded Joint; 14th International Research/Expert Conference, TMT 2010, Mediterranean Cruise, 11-18 September 2010.
- [15] Suban, M.; Tušek, J...; Vpliv zaštitnih plinova in njihovih mešanica za MIG/MAG varjenje na metalurške in mehanske lastnosti 3.del, Varlina tehnika, str 5-79, 1997.
- [16] Juraga, K., Ljubić, M.; Živčić; Pogreške u zavarenim spojevima, treće izdanje, Zagreb 2007.

- [17] Grubić, K.; Physical relationship between the shielding gas and process stability at MAG welding, EUROJOIN 3, 759-767, Bern 30.03 – 1. 4. 2000.
- [18] Scotti, A., Ponomarev, V., Lucas, W.: A scientific application oriented classification for metal transfer modes in GMA welding; Journal of materials processing technology 212, 1406 - 1413, 2012.

## **PRILOZI**

1 CD-R-disc-PDF verzija završnog rada