

УПРАВЉАЊЕ ПРЕНОСОМ ТОПЛОТЕ И МАСЕ КРОЗ ЗАВАРИВАЧКИ ЕЛЕКТРИЧНИ ЛУК MANAGEMENT TRANSFER OF HEAT AND MASS THROUGH THE WELDING ARC

Д. Добраш¹, М. Марковић², З. Божичковић³, Ж. Петровић⁴

¹Универзитет у Бањој Луци, Машински факултет Бањалука,
Војводе Степе Степановића 73, 78000 Бања Лука, e-mail: dragoslav.dobras@unibl.rs

²Универзитет у Бањој Луци, Машински факултет Бањалука,
Војводе Степе Степановића 73, 78000 Бања Лука, e-mail: milivoj.markovic@yahoo.com

³Универзитет у Источном Сарајеву, Саобраћајни факултет Добој,
Војводе Мишића 52, 74000 Добој, e-mail: zdravko.bozickovic@gmail.com

⁴Универзитет у Источном Сарајеву, Машински факултет Источно Сарајево,
Бука Караџића 30, 71123 Источно Сарајево, e-mail: zpetrovic@bata.gov.ba

Сажетак: Управљање начином стварања, величином и брзином преноса капљице растопљеног врха електродне жице има пресудан утицај на количину пренесене топлоте и масе кроз заваривачки електрични лук. Промјеном количине топлоте унесене у основни материјал мијења се структура завареног споја, што посредно утиче на механичке, технолошке и корозионе особине завареног споја. У раду је дат опис параметара који утичу на начин стварања капљице на врху додатног материјала и начин њеног преноса кроз електрични лук.

Apstrakt: Control how to create, size and speed of droplets of molten the top electrode wires influences the amount of transferred heat and mass transfer through the welding arc. By changing the amount of heat entered the base material is amended Structure of the welded joint, which directly affects the mechanical, technological and corrosion properties of welded joints. The paper gives a description of the parameters that influence the way of creating a droplets of at the top of additional material and method of its transmission through the electric arc.

Кључне ријечи: електрични лук, стварање капљице, течни метал, пренос топлоте и масе
Keywords: electric arc, creating droplets, liquid metal, heat and mass transfer

УВОД

Електрични лук сусреће се од постанка свијета као природна појава неконтролисаног пражњења атмосферског електрицитета (муња) до којег долази при наелектрисању одређеног подручја атмосфере или у случају довољне разлике потенцијала потребне да изврши јонизацију ваздуха и направи га проводником. Муње као вид електричног пражњења најчешће се јавља из олујних облака, а може се појавити у самом облаку, између два облака, између облака и стратосфере, између облака и ваздуха, као и између облака и тла. [1] [2] Муња се појављује у три вида атмосферског пражњења (слика 1.): тракастог (а), лоптастог (б) и пражњења у виду завјесе (ц).



Слика 1. Атмосферско пражњење електрицитета.

Проналаском генератора истосмјерне и наизмјеничне струје почиње њена масовна примјена у науци и индустрији. Електрична струја користи се за: покретање електромотора, стварање магнетних поља и електромагнетних сила на уређајима неротационог дејства, загријавање и исијавање свјетлости.

У одређеним условима влажности и температуре атмосфере, уз довољну разлику потенцијала на половима електричних уређаја, може се појавити јонизација атмосфере и неконтролисано пражњење потенцијала са полова електричних уређаја.

Из успостављеног електричног лука: исијавају свјетлосне, инфрацрвене и ултраљубичасте зраке, ствара се електрично и електромагнетно поље те одређена количина топлоте, настаје механички талас који ствара звук различитих фреквенција, а могу настати и радиоталаси. У посебним случајевима електрични лук је и нискорadioактиван.

Наука која проучава конверзију електричне енергије у топлоту назива се електротермија и дио је електротехнике. Изучава физички феномен ове конверзије и конструкцију и начин управљања уређајима законверзију. Иако је у електротехници појава топлоте, настале услед отпора у проводницима, непожељна, у електротермији је добијање топлоте пожељно. [3]

Контролисано пражњење потенцијала електропроводника назива се електрични лук. Изучавање и развој метода управљања електричним луком почео је давне 1802. године истраживањима која су објавили руски научник Василиј В. Петров и енглески научник Humphry Davy и траје све до данас. Електротермички процеси, па тако и електрични лук, имају низ предности над осталим видовима загријавања те најчешћу примјену имају у електролучном заваривању као и у металургији за топљење у електропећима.

1. ЕЛЕКТРИЧНИ ЗАВАРИВАЧКИ ЛУК

Електрични заваривачки лук је стабилно електрично пражњење (усмјерено кретање електрицитета) кроз јонизовани ваздух или гас. Да би ваздух био јонизован у њему морају да постоје електрони и јони, који својим усмјереним кретањем обезбјеђују проток електричне струје. Електрони и јони у ваздуху настају као посљедица процеса који се одвија при успостављању електричног лука.

1.1. Успостављање електричног лука

Успостављање електричног лука могуће је остварити на два начина и то [4]:

– контактно успостављање лука – остварује се кратким спојем врха електродне жице. Због микроскопских неравнина на додирним површинама, контакт и проток струје се успоставља на веома малој површини, густоћа струје је веома велика, па се додатни и основни материјал топе готово тренутно, а дјелимично и испаравају. Дејством јаког електричног поља, створеног напоном празног хода, атоми металних пара губе електроне које привлачи позитивна електрода (анода), док преостали дио атома (позитивни јон) привлачи катода. Истовремено механизмом термичке јонизације катода почиње да емитује електроне, који се крећу великом брзином према аноди, чиме се добија усмјерено кретање које одржава електрични лук.

– безконтактно успостављање лука – остварује се кориштењем високофреквентног генератора (фреквенције 100 kHz до 1 MHz) који између врха електродне жице и радног комада, непосредно прије успостављања електричног лука, повећава статички потенцијал до те мјере (1 до 10 kV) да електрони са врха жице јонизују околни ваздух (гас) чиме се успоставља електрични лук.

При успостављању електричног лука јонизација гаса настаје међусобним сударима честица и фотоизомеризацијом (апсорпцијом енергије кванта). У исто вријеме због интеракције јона и електрона може доћи до дејонизације – неутрализације. Судари могу бити еластични или нееластични. У нееластичним сударима енергија честице преда цијелу енергију на другу честицу дисоцијације, побуду или јонизацију.

1.2. Енергија дисоцијације

У случају када у гасу имамо молекуле N_2 , H_2 и O_2 , при ниским енергијама електрона у електричном луку, енергија се због њихове осцилације преноси на молекуле. При већим енергијама електрона узбуде се молекуле, што резултира настанком два атома, тј. гас дисоцира. Последица судара је формирање два електрона и атома, који су обично у побуђеном стању, што касније омогућава ослобађање фотона. При високим енергијама електрона атоми су јонизовани. У табели број 1 дата је енергија дисоцијације молекула гаса. [5]

Табела 1. Енергија дисоцијације молекула гаса у електричном луку

Гас	O_2	N_2	H_2	CO_2
Енергија дисоцијације (eV)	5,08	7,37	1,6	9,7

1.3. Енергија побуде

Енергија побуде је енергија која је предана некој честици и добије се назад кад се побуђени електрон, који се налази на вишем енергетском нивоу, креће на нижи и одаје квантну енергију. Ако претпоставимо да је гас моноатомни и да се електрон ниске енергије судари с атомом, то је као судар двије куглице при чему је маса једне знатно већа од друге. Електрон, који има мању масу, задржаће своју енергију након судара тако да нема размјене енергије између двију маса.

Ако је енергија електрона већа, један од електрона ће доћи до критичног нивоа и он ће предати значајан дио своје енергије атому, што ће промјенити смјер кретања. Ову критичну енергију називамо: енергија побуде, екситација или енергија резонанције атома. Енергија, коју атом прихвати, је потенцијална енергија, зато јер је један од слабо везаних електрона премјештен на виши енергетски ниво. Разлика енергије се емитује као квантна свјетлосна енергија. Вјероватноћа побуде атома једнака је нули ако је енергија електрона тачно једнака енергији побуђивања атома. Могућност побуде се повећава, ако се повећава енергија електрона изнад енергије побуде атома.

1.4. Енергија јонизације

Ако је енергија електрона сувише повећана, дође до побуђивања и других енергетских нивоа атома. При повећаној енергији ће електрон избити један или више електрона из вањске љуске атома, тј. валентне електроне. У том случају, мора енергија електрона бити најмање једнака енергији јонизације атома, чиме се добију два електрона и један јон.

Да би се остварила јонизација ваздуха потребно је утрошити одређену енергију, која је за различите материјале одређена тзв. потенцијалом јонизације. Потенцијал јонизације је најнижи за земноалкалне метале, а највиши код гасова. За већину гасова се највећа вјероватноћа јонизације налази у подручју 10 до 100 V, осим пара K и Na који постижу свој максимум при 10 до 20 V. То је важно сазнање за технологију заваривања, гдје K и Na користимо за стабилизацију електричног лука. У табели 2 приказане су енергије јонизације или потенцијали јонизације за различите гасове и паре.

Табела 2. Потенцијали јонизације за неке гасове и паре

Атом	Cs	K	Na	Ca	Fe	H_2	O_2	N_2	Ar	He
U_i (V)	3,9	4,3	5,11	6,8	7,83	13,53	13,56	14,5	15,7	24,5

Енергија јонизације зависи о структури атома, или његовог положаја у периодном систему елемената. Најмањи потенцијал јонизације има Cs, који има у вањској љуски слабо везан електрон. Највећи потенцијал има најлакши племенити гас - He, код којег је вањска љуска попуњена с електронима, па је стога највише отпоран на јонизацију.

Дакле, јонизација се може појавити у три облика и то: јонизација од судара, јонизација од зрачења, термичка јонизација. [6], [7]

Електрично поље у луку убрзава електроне и јоне у супротним смјеровима. Како је брзина електрона знатно већа од брзине јона, може се сматрати да је њихов допринос протоку струје знатно већи. Основна разлика између електричне струје у металним проводницима и у електричном луку је то да се кроз проводник струја добија као последица кретања електрона, док се у луку крећу и јони, при чему долази до међусобне размјене енергије због сударања јона и електрона.

Услјед сталног сударања електрона са јонима и атомима, они губе дио енергије, тако да се енергија и температура свих честица уједначава. Тиме се постиже термодинамичка равнотежа, односно свака тачка у стубу лука окарактерисана је неком температуром.

1.5. Плазма

Смјесу електрона, позитивних јона, атома и молекула високог зрачења називамо плазма. Због различитих особина у односу на круте, течне и гасовите материје, сматра се четвртим агрегатним стањем. Јонизовани гас има бар по један електрон одвојен од дијела својих атома или молекула. Због слободних, електропотенцијално набијених честица (јона и електрона) плазма је добар проводник електричне струје, ствара сопствено магнетно поље и као резултат, међусобно снажно реагује на друга електрична и магнетна поља. [8]

За плазму се каже да је квазинеутралан гас састављен од неутралних и набијених честица, што значи да је макроскопски гледано неутралан, при чему су његови дијелови електрично набијени, са једнаким бројем негативно и позитивно набијених честица. Као и гас, плазма нема одређен облик или волумен.

Код квазинеутралних плазми се захтијева да струја плазме буде затворена у струјни круг. То доводи до кирхофових закона електричних кругова, те се појављују и електрични отпор и електрични индуктивитет. Овакви електрични кругови могу створити велике количине магнетне енергије, која ако је ометана с вана, доводи до великог загријавања и убрзавања честица у плазми електричног лука.

Могуће је створити плазму која није квазинеутрална, како код електронских зрака које имају само неутралан потенцијал.

Под појмом густоћа плазме мисли се на густоћу електрона, или број слободних јона по јединици волумена. Степен јонизације плазме, зависи од температуре, представља број атома који су изгубили електроне, а дефинише се према једначини (1).

$$\alpha = \frac{n_i}{n_i + n_a} \quad (1)$$

гдје је: n_i – густоћа јона и n_a – густоћа неутралних атома.

Температура плазме мјери се у Келвинима или електронволтима, и мјераје кинетичке енергије честица у плазми. На основу релативних температура електрона, јона и неутралних атома, плазме се дијеле у:

- термичке плазме које су скоро потпуно јонизирани и имају јоне и електроне на приближно истој температури и
- нетермичке плазме које су незнатно јонизоване, код којих су електрони са високом температуром а јони и неутралне честице са ниском температуром.

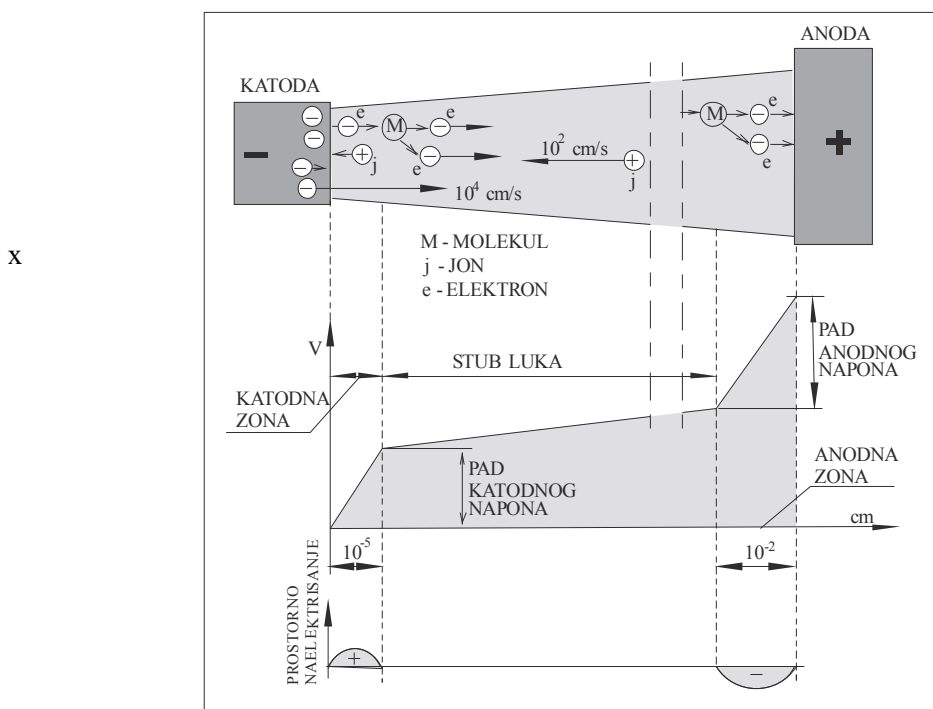
Електрично поље у плазми је доста мало, због високе проводљивости. Просјечни потенцијал који постоји између електрично набијених честица назива се потенцијал плазме.

Магнетизирана плазма је плазма у којој је магнетно поље довољно јако да утиче на кретање електрично набијених честица. Она је анизотропна, што значи да су својства различита у правцу кретања плазме и правцу окомитом на њега.

1.6. Температурна поља у електричном заваривачком луку

Након успостављања електричног лука, тј. одвајања врха електродне жице од радног комада, на половима се јављају мрље – концентрације супротних потенцијала (анодна и катодна мрља). Највећи пад напона дешава се у мрљама, док је пад напона у електричном луку незнатан, те зависи од дужине електричног лука. [9]

Електрични лук се, у смислу зависности напона лука од јачине струје, не понаша као класични проводник, што значи да за њега Омов закон не важи. Због тога је потребно познавати статичку карактеристику електричног лука, односно зависност напона од јачине струје. Знајући да је топлотна моћ лука пропорционална напону и јачини струје, може да се закључи да лук веће дужине има већу топлотну моћ. На слици 2 дат је приказ расподеле напона у електричном луку.



Слика 2. Расподела пада напона у електричном луку

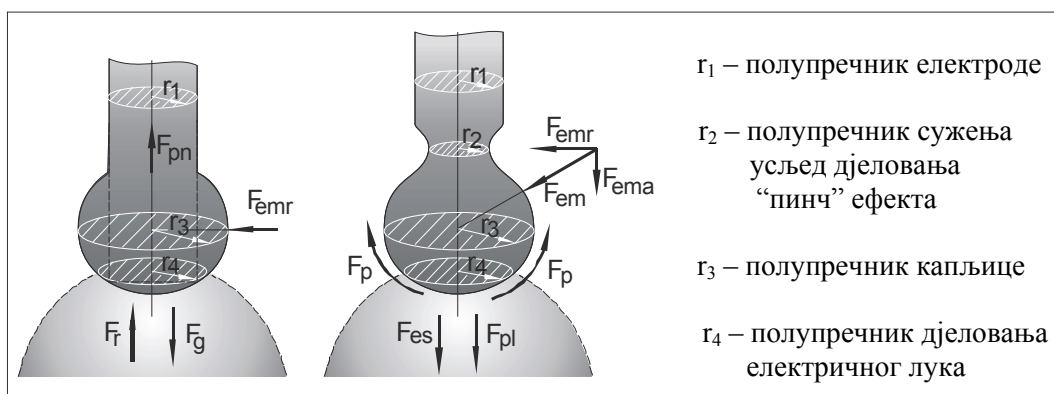
Када се постигне стабилно стање у струјном колу које чине извор струје, електродна жица, лук и основни материјал, температура у заваривачком електричном луку (нпр. код МАГ поступка заваривања) достиже између 6000 и 8000 °С, што обезбеђује ефикасно топљење основног и додатног материјала.

2. ФОРМИРАЊЕ ТЕЧНЕ КАПЉИЦЕ ДОДАТНОГ МАТЕРИЈАЛА

Топљењем врха електродне жице формира се капљица метала која се, кад постигне одређену запремину, одваја са врха топиве електроде и пролази кроз простор лука у заваривачку купку. При томе може настати слободан прелет капљица у купку или пренос кратким спојевима премоштавањем простора лука помоћу капљица метала. Код капљичастог преноса, у зависности од запремине капљица које се преносе, може да настане пренос метала распрскавањем или пренос помоћу крупних капљица које се не распрскавају. У свим случајевима пренос метала настаје са мање или више евидентном периодичношћу, при чему након сваког преноса капљице врх електроде има неку запремину истопљеног метала одакле настаје и расте нова капљица. [10]

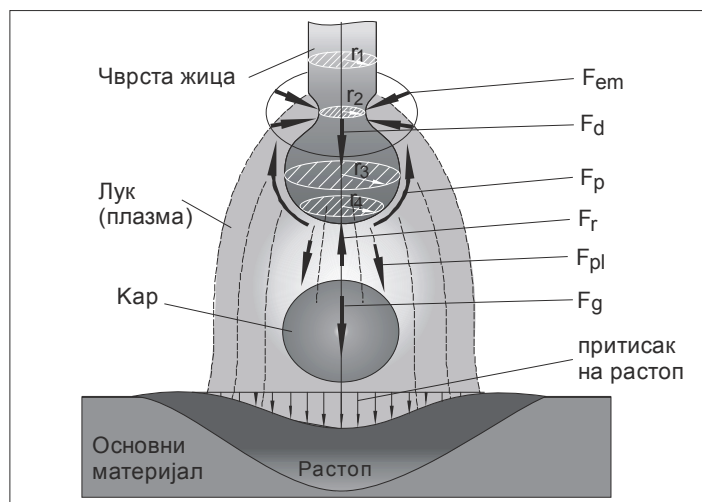
Карактер преноса растопљеног електродног метала зависи од односа сила које дјелују на капљицу метала на врху електродне жице (слика 3):

- **сила гравитације (F_g)** – дјелује на кретање капљица и њихов улазак у течну купку. Осим код заваривања у хоризонталном положају, омета процес преноса додатног материјала,
- **електромагнетних сила (F_{em})** – разлаже се на аксијалну и радијалну компоненту. Радијална компонента дјелује на формирање капљица растопљеног додатног метала, а аксијална утиче на одвајање капљице. Интензитет силе је пропорционалан квадрату јачине струје, па се са повећањем јачине струје олакшава пренос додатног материјала,
- **електродинамичких сила (F_d)** – условљена кретањем тока електрицитетa
- **сила површинског напона (F_p)** – дјелује на формирање капљица, стеже омекшани врх електроде и спречава њено одвајање од електроде. Кад капљица додирне купку, ова сила увлачи капљицу у растопљену купку заваара и спречава разлијевања купке, што помаже заваривање у принудним положајима. Сила површинског напона зависи од вискозитета растопљеног метала.
- **сила тока плазме (F_{pl})** – утиче на одвајање капљице од електроде и повећава брзину преноса капљица кроз електрични лук.
- **електростатичка сила (F_{es})** – дјелује између електроде и радног метала и утиче на кретање капљица растопљеног додатног метала кроз електрични лук,
- **сила реактивног притиска металних пара (F_{pn})** – супротставља се преносу капљице, док се она још увијек налази у фази формирања на врху електроде,
- **сила реактивног дјеловања парног тока (F_r)** – дјелује аеродинамички и супротставља се кретању капљице кроз електрични лук,



Слика 3. Силе које дјелују на стварање капљице у електричном луку

Правац дјеловања и интензитет појединих сила, као и резултате њиховог међусобног дејства зависе од параметара заваривања (јачине струје и напона лука), поларитета струје, хемијског састава метала електроде, састава заштитног гаса, пречника и стања површине електродне жице. Силе које дјелују на капљицу и њихов смјер дјеловања приказан је на слици 4. [4]



Слика 4. Принцип и смјер дјеловања сила у електричном луку

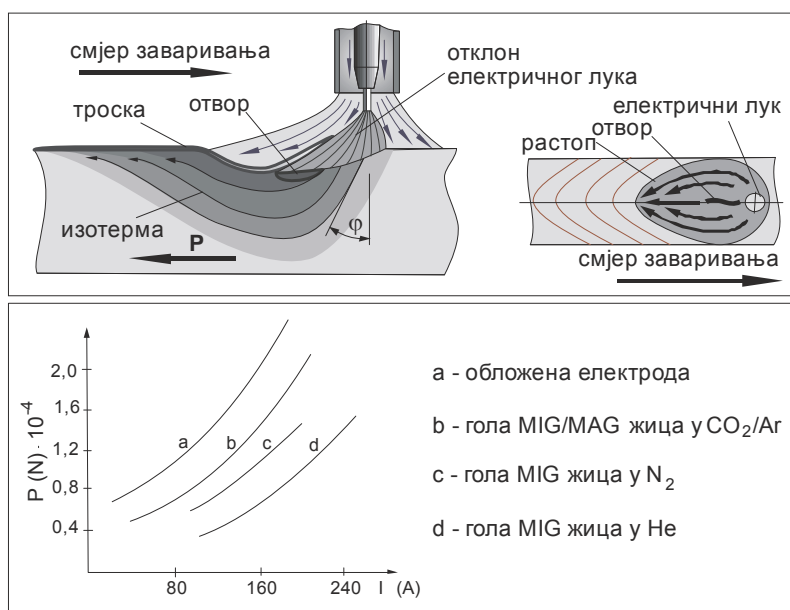
Сила гравитације (F_g) показује битан утицај на карактер преноса метала само при заваривању малим струјама. Улога гравитације у преносу електродног метала зависи од положаја електроде у простору. При положеном заваривању она олакшава прелаз капљице у купку, док у надглавном положају задржава капљицу на врху електродне жице.

Поред сила које настају услед стварања електричног лука, због кретања електричног лука настају и **механичке силе** које су у непосредној вези с његовом крутошћу која настоји одршати електрични лук у смјеру осе електродне жице. Због настајања механичких сила, при кретању електричног лука одређеном брзином заваривања, електрични лук се отклања у смјеру супротном смјеру заваривања тако да растоп и троска заостају за извором топлоте при чему су потиснути назад – супротно од смјера заваривања.

Угао ϕ представља нагиб гурања растопа и троске у односу на осу шава и смјер кретања електричног лука, а зависи од интензитета механичких сила које се мијењају у зависности од коришћеног додатног материјала и начина заваривања.

Ако се при заваривању користи константна јачина струје заваривања, приликом прекидања електричног лука, при завршетку завара, веома се лако створи плитки кратер и настане у њему грешка у облику отвора – иницијално мјесто за топле и хладне пукотине (слика 5). Грешка овог типа настаје брзим очвршћавањем растопа. Узроци настанка отвора су: мала количина унесене топлоте, превелика брзина одвођења топлоте, недовољна количина растопа, недовољно активна троска.

Ову појаву спрјечавамо увођењем веће количине топлоте тако да на мјесту завршетка, прије гашења електричног лука, електрични лук задржимо нешто дуже или враћањем електричног лука мало уназад тако да ствара надвишење настало већим депозитом. Такође, избјећи кратере при прекиду електричног лука, можемо смањењем јачине електричне струје – кориштење завршне струје.



Слика 5. Приказ настајања механичких сила и стварања отвора

Симетричност електричног лука, поред механичких сила, нарушава и бочно скретање лука које је последица помјерања анодне или катодне мрље, струјања околног ваздуха и дејства електромагнетних сила. Најутичајније је дејство електромагнетних сила, па је за одржавање симетричности лука – спрјечавање скретања лука неопходно примјенити посебне мјере.

Сходно свему наведеном, у електричном луку се одвијају вишеструки процеси од којих се издвајају:

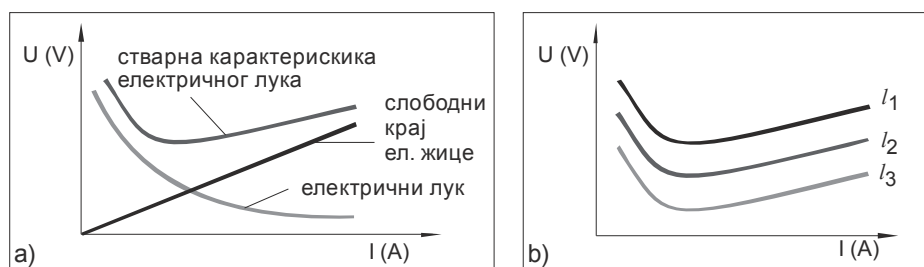
- побуђивање и јонизација ваздушног простора између врха електродне жице и основног материјала, чиме се од гасова (који се на собној температури понашају као изолатор) ствара плазма која је електропроводник,
- загријавање и топљење додатног материјала, док величина напона и јачина струје заједно са електромагнетним пољем утичу на: брзину топљења, величину створене капљице и начин њеног преноса са врха електродне жице према основном материјалу,
- загријавање и топљење основног материјала,
- стварање електромагнетних и сила плазме које одвајају капљицу и преносе од врха електродне жице ка купки растопљеног основног материјала,
- металуршки процеси топљења и мијешања: основног, додатног и помоћног материјала, а при очвршћавању – рафинација, долегирање и кристализација, те стварање троске.
- као нуспојава јављају се исијавање топлоте и свјетлости, те електромагнетно поље.

3. КАРАКТЕРИСТИКЕ ЕЛЕКТРИЧНОГ ЛУКА

Електрични лук је дио електричног круга који, прије свега, претвара електричну енергију у топлотну. Карактеристика омског отпора проводника је растућа када са порастом струје расте и напон. Супротно од проводника, у електричном луку омов закон не вриједи јер је са падом напона могућ проток веће јачине струје. Како се у завари-вачком електричном кругу састају обе зависности, добијемо **статичку карактеристику** електричног лука која је у функцији напона и јачине струје.

Карактеристика електричног лука је при мањим јачинама струје опадајућа због веће проводљивости електричног лука. При порасту јачине струје пређе у скоро водораван ток, а при некој јачини струје почиње да расте. Пораст проводљивости узрокује то што се од почетка електрони напуштајући врх електроде непрестано сударају, па је узастопни прелаз премален или је густоћа тока превелика. Тако се јавља већи отпор који проузрокује пораст карактеристике лука (слика 6.a).

Повећањем јачине струје повећава се јонизација, а с тим и број носиоца електрицитета, па је електрични лук стабилан при nižем напону. Напон електричног лука зависи од његове дужине, од врсте основног и додатног материјала, потенцијала заштитног гаса или мјешавине. Дакле, промјеном дужине електричног лука статичка карактеристика се помјера у дијаграму струја – напон (слика 6.b).



Слика 6. Статичка карактеристика електричног лука

4. ПРЕНОС ДОДАТНОГ МАТЕРИЈАЛА КРОЗ ЕЛЕКТРИЧНИ ЛУК

Механизам преноса додатног материјала кроз електрични лук врло је компликован и још увијек неразјашњен у потпуности, али се зна да укључује сљедеће битне појаве: гравитацију, површински напон, магнетно поље око лука, притисак од струјања гасова и притисак плазме.

Неке од тих сила помажу, а неке спрјечавају пренос материјала у електричном луку. Ако је сума свих сила већа од нуле, долази до аксијалног преноса материјала. Код сваког поступка заваривања, избором и комбинацијом: састава додатног материјала; пречника жице; јачине, односно густине струје заваривања; напона и дужине електричног лука; врсте заштитног гаса; карактеристике извора струје; а код аутоматизованих поступака и дужине извученог (слободног) дијела електродне жице из контактне вођице, могуће остварити различите начине преноса метала кроз електрични лук.

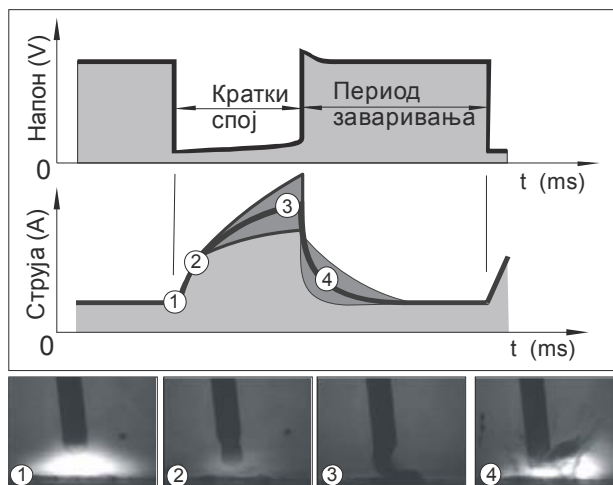
На основу кориштене опреме за заваривање и избора комбинације параметара, могу се разликовати конвенционалне и савремене методе преноса и начина управљања преносом додатног материјала. Код конвенционалних МАГ метода заваривања управљање параметрима заваривања се (пored избора пречника и брзине електродне жице, брзине и положаја заваривања, протока и врсте гаса) своди на избор радне тачке у дијаграму статичке карактеристике лука и извора заваривања. Савремена заваривачка опрема омогућила је развој модификованих метода заваривања код којих се регулише количина унесене топлоте, како у основни материјал тако и у електродну жицу, чиме се утиче на величину, број и начин преноса капљица растопљеног метала кроз електрични лук.

4.1. Пренос додатног метала кроз електрични лук код конвенционалних МАГ метода заваривања

У зависности од, у првом реду, јачине струје и напона електричног лука, остварују се различите величине и механизми преноса капљица додатног материјала кроз електрични лук. Могу се разликовати: [5], [10]

- Електролучно заваривање топивом жицом у заштити активног гаса, код којег се пренос материјала врши **кратким спојевима - кратки лук (short arc)**

При преносу додатног метала далази до периодичног прекидања електричног лука услед додира електродне жице и растопа. Одвија се периодично смјењивање постојања електричног лука и урањања растопљеног врха жичане електроде у растоп (слика 7.3). Ово урањање, при чему се електрични лук прекида, означава се као кратки лук. Додатни метал се преноси са жичане електроде на радни комад само у периоду када се жичана електрода налази у кратком споју са растопом. Пренос додатног метала кроз електрични лук не постоји. За овај вид преноса додатног метала користе се најмање јачине струје и најмањи пречници жичаних електрода, при чему је напон електричног лука тако мали да је практично сав додатни метал пренешен у облику капљица, које доводе у кратки спој жичану электроду и растоп.



Слика 7. Осцилограм и снимци преноса у кратком луку

Циклус преноса капљица са електродне жице у растоп траје око 0,002 до 0,005 секунди. Веома је важно ограничење брзине достизања максималне јачине струје, да би се добило стабилно заваривање са преносом кратким спојем, без преноса у млазу. Ово се постиже избором уређаја са одговарајућом динамичком карактеристиком. Мало растојање између контактне вођице и радног комада омогућава велику густоћу струје. Због тога већ формирана капљица, која кратко спаја жичану электроду и растоп, улази у кратки спој и доводи до великог повећања јачине струје па настају мале експлозије и распрскавање, што електрични лук чини нестабилним. Међутим, ако је динамичка карактеристика извора струје таква да у кратком споју даје струју релативно мале јачине и на одговарајући начин успорава достизање максимума, могуће је остварити стабилан електрични лук и равномјеран пренос додатног метала. Феномен мора бити усклађен са брзином довођења електродне жице.

- Електролучно заваривање топивом жицом у заштити активног гаса, код којег се пренос материјала врши **крупним капима - мјешовити лук** уз појаву кратких спојева (mixed arc)

Пренос крупним капима, са жичаном електродом на плус (+) полу, јавља се изнад одређене критичне јачине струје. Карактеришу га капи већег пречника него што је пречник електродне жице. Одређени број капи доспјева у кратки спој те оне доводе до феномена описаног код кратког лука.

Густоћа струје је релативно мала. Заштитни CO_2 гас увијек потпомаже неаксијални пренос додатног материјала који изазива распрскавање течног метала. Да би се ово избјегло и добио директно аксијални пренос крупним капима CO_2 гасу се додаје инертни гас. Тако електрични лук постаје довољно дуг те омогућава одвајање капљице прије него што она додирне растоп.

На слици 8 приказан је пренос додатног метала крупним капима при заваривању челика у заштити CO_2 гаса. Узрок раста капљице је повећан површински напон на растопљеном врху електроде, што проузрокује малу катодну мрљу и образовање великих капљица. Број кратких спојева опада са повећањем електростатичког површинског напона. Одступање од аксијалног преноса при заваривању у заштити CO_2 гаса догађа се због електромагнетних одбојних сила које дјелују на дно капљице.



Слика 8. Неаксијални пренос додатног метала крупним капима

Врх електродне жице топи се топлотом електричног лука. Растопљена капљица расте све док се не одвоји помоћу кратког споја или услед гравитације.

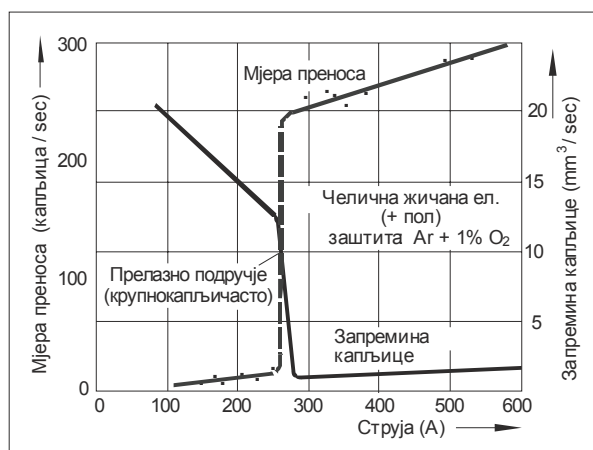
- Електролучно заваривање топивом жицом у заштити мјешавине гасова, код којег се пренос материјала врши у **распрскавајућем млазу - распрскавајући лук – у спреју**, без кратких спојева (spray arc)

При заваривању у заштити мјешавине гасова са најмање 80% аргона или хелијума, пренос додатног метала мијења се од крупнокапљичастиг према преносу у млазу, при чему се јачина струје заваривања повећава, сразмјерно употребљеном пречнику електродне жице (слика 9). До преноса у млазу долази при густоћама струје изнад граничне вриједности. То није пренос у млазу, већ пренос у финим појединачним капљицама које се најчешће одвајају од електродне жице у аксијалном правцу и великом брзином урањају у растоп. Ствара се карактеристичан фини стуб електричног лука и зашиљени врх електродне жице. Овај облик преноса није погодан за заваривање у принудним положајима.



Слика 9. Пренос додатног метала у распрскавајућем млазу - спреју

Број капљица се креће у распону од 100 до неколико стотина у секунди, зависно од брзине довођења електроде, која се креће апроксимативно од 42 до 340 мм/сец. Смањење величине капљице праћено је повећањем броја капљица (слика 10).



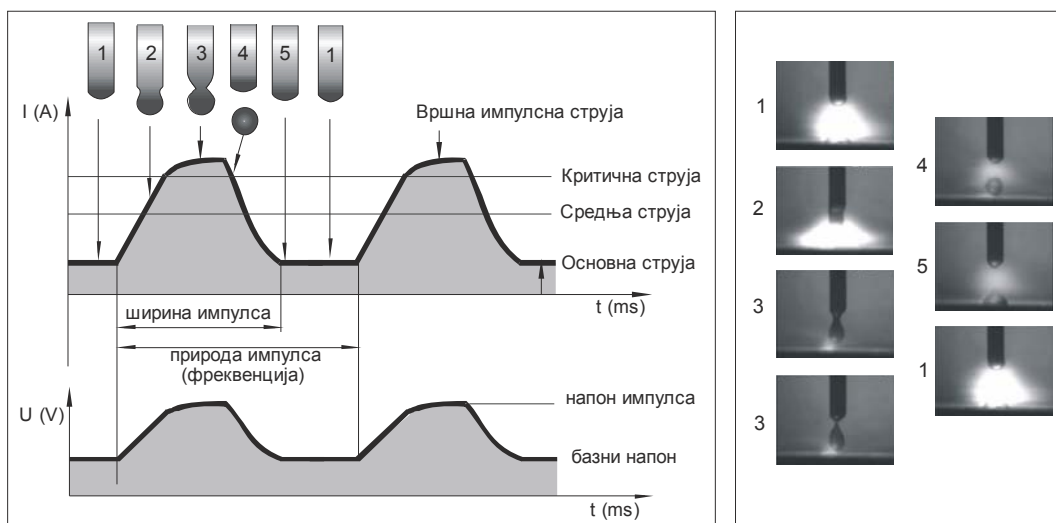
Слика 10. Промјена запремине капљице и броја пренијетих капљица у зависности од јачине струје заваривања

На механизам аксијалног преноса у млазу утичу:

- електромагнетна сила на растопљеном врху електродне жице која настаје као резултат међусобног дјеловања струје заваривања и коаксијалног магнетног поља око извученог дијела електродне жице чиме се стишће растопљени врх електродне жице и убрзава његов пренос према радном комаду који се заварује;
- стуб електричног лука;
- испаравање метала на врху електродне жице.

► Електролучно заваривање топивом жицом у заштити мјешавине гасова, код којег се пренос материјала врши **импулсно - пулсирајући или импулсни лук**, контролисаним прелетом капљица без кратких спојева (pulsed arc)

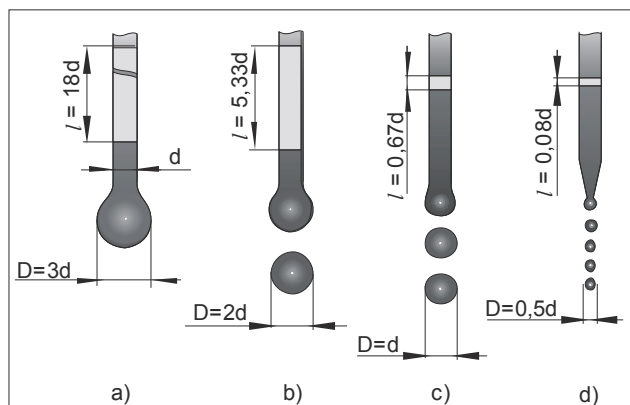
Пренос капљица додатног метала у електричном луку се врши техником слободног прелета, то јест без појаве кратких спојева. Електрични лук се одржава пулсирајућом струјом одговарајуће фреквенције (слика 11). Извор струје обезбјеђује два нивоа јачине струје: *базну струју* која је превише ниска да изазове пренос метала и *високоимпулсну струју* која се суперпонира са базном струјом у интервалима који се могу регулисати. Импулсни врх струје знатно је виши од јачине струје потребне за пренос додатног метала, тако да сваки импулс струје одвоји једну капљицу метала и избаци је кроз лук у заваривачку купку. Фреквенција импулсне струје као и број пренесених капи додатног материјала, може да се креће од 50 до 100 Hz. Комбинацијом два нивоа јачине струје ефективна јачина струје мања је од струја потребних за класични струјни пренос. Тако се осигурава мањи унос топлоте.



Слика 11. Пренос мерала и шематски приказ импулсне струје заваривања

Пулсирајући пренос метала може се остварити само у заштити аргона, односно гасних мјешавина са високим учешћем аргона и додацима до 2%O₂ или до 5%CO₂. При тачно фиксираној фреквенцији импулсне струје проблем представља успостављање и одржавање стабилног лука и одговарајућих параметара заваривања.

Димензије капљица за разне облике преноса додатног метала и њихов однос према одговарајућим дужинама електродне жице дати су на слици 12.



Слика 12. Дефиниције облика преноса додатног метала према релативним димензијама капљица:
а) природно капање – гравитација; б) крупнокапљичасти пренос; в) и д) пренос у млазу

► Електролучно заваривање топивом жисом у заштити мјешавине гасова, код којег се пренос материјала врши **ротирајућим луком**, контролисаним прелетом капљица без кратких спојева (pulsed arc),

Ротирајући лук је лук велике снаге те се, због тежине горионика, користи код механизованог вођења горионика. Пренос метала у ротирајућем луку настаје при високим струјама заваривања и са већом дужином извученог краја електродне жисе. Ротација лука почиње у моменту када се крај жисе, довољно омекшан уследијед високог тока струје и електроотпорног загријавања, савије уследијед присутних сила лука и изведе из осе (слика 13). Деформације слободног краја електродне жисе су неколико милиметара из осе жисе, брзина ротирања је око 800-1000 о/мин и прати је карактеристично зујање. Да би се постигао ротирајући лук, нпр. са електродном жисом пречника 1,2 мм, потребна је брзина дотура жисе од 25 м/мин или више, а струја заваривања мора бити најмање 450-480 А.

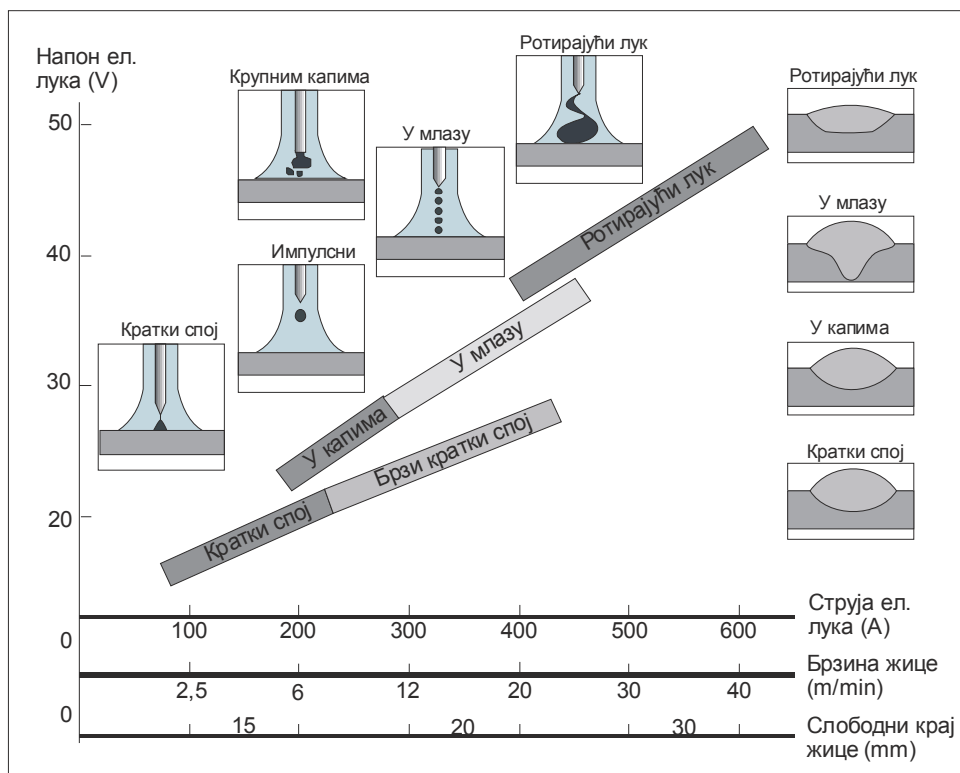


Слика 13. Карактеристично скретање омекшаног врха електродне жисе код заваривања ротирајућим луком

Кроз стабилну ротацију врха истопљене електродне жисе остварује се финокапљичасто прскање капи на основни материјал. За обезбјеђивање стабилне ротације лука обично се користе вишекомпонентне гасне мјешавине базиране на аргону и хелијуму са додасима кисеоника и/или угљендиоксида.

Сходно претходном, конвенционалне методе преноса додатног материјала кроз електрични лук у функцији су од: напона и јачине струје електричног лука, брзине довођења додатног материјала и слободног краја електродне жисе, врсте заштитног гаса.

На слици 14 дат је приказ основне подјеле начина преноса додатног материјала у функцији од основних утицајних фактора (за конвенционалне поступке МАГ заваривања). [11], [12]



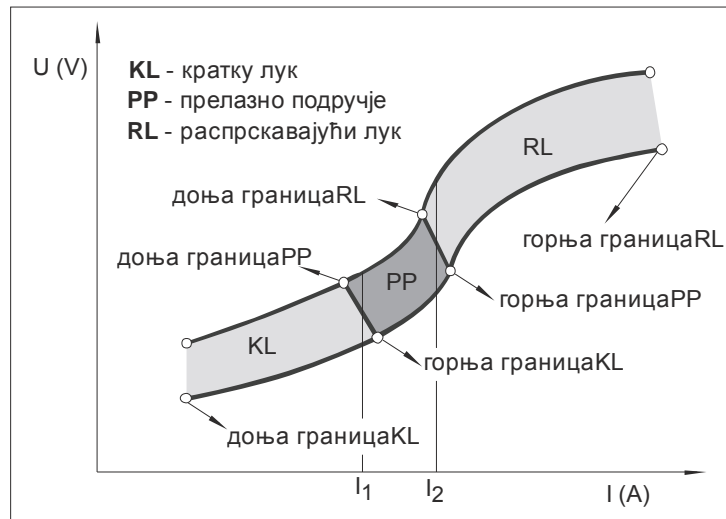
Слика 14. Начин преноса додатног материјала код МАГ процеса заваривања у функцији струје и напона електричног лука, брзине и дужине слободног краја жице

4.2. Пренос додатног метала кроз електрични лук код савремених МИГ-МАГ метода заваривања

Сви поступци електролучног заваривања са топливом жичаном електроодом карактеришу се преносом метала са електродне жице у заваривачку купку у облику формираних капљица. Управљање величином и обликом растопљеног врха електродне жице - капљице, те начина преноса од жице до заваривачке купке, дефинише методу МИГ-МАГ заваривања. Не постоје децидне границе између конвенционалних и савремених метода МАГ заваривања. Савремене методе заваривања заснивају се на модификацији и модернизацији начина управљања током електричног лука те преноса топлоте и додатног материјала кроз електрични лук.

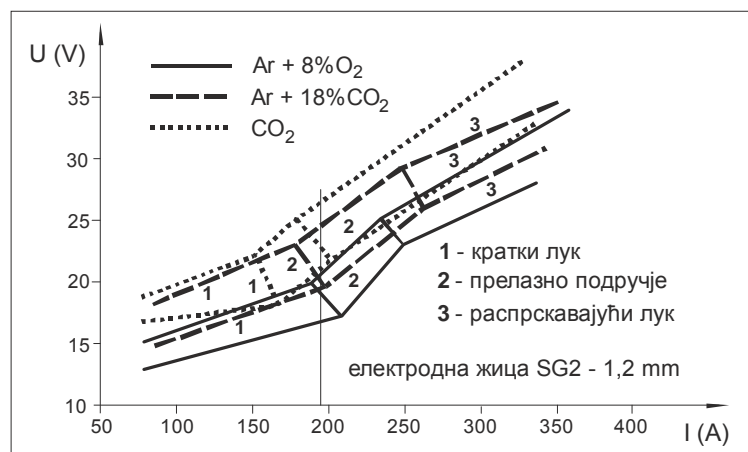
Различити типови електричног лука разликују се, прије свега, кроз постојање или непостојање кратког споја, односно величини капљица растопљеног материјала и начину преноса у електричном луку. Подјела типова лука при МАГ заваривању прилично је уопштена. У разматрање нису узети неки параметри који, поред струје и напона, битно одређују карактер преноса додатног материјала са растопљеног врха електроде у заваривачку купку. Ту се, прије свега, мисли на квалитет и пречник електродне жице, те састав заштитног гаса.

Из дијаграма зона различитих врста преноса додатног материјала за конвенционалне начине преноса, нацртаног у функцији односа струја – напон, видљиво је да се, нпр. при константној струји I_1 порастом напона електричног лука мијења начин преноса додатног материјала из преноса у кратком луку (KL) у прелазно подручје (PP) са преносом крупним капима. Такође, при константној струји I_2 , порастом напона може се прећи из прелазног подручја у распрскавајући лук (слика 15). [5]



Слика 15. Утицај промјене напона на начин преноса додатног материјала

Утицај осталих фактора такође утиче на начин преноса додатног материјала. Тако се са слике 16 види промјена величине и положаја карактеристичних зона за поједине типове преноса капица кроз електрични лук при кориштењу константних свих осталих параметара осим врсте заштитног гаса.



Слика 16. Начин преноса додатног материјала код МАГ процеса заваривања

Промјеном врсте гаса (двје врсте гасних мјешавина и чистог CO_2) видљива је промјена ширине зона појединих начина преноса, као и њихов положај у дијаграму напон – струја електричног лука. Тако је могуће, кориштењем константне јачине струје од 195 А, промјеном напона електричног лука и врсте заштитног гаса остварити комбинације резличитих врста преноса материјала (табела 3).

Табела 3. Могуће врсте преноса додатног материјала при константној струји од 195 А зависно о коришћеном заштитном гасу и промјени напона електричног лука

Начини преноса у електричном луку	Заштитни гас	Напон лука (V)
кратки лук – крупним капима	Ar + 8% O_2	17 – 21
кратки лук – крупним капима	Ar + 18% CO_2	19 – 24
крупним капима – распрскавајући лук	100% CO_2	21 – 27

Савремене методе управљања преносом топлоте и додатног материјала кроз електрични лук базиране су на заваривању високофреквентним истосмјерним струјама, преко којих се кориштењем базе података, рачунара интегрисаног у заваривачком уређају, повратне спреге о стању напона и јачине струје у електричном луку, промјеном: фреквенције, интервала и јачине струје и напона електричног лука мијења величина и брзина преноса капљица течног метала, а самим тим, мијења се и количина топлоте унесене у купку основног материјала. [12]

Досад наведено указује да на механизам преноса додатног материјала утиче много параметара који нису једнозначно дефинисани. Савремене методе управљања јачином струје, њеном густоћом и брзином промјене, те обликом електричног лука уз повратну информацију о стању у електричном луку и могућност аутоматске корекције параметара заваривања у временски кратким интервалима (милисекундама) развиле су велики број модификованих метода управљања преносом додатног материјала. За опис свих тих метода било би потребно јако пуно простора и времена, а опет не би их све могли описати јер се свакодневно долази до нових података и нових модификација.

5. ЛИТЕРАТУРА

- [1] <http://www.niri.rs/grom.html>, 10.6.2012. год.
- [2] <http://sr.wikipedia.org/sr/Munja>, 10.6.2012. год.
- [3] <http://www.sau.ac.me/tehnologijametal/9TERMIJA.pdf>, 10.6.2012. год.
- [4] И. Рак: *Технологија варјења*, 1-издање, Љубљана, Модријан, 2008.
- [5] С. Пашић: *Заштитни гасови за МИГ/МАГ заваривање*, Машински факултет Мостар, 2004.
- [6] <http://www.esabasia.com/asia/en/education/processes.cfm>, МИГ/МАГ or GMAW, esab, 12.2009.
- [7] http://www.millerwelds.com/pdf/mig_handbook.pdf, Guidelines For Gas Metal Arc Welding (GMAW), Miller, 20.12.2008.
- [8] <http://hr.wikipedia.org/wiki/Plazma>, 10.6.2012. год.
- [9] А. Благојевић, О. Пашић: *Заваривање, лемљење, љепљење*, Универзитетски уџбеник, Мостар, 1991.
- [10] Б. Бајић, Д. Бајић: *Суштина и техника поступака електричног заваривања топљењем метала и њихових легура, приручник*, Варстрој, Подгорица, 2005.
- [11] http://www.saf-fro.com/file/otherelement/pi/chapiter3_mig%20mag%20welding50931.pdf, Chapter 3 MIG/MAG welding, saf-fro, 03.12.2009.
- [12] Д. Добраш, *Истраживање утицаја попречног нагиба горионика код савремених метода МАГ заваривања*, докторска дисертација, Машински факултет, Бањалука, 27.4.2012. год.