

**Факултет инжењерских наука
Универзитета у Крагујевцу**

Јован В. Милосављевић

**Метрологија код уређаја за заваривање
завршни рад**

Крагујевац, 2020.

**Факултет инжењерских наука
Универзитета у Крагујевцу**



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Индустријски инжењеринг

Предмет: Мерење и управљање

Број индекса: 125/2016

Јован В. Милосављевић

**Метрологија код уређаја за заваривање
завршни рад**

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др. Фатима Живић – ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да: Анализира елементе уређаја за заваривање који утичу на квалитет финалног производа.

Препоручена литература:

[1] УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ Факултет инжењерских наука, Технологија ливења и заваривања Милорад Јовановић, Вукић Лазих

[8] VEŠTINE I TEHNOLOGIJE ZAVARIVANJA, Prvo izdanje, Dave Smith

Крагујевац, октобар 2020

Ментор: Др. Фатима Живић

Резиме:

У овом раду ће се анализирати елементи уређаја за заваривање као и њихови параметри који утичу на квалитет и изглед финалног производа, са посебним освртом на електроотпорне тачкасте и MIG/MAG утрђаје.

У првом делу рада биће приказани елементи, параметри као и основни принцип по којем функционише тачкасто заваривање.

Други део рада се односи на опис MIG/MAG методе заваривања тј. како овај начин заваривања утиче на заварени спој, које су му карактеристике елемената и параметара.

У трећем делу се дискутују и пореде предности и недостатци оба начина заваривања.

Кључне речи: уређај, заварен спој, тачкасто заваривање, MIG/MAG заваривање

Abstract:

This paper will analyze the elements of welding devices as well as their parameters that affect the quality and appearance of the final product, with special reference to electrical resistance point and MIG / MAG fixtures.

In the first part of the paper, the elements, parameters as well as the basic principle according to which spot welding works will be presented.

The second part of the paper refers to the description of MIG / MAG welding methods, ie how this method of welding affects the welded joint, what are its characteristics of elements and parameters.

The third part discusses and compares the advantages and disadvantages of both methods of welding.

Keywords: device, welded joint, spot welding, MIG / MAG welding

Садржај

1. Увод.....	1
2. Принцип рада тачкастог заваривања, елементи и његови технолошки параметри	2
2.1 Принцип рада уређаја за тачкасто заваривање.....	2
2.2 Елементи уређаја за тачкасто заваривање	3
2.2.1 Трансформатор	4
2.2.2 Електроде уређаја.....	6
2.2.3 Контролни ормар.....	8
2.2.4 Пнеуматски цилиндар.....	10
2.3 Параметри који утичу на заварени спој код тачкастог заваривања	11
2.3.1 Џулов закон.....	12
2.3.2 Јачина струје	13
2.3.3 Време заваривања.....	14
2.3.4 Сила притиска.....	14
2.3.5 Режији заваривања.....	15
3. Принцип рада MIG/MAG заваривања, елементи и његови технолошки параметри...	16
3.1 Принцип рада MIG/MAG заваривања	16
3.2 Елементи уређаја за MIG/MAG заваривање	17
3.2.1 Извор струје	18
3.2.2 Механизам за додавање жице	19
3.2.3 Заваривачки пиштољ	20
3.3 Параметри који утичу на заварени спој код MIG/MAG заваривања	23
3.3.1 Јачина струје	23
3.3.2 Напон заваривачког лука.....	25
3.3.3 Брзина заваривања	28
3.3.4 Заштитни гас	30
4. Поређење параметара који утичу на финални квалитет производа тачкастог и MIG/MAG заваривања.....	32
5. Закључак	35
6. Литература.....	36

1. Увод

Заваривање представља спајање два или више елемената у једну конструкцију, где се прављењем шавова као финални производ добија заварени спој. Методе савременог заваривања јављају се крајем 19. века, а значајнија примена средином 20. века и даље.

При задовољавајућој металуршкој заварљивости, технолошка заварљивост указује на способност основног материјала да се одабраном технологијом остваре тражена својства и компактан спој. Технолошка заварљивост обухвата технолошке параметре који утичу на особине заварених спојева. На пример: додатни материјал, метод заваривања, поступак заваривања, унос топлоте, брзина хлађења, итд. [1]

Можемо рећи да се за оцену заварљивости увек узима узајамна веза:

- конструкције (крутост, дебљина, врста споја)
- материјала (способност заваривања)
- технологије (могућност заваривања)

Применом одређених мера, пре и у току заваривања, могу се знатно смањити сопствени напони и деформације.

Поступци заваривања могу се поделити на следеће: топљењем, притиском, такође поступци заваривања се деле према извору енергије. Са обзиром на извор топлоте могуће је издвојити четири основна поступка заваривања: електролучно заваривање (REL, MIG/MAG, TIG), гасно заваривање (запаљиви гасови + кисеоник), електроотпорно заваривање (тачкасто, шавно, брадавичасто, збијањем, варничењем), заваривање без загревања. [2]

Биће издвојена два начина заваривања чији су елементи уређаја који утичу на квалитет финалног производа описани у раду, и то:

- Тачкасто заваривање
- MIG/MAG заваривање

У првом делу овог рада дефинише се метод рада, елементи и параметри који утичу на заварени спој код тачкастог заваривања.

Други део рада се односи на метод рада, елементе и параметре који утичу на заварени спој код MIG/MAG заваривања.

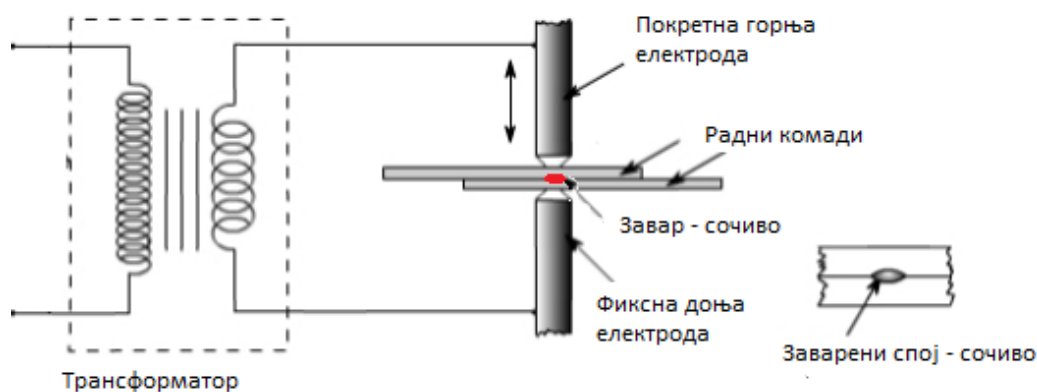
У трећем делу се пореде параметри елемената MIG/MAG и тачкастог заваривања, који утичу на финални квалитет производа. Извршавање одређених поступака мерења, поређење чије су карактеристике боље, и шта треба поправити.

2. Принцип рада тачкастог заваривања, елементи и његови технолошки параметри

2.1 Принцип рада уређаја за тачкасто заваривање

У зависности од међусобног положаја делова који се заварују електричним отпором (25% свих заварених спојева), разликују се преклопни и сучеони спојеви. Преклопни се изводе тачкастим, рељефним и шавним заваривањем, сучеони збијањем и варничењем.

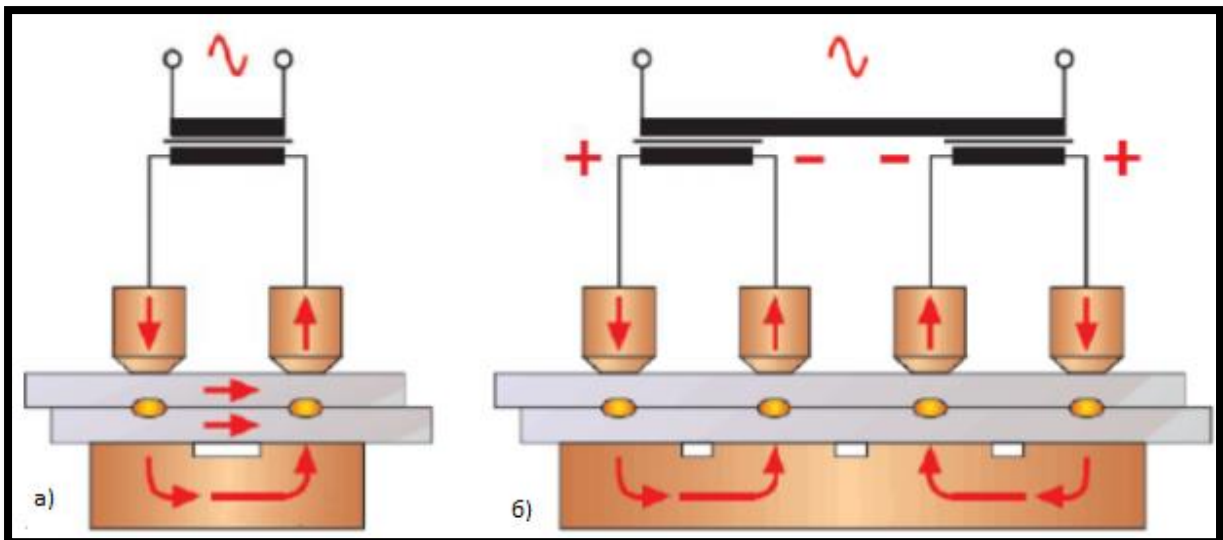
Тачкастим заваривањем спајају се танки лимови постављени једен преко другог тако да образују преклопни спој. Физичко спајање преклопних лимова остварује се преко заједничког ливеног језгра - сочива које настаје на месту где су се локално загрејани лимови притиснути електродама највише приближили (Слика 1). Стабилне машине - уређаји за тачкасто заваривање састоје се из енергетског блока, система за отварање – затварање електрода и довођење силе притиска по одређеном програму. У секундарно коло доведене су електроде које доводе струју и силу притиска на место споја. Опрема за управљање има задатак да по одређеном програму укључује и регулише протикање струје у секундарном намотају трансформатора односно кроз електроде. [1]



Слика 1. Шематки приказ тачкастог заваривања и настанка сочива [3]

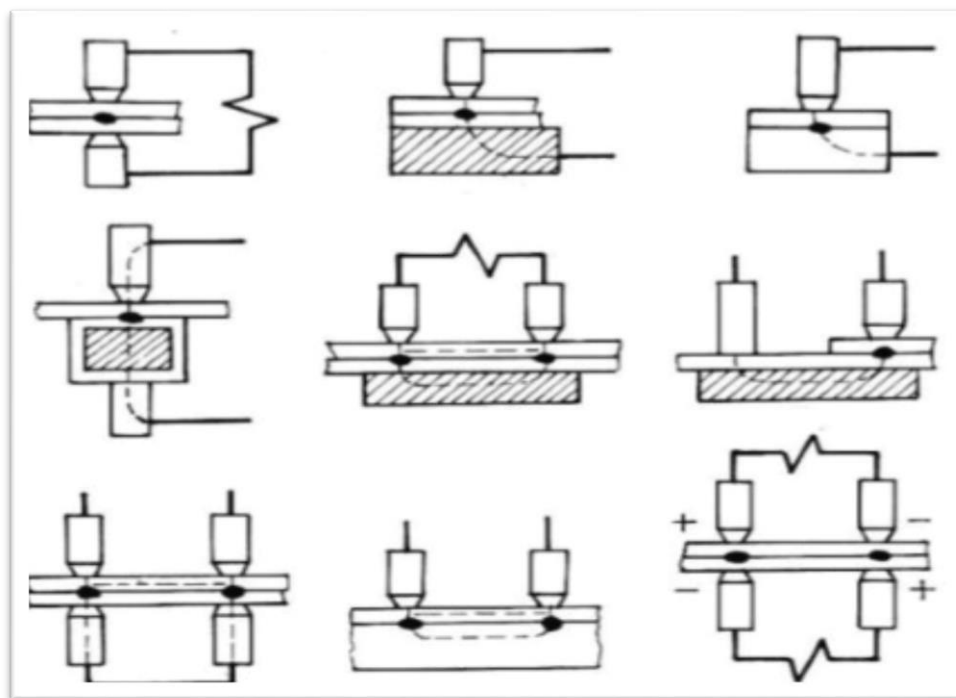
У процесу заваривања електроде остварују непосредан контакт са лимовима који се заварују, преносе силу притиска, спроводе струју и одводе већи део топлоте ослобођене у зони контакта лимова.

Заварени спој се код директног и индиректног тачкастог заваривања добија на основу електричног отпора који узрокује Џулову топлоту на додирним местима два материјала. Код индиректног тачкастог заваривања положај електрода није једна насупрот друге (директно заваривање), него једна поред друге, а радни комад се налази испод електрода на бакарној површини. Ова врста тачкастог заваривања се користи када је тешко или немогуће стиснути радни комад директно са обе стране. Приказано је индиректно тачкасто заваривање с једним паром (Слика 2, а) и с више парова електрода (Слика 2, б) које су спојене на заједнички електрични извор. [3]



Слика 2. Пример индиректног тачкастог заваривања [3]

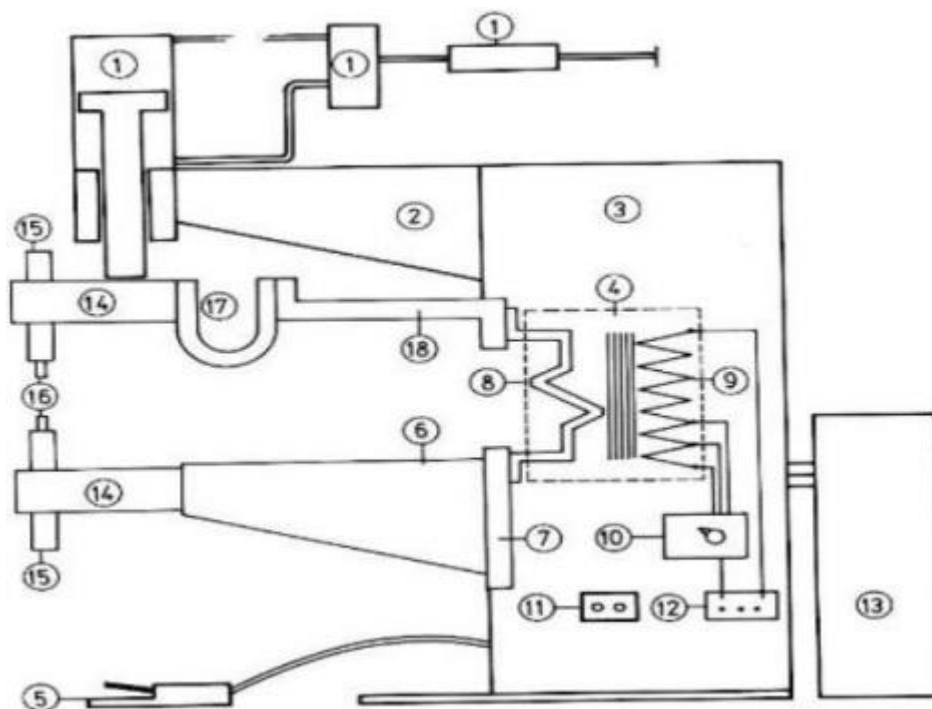
Заварени спој тачкастог заваривања није континуалан, него га чини једна или више тачака, док заваривање може бити вишетачкасто или једнотачкасто. Најчешћи облик заваривања је једнотачкасто двострано заваривање, а још неколико начина извођења тачкастог заваривања приказано је на слици 3.



Слика 3. Шематски приказ неколико начина извођења тачкастог заваривања [3]

2.2 Елементи уређаја за тачкасто заваривање

Уређаји за тачкасто заваривање састоје се из елемената који су приказани на слици 4. Савремене машине за тачкасто заваривање састоје се из, механичког система, електричног кола и опреме за управљање.



Слика 4. Шема уређаја за тачкасто заваривање са означеним елементима [3]

Означени елементи који сачињавају целину машине за тачкасто заваривање су: (1) пнеуматски састав, (2) горњи носач, (3) кућиште, (4) језгро трансформатора, (5) педала за покретање електрода, (6) доњи носач, (7) доња прикључна плоча, (8) секундар трансформатора, (9) примар трансформатора, (10) регулатор снаге, (11) прикључак за ваздух, (12) прикључно место, (13) командни ормар, (14) држач носача електрода, (15) носач електрода, (16) електроде, (17) флексибилни водич, (18) крути водич. [3]

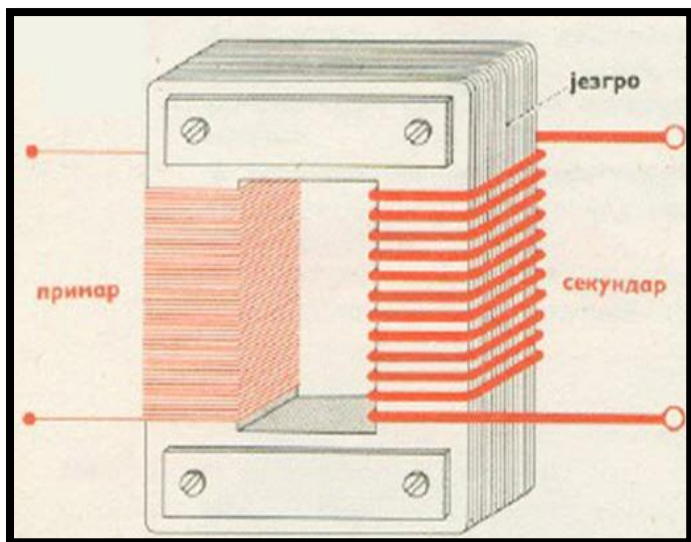
Од представљених елемената у раду ће се издвојити и описати четири најважнија:

- Трансформатор
- Електроде уређаја
- Командни ормар
- Пнеуматски цилиндар

2.2.1 Трансформатор

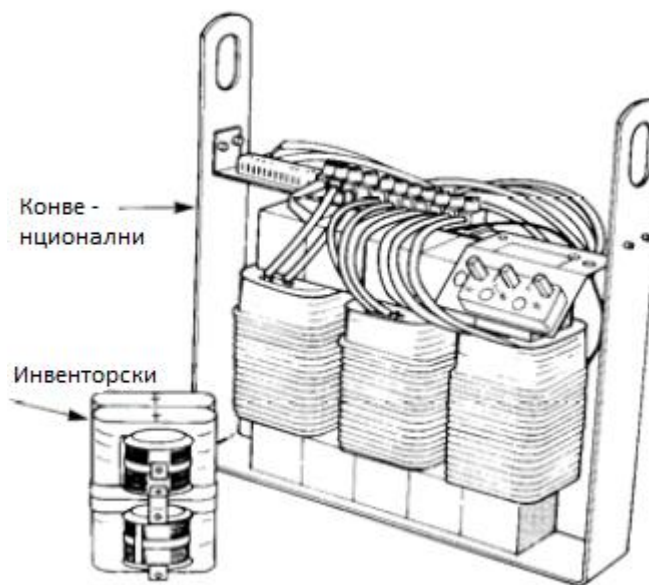
Електрични уређаји помоћи којих се врши промена напона и јачине наизменичне струје називају се трансформатори. Ови уређаји се састоје од примарног и секундарног калема (примара и секундара), намотани на раму од меког гвожђа који чини језгро трансформатора (Слика 5). [4] Реалан изглед овог уређаја се може видети на слици 6.

Најважнију улогу у електричном колу апарата за тачкасто заваривање има трансформатор, који се напаја струјом из мреже напона 380 или 220 V, а на секундарном делу даје напон 0.5 – 10 V и струју јачине неколико kA. [5]



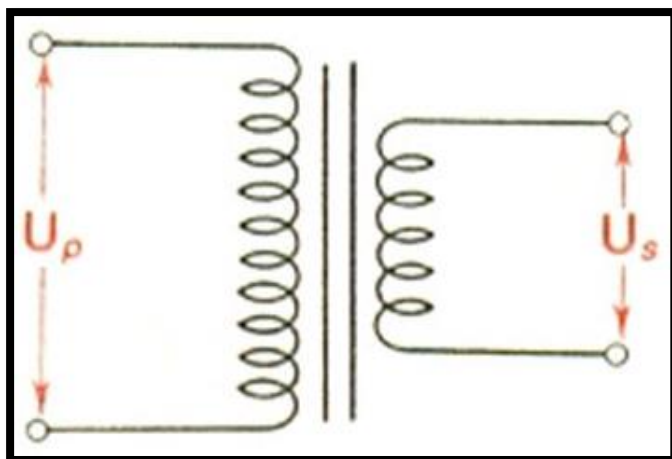
Слика 5. Скица трнсформатора са елементима [4] **Слика 6.** Изглед трансформатора

Такође поред конвенционалних постоје инверторски трансформатори. Разлика између ова два типа је што су инверторски трансформатори мањег габарита и раде на високој учестаности. Додатна предност инвертора је њихова повећана ефикасност јер су губици у бакарним намотајима трансформатора мањи у односу на конвенционалне трансформаторе, па је степен корисности инвертора већи од свих осталих извора заваривања. Овај тип извора се често користи у условима серијске и масовне производње. (Слика 7) [5]



Слика 7. Поређење величине инверторских и конвенционалних уређаја [5]

При трансформацији наизменичне струје однос напона примара и секундара обрнуто је сразмеран јачинама њихових струја. Колико се повиси напон, толико пута се смањи јачина електричне струје и обрнуто. Јачине струја примара и секундара обрнуто су сразмерне бројевима њихових навоја.



Слика 8. Симбол за приказ трансформатора са језгром [4]

Једначина трансформатора:
$$\frac{U_p}{U_s} = \frac{n_p}{n_s} = \frac{I_s}{I_p}$$

где је: U_p – напон примара, n_p – број навоја примара, U_s – напон секундара, n_s – број навоја секундара.

2.2.2 Електроде уређаја

Основни задатак бакарних електрода је да затворе струјно коло и да преносе силу притиска на место предодређено за спајање лимова. Дакле, једнако важан елемент који проводи струју заваривања, одводи топлотну енергију из зоне заваривања за време проласка струје заваривања, након заваривања регулишу струју на месту завареног споја и одређују промер завара. Такође служе за учвршћивање и одређивање положаја радних комада, постоје у разним величинама и облицима као што је приказано на слици 9. [3]



Слика 9. Електроде за тачкасто заваривање

Поред многобројних облика и величина електрода издвајају се три најважнија (Слика 10) [3]:

- Коничне - угао конуса коничне електроде износи од 120° до 140° , оне се користе за заваривање нискоугљеничних, угљеничних и нерђајућих челика, као за ливено и ковано гвожђе. Коничне електроде се лакше одржавају и имају могућност допирања до теже доступних места.
- Куполе (заобљене електроде) - куполасте електроде се користе код већих оптерећења и температура без појава оштећења. Радијус куполе ове електроде креће се од 50 mm до 100 mm, а промер заварене тачке је мањи од површинског отиска електроде. Заобљеним електродама се најчешће заварују неферитни метали (алуминијум, титан, цинк).
- Електроде са равним врхом - електроде равног врха користе се у случају потребе минималног отиска завареног споја. Код коришћења равних електрода потребно је већу пажњу усмерити на врх електроде да би био паралелан с површином радног комада.



Слика 10. Шематски приказ основних облика електрода [3]

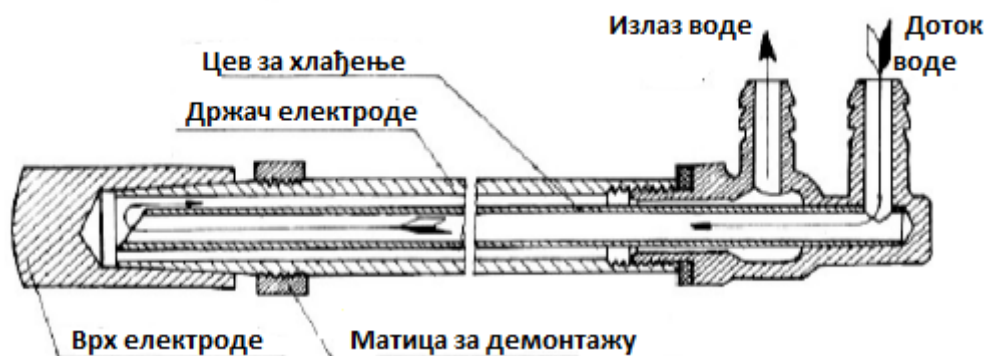
Електроде се праве од легура бакра које треба да имају што већу електричну проводност и што већу отпорност на хабање на повишеним температурама. Први захтев најбоље испуњава чист бакар, али је његова тврдоћа, посебно на повишеним температурама, недовољна. Стога се за израду електрода најчешће користе легуре бакра са хромом (0,3–1,2% Cr), са кадмијумом (0,7–1,3% Cd) или тројна легура Cu-Cr-Zr (0,5–1,4% Cr, 0,02–0,2% Zr). [5]

Из основне улоге електрода произилазе технички услови који се односе на материјале за електроде [1]:

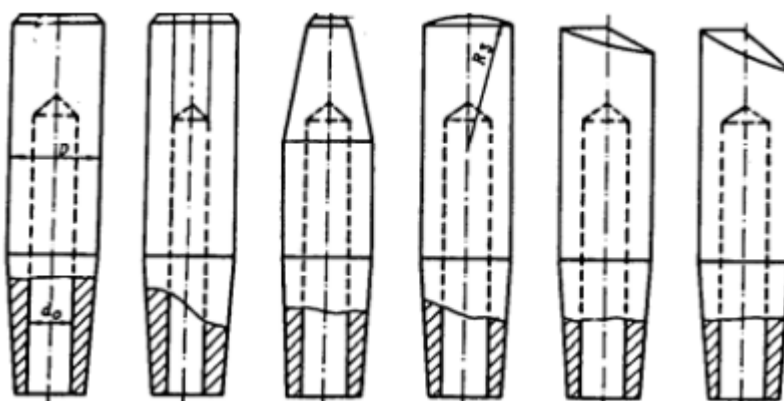
- висока топлотна и електрична проводност при собним и повишеним температурама;
- ватропостојаност, добра механичка обрадивост и термопостојаност на повишеним температурама;

- отпорност против оксидације и легирања са неким елементима из основног материјала;

У условима серијске и масовне производње тачкасто заварених склопова, деловање топлоте и притиска на електроде циклично се понавља, што при дуготрајном раду доводи до промене облика и димензија електрода. За смањење радне температуре електроде и повећање животног века, електроде се израђују с каналом за хлађење којим циркулише хладна вода. Сликаом 11 шематски су приказани основни делови цилиндричне заобљене електроде за тачкасто заваривање. [1] [3]



Слика 11. Шематски приказ цилиндричне заобљене електроде [3]



Слика 12. Пресек електроде и различити облици врха електроде [5]

2.2.3 Контролни ормар

На примеру контролног ормарића типа KD2 – 250, биће приказани регулаторски и прекидачки елементи помоћу којих се планира и проверава процес заваривања.

На предњој страни контролног ормарића уграђени су сви потребни елементи за регулацију времена и струје заваривања помоћу потенциометра, три прекидача и кодираних контактора. Сваки од прекидача има посебну намену (Слика 13) [6]:

- први за укључење и искључење програматора
- други за појединачни или аутоматски рад и

- трећи за рад са или без струје заваривања (код подешавања врхова електрода или слично када је потребно пробати без струје заваривања).

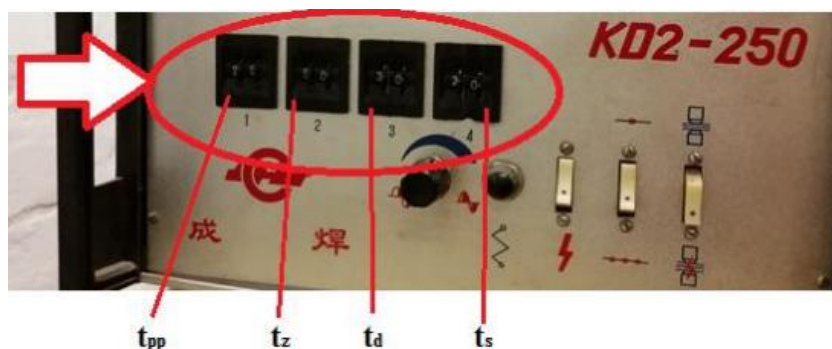


Слика 13. Контролни ормар типа KD2 – 250 [6]

Изнад кодираних контактора приказан је шематски циклус заваривања и постављене су сигналне LED диоде са индикацијом појединачног времена. Близу врха контролног ормара налазе се две сијалице које означавају укљученост уређаја и сигнализацију евентуалног прегревања.

На контролном ормарићу се такође подешавају 4 карактеристична времена преко кодираних контактора (Слика 14):

- t_{pp} - време претпритиска – време од уључења цилиндра до почетка протицања струје
- t_z - време заваривања – време пролаза струје заваривања
- t_d - време држања – време након искључења струје заваривања све до престанка деловања сила на електроде
- t_s - време паузе – време између краја једног и почетка другог циклуса у аутоматском раду



Слика 14. Регулисање времена

Комбиноване су две јачине струје заваривања означене са „Iа“ и „Iв“. Јачина струје се регулише помоћу потенциометра смештеног на контролном ормарићу приказаном на слици 15. [6]



Слика 15. Регулисање јачине струје заваривања [6]

2.2.4 Пнеуматски цилиндар

Пнеуматски цилиндри претварају енергију притиска у енергију покрета, односно претварају енергију сабијеног ваздуха у механички рад. Они су најзаступљенији елементи у пнеуматици. (Слика 16) [7]

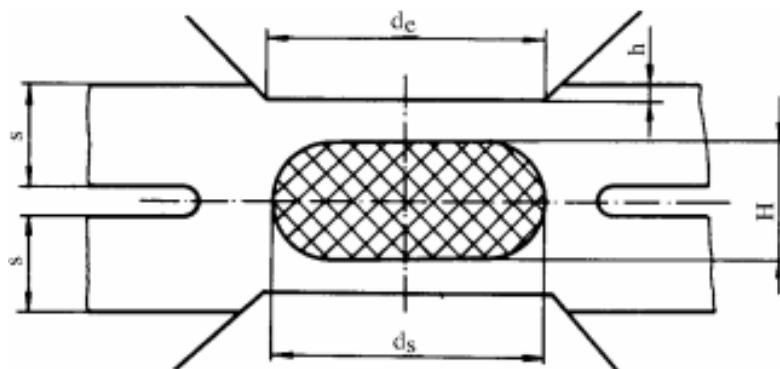


Слика 16. Различите врсте и величине цилиндара [7]

У зависности од примене могу бити компактни, краткоходи, равни, овални, минијатурни или цилиндри од нерђајућег челика.

2.3 Параметри који утичу на заварени спој код тачкастог заваривања

Процесом заваривања, као што је поменуто у раду образује се заварени спој - сочиво. Шема тачкасто завареног споја приказана је на слици 17, где је: d_e - пречник врха електроде, d_s - пречник заварене тачке (сочива), H - висина заварене тачке, s - дебљина лима и h - улегнуће послле заваривања (настало деловањем силе притиска на омекшане лимове). [5]



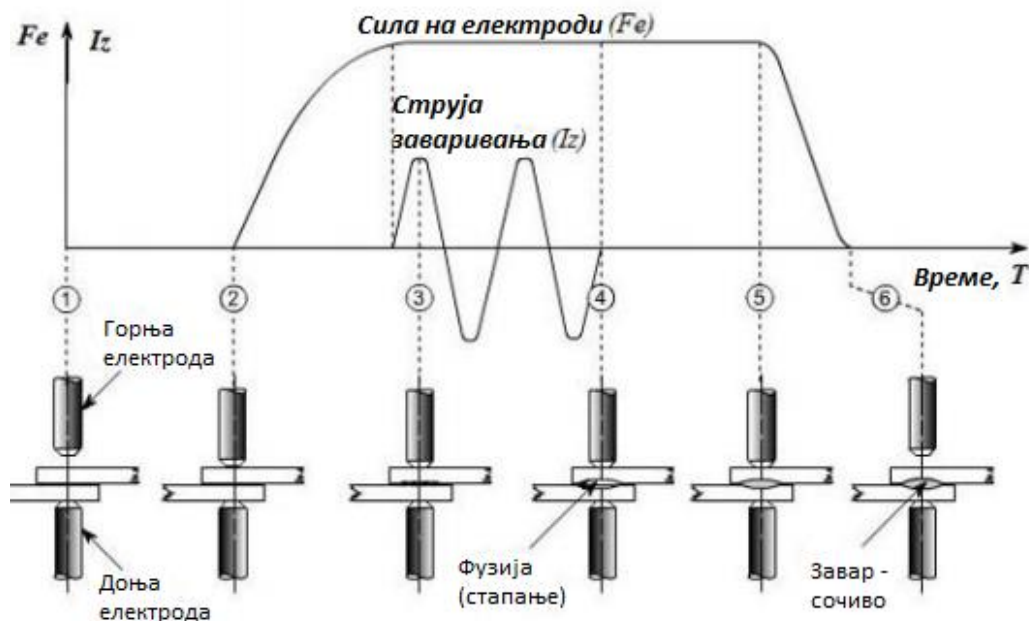
Слика 17. Шема тачкасто завареног споја [5]

На квалитет електроотпорно тачкасто заварених спојева највише утичу [6]:

- јачина струје заваривања, I_z [A]
- сила притиска електрода на материјал, F [N]
- време заваривања, t_z [s]
- димензије врхова електрода, d_e [mm]
- време приањања електрода, t_p [s]
- време одржавања силе притиска на електродама (држање), t_d [s]

Осим наведених параметара, потребно је водити рачуна о карактеристикама основног материјала, захтевима за спољни изглед завара, квалитету опреме и уређаја за заваривање као и њиховој контроли. Иако се правилно усвоје основни параметри: d_e , I_z , t_z , F , није довољно да заварен спој буде квалитетан. Потребно је исправити лимове ради бољег налегања на местима преклопа, наручито ако су лимови дебљи од 2 mm. Заштитне боје, масти, уља, оксидисане површине и друге нечистоће штетно делују при тачкастом заваривању, па се морају претходно одстранити. Нарочито је потребно очистити површине лимова на које налажу електроде, јер у противном могу настати ружни шавови са површинским грешкама или изостати формирање сочива. [1]

Јачина струје и време заваривања су међусобно повезани параметри, а у комбинацији са силом притиска на електроде њихов се однос може приказати дијаграмом, какав је на слици 18. Овакав однос се може дефинисати интегралним изразом за количину топлоте (Џулова топлота), као што је то наведено у наставку. [6]



Слика 18. Дијаграм зависности силе заваривања и јачине струје од времена [6]

2.3.1 Џулов закон

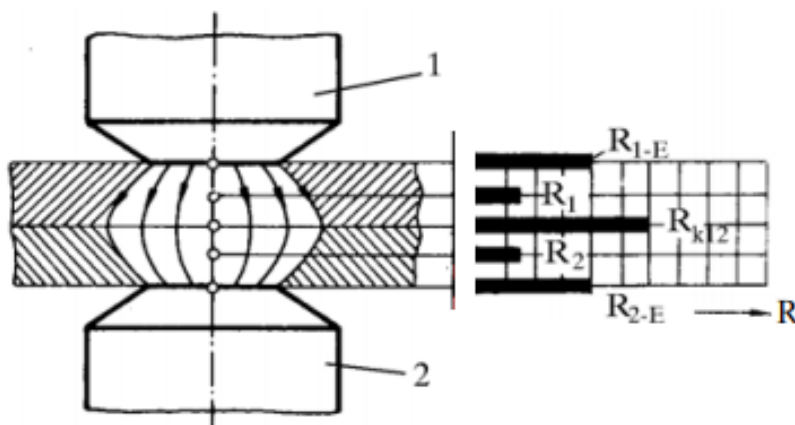
Количина топлоте која настаје при заваривању електричним отпором одређује се према Џуловом закону [5]:

$$Q = \int_0^t R(t) * I_z^2(t) * dt$$

при чему је I_z струја заваривања (A), t време заваривања (s), R_u укупни омски отпор између електрода (Ω), који може да се дефинише као збир појединих отпора:

$$R_u = R_{1-E} + R_1 + R_{k12} + R_2 + R_{2-E}$$

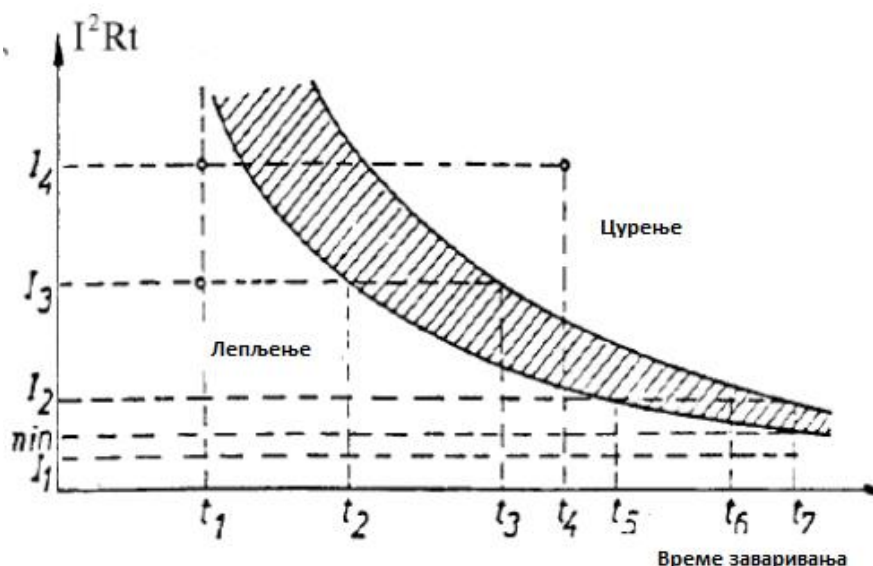
где су R_1 и R_2 сопствени отпори материјала, а R_{1-E} отпор материјала и горње електроде, R_{2-E} отпор материјала и доње електроде и R_{k12} отпор материјала и материјала, контактни отпори приказани су на слици 19. [5]



Слика 19. Електрични отпори код тачкастог заваривања [5]

2.3.2 Јачина струје

Струја заваривања је струја која пролази струјним кругом за време стварања завареног споја. То је параметар који има највећи утицај на количину произведене топлоте и који је уско повезан с временом заваривања. Обзиром на то да је тешко одредити оптималну вредност струје заваривања, може се узети минимална јачина струје која остварује заварени спој у складу са временом заваривања. Вредности времена заваривања и јачине струје при којима се може генерисати заварени спој приказане су шрафираним подручјем на слици 20. [3]



Слика 20. Зависност струје и времена заваривања

Ако се одаберу вредности струје и времена заваривања које падају лево од шрафираног подручја, могућа је појава „лепљења“ завареног споја, док на другој страни, десно од шрафираног подручја, може доћи до такозваног „цурења“, тј. прскања растопљеног материјала због презагревања. Ове појаве дјелују негативно на квалитет завареног споја. Метода која се користи за тачно одређивање вредности потребне јачине струје заваривања је поступно повећање исте до тренутка уочавања топлеења радних комада. Вредност јачине струје у тренутку почетка топлеења материјала узима се као потребна јачина струје заваривања. [3]

Као што је напоменуто вредности параметра бирају се према врсти и дебљини основног материјала. За нискоугљеничне челичне лимове дебљине од 1 до 3 mm јачина струје заваривања приближно се одређује према изразу $I_z = 6500 \cdot s$ изражено у А. [1] Осим тога, јачина струје се често одређује на основу препоручене густине струје:

$$i_0 = I_z / A_e = 4 \cdot I_z / d e^2 \pi,$$

где је $A_e = \frac{d e^2 \pi}{4}$ додирна површина електроде са лимовима. Густина се узима у границама $i_0 = 80-160 \text{ A/mm}^2$ за меке режиме заваривања или $i_0 = 160-400 \text{ A/mm}^2$ за оштре режиме. За лимове веће дебљине препоручује се мања густина струје од наведене. [1]

2.3.3 Време заваривања

Време заваривања је време у којем електрична енергија пролази кроз електроде и радни комад. За добијање квалитетног завареног споја потребна је велика контрола. Ово је уједно параметар у којем је тешко одредити оптималну вредност јер зависи од више особина, као и од извођења завареног споја, на пример: потребно је што краће време заваривања, одабрани параметри морају осигурати минимално трошење електрода (кратко време заваривања), дужице време заваривања даје већи промер завареног споја, у случају када опрема за заваривање не осигурава потребне параметре струју заваривања или силу притиска електрода, тек се тада поставља одговарајуће време заваривања.

Ако је време заваривања предуго, место заваривања може прећи тачку топљења материјала па може узроковати неисправан заварени спој. Постоји и могућност избацивања растопљеног метала из завареног споја, што може смањити попречни пресек сочива и ослабити завар. Краће време заваривања смањује могућност претераног преноса топлоте у радном комаду. [3]

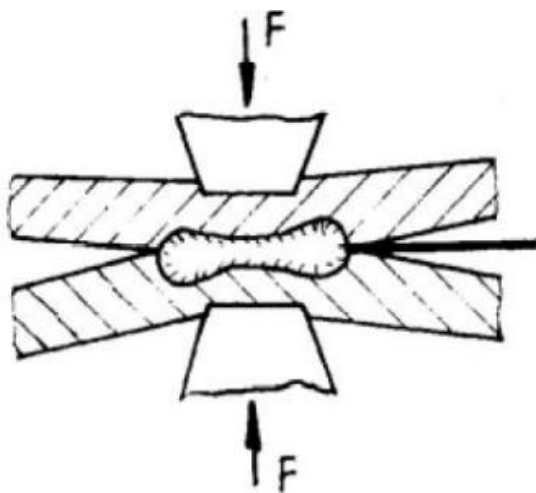
Као и код јачине струје време заваривања такође се бира према дебљини основног материјала. За нискоугљеничне челичне лимове усваја се време заваривања у секундама $t_z = (0.16-0.36) s$ или у периодама наизменичне струје (n) [1]:

$$n = \frac{t_z}{T} = \frac{(0.16-0.36)}{T} = \frac{(0.16-0.36)}{0.02} = (8 - 18) \text{ per},$$

где је T - период осциловања наизменичне струје, за $f = 50 \text{ Hz}$, $T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} = 0.02 \text{ s}$.

2.3.4 Сила притиска

Важно је осигурати довољну силу притиска, јер ће се у супротном појавити непожељан ефекат, тзв. истискивање (Слика 21). Истискивање се уочава на почетку процеса при релативно брзом загревању и недовољној сили притиска, али и на крају процеса услед прекомерног загревања. [6]



Слика 21. Истискивање [6]

Када се радни комад притисне и постане фиксиран, укључује се струја релативно високе јачине. Комбинацијом притиска између електрода и врућег метала, који се хлади под притиском, након чега се електроде раздвоје, добије се тачкасто заварени спој.

Сила притиска на електроде зависи од дебљине и напона течења основног материјала. Израчунава се по обрасцу:

$$Fz = p \frac{de^2\pi}{4}, N,$$

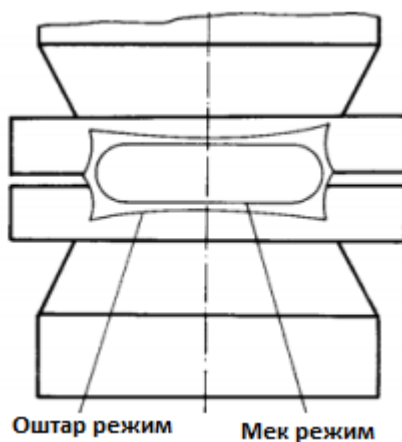
где су: p - специфични притисак електрода изражен у МПа, који се за нискоугљеничне челике препоручује у границама 49-118 МПа и d_e , mm, пречник електроде. Веће вредности притиска усвајају се за дебље предмете и јаче струје. Нешто већа сила (око 20%) потребна је при заваривању недовољно очишћених додирних површина и код површински заштићених лимова. [1]

2.3.5 Режи́ми заваривања

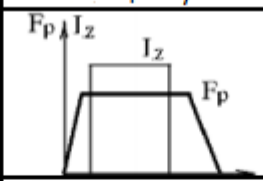
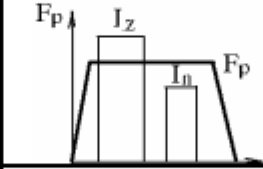
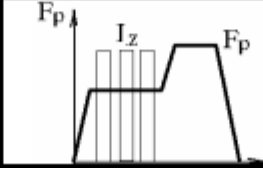
За постизање квалитетног тачкасто завареног споја потребно је дефинисати оптимални режим заваривања, што укључује и избор основних параметара заваривања: јачине струје I_z , времена заваривања t_z и силе притиска F_p која се преноси преко електрода. Према јачини струје и времену, режими заваривања могу да се поделе на [5]:

- оштре код којих је јачина струје велика, а време заваривања кратко
- меке код којих је јачина струје мала, а време заваривања дуго

Наведени режими одражавају се на облик заварене тачке, који је у случају меког режима готово елиптичан, а у случају оштрог режима јављају се карактеристична испупчења по ћошковима (Слика 22). Промена јачине струје I_z и силе притиска F_p током заваривања чине циклус заваривања. Табела 1.



Слика 22. Различити облици сочива

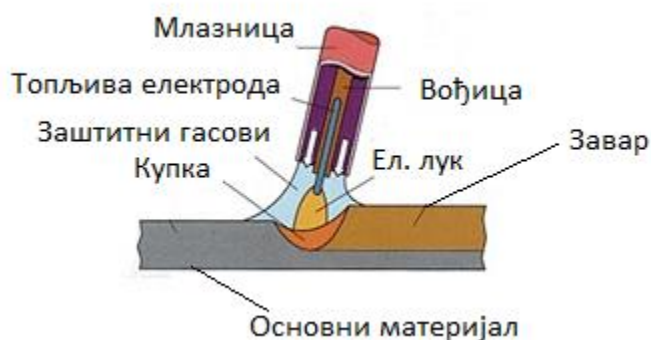
Назив циклуса	Шема циклуса	Подручје примене
Једноимпульсно тачкасто заваривање константним притиском електрода		Заваривање нискоугљеничних и ниско легираних челика дебљине највише до 6 mm
Двоимпульсно тачкасто заваривање константним притиском електрода (заваривање с накнадном термичком обрадом)		Заваривање закаљивих челика
Вишеимпульсно тачкасто заваривање променљивим притиском електрода		Заваривање челика дебљине лима веће од 6 mm

Табела 1.Режими електроотпорног тачкастог заваривања челика [5]

3. Принцип рада MIG/MAG заваривања, елементи и његови технолошки параметри

3.1 Принцип рада MIG/MAG заваривања

Ови начини заваривања заснивају се топљењем материјала електричним луком. При лучном заваривању у заштити гаса са топљивом електродном жицом (gas metal arc welding- GMAW) користи се спољашњи довод заштитног гаса ради заштите лука и растопљеног метала шава од оксидације у ваздуху. Додатни материјал је непрекидна гола електродна жица која се доводи преко механизма за довођење жице и заваривачког “пиштоља”. Нискоугљенични челици, нисколегирани челици повишене чврстоће и нерђајући челици као и легуре мегнезијума легуре бакра и други метали могу се наносити. Пиштољ доводи како заштитни гас тако и електродну додатну металну жицу до шава. MIG/MAG поступци заваривања могу се изводити ручно или могу бити потпуно аутоматизовани. [8]



Слика 23. Шема заваривања MIG/MAG поступком [9]

Главна разлика између MIG (Metal Inert Gas) и MAG (Metal Active Gas) је у заштитним гасовима, што се може закључити из назива истих. Код MIG заваривања се користе инертни гасови попут аргона (Ar), хелијума (He) или њихових мешавина. Код MAG заваривања користе се активни гасови, најчешће угљен-диоксид CO₂ и његове мешавине са другим гасовима, стога се MIG и MAG нераздвајају при описивању основних обележја, већ се само указује на извесне разлике које се односе на посебну заштиту неких метала и легура. [9]

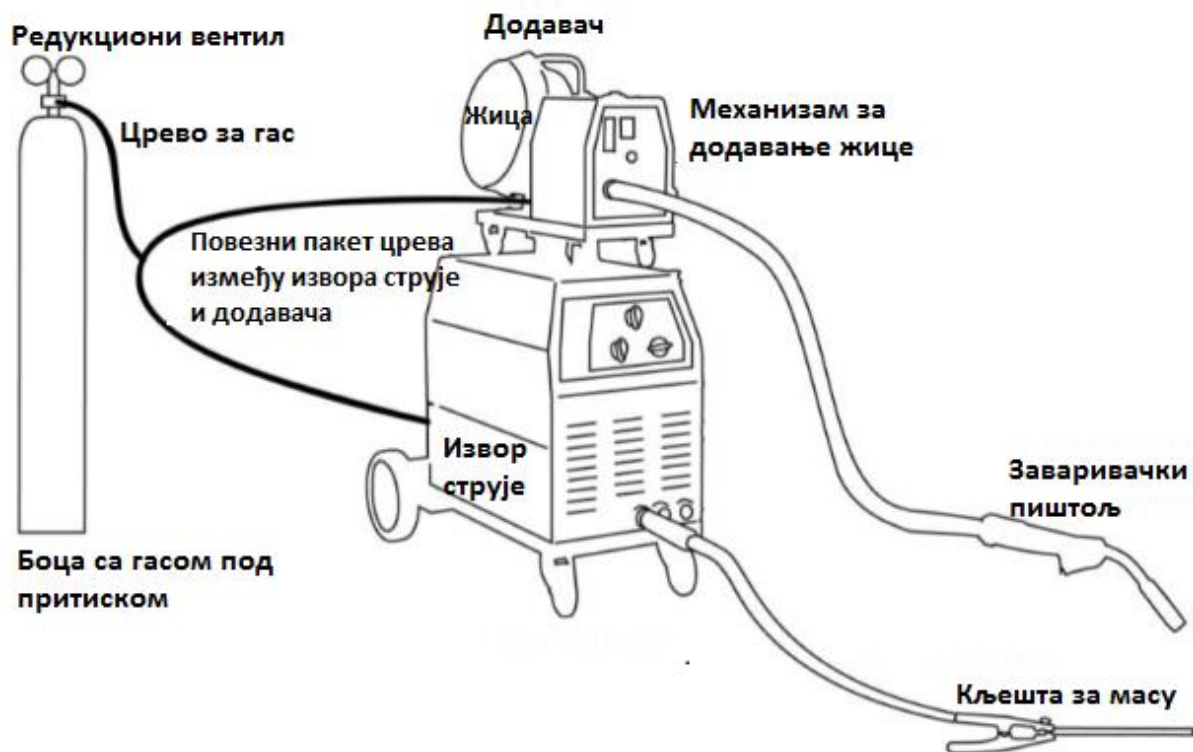
Развитак MIG/MAG поступка заваривања налази се у њиховој једноставној и техно-економски оправданој примени. Може се радити континуално без прекидања, ради замене електрода или узимања нове жице за заваривање. [8] Дакле, предност је у лакшој механизацији и аутоматизацији од неких поступака заваривања (REL), што омогућава већу брзину а тиме и продуктивнији рад. MIG/MAG заваривање је механизовано тако што се жица континуално доводи у жлеб помоћу малог електромотора и одговарајућег механизма, па заваривачу остаје само да равномерно помера заваривачки пиштољ дуж линије спајања. [1] Реалан изглед MIG/MAG уређаја за заваривање приказан је на слици 24.



Слика 24. Реалан изглед MIG/MAG уређаја за заваривање са боцом заштитног гаса

3.2 Елементи уређаја за MIG/MAG заваривање

Елементи од којих је састављен уређај за MIG/MAG заваривање могу се видети на слици 25. Биће издвојена и описана четири најважнија дела од представљених.



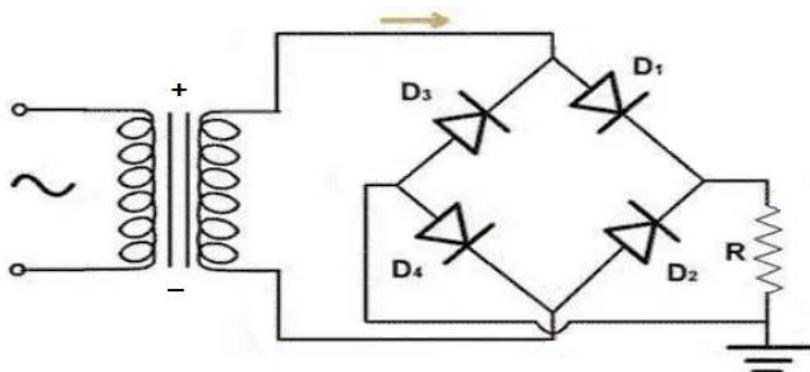
Слика 25. Изглед уређаја MIG/MAG са елементима [10]

Најнеопходнији делови уређаја за овај поступак заваривања су:

- извор струје
- механизам за додавање жице
- боца са гасом
- заваривачки пиштољ

3.2.1 Извор струје

Код MIG/MAG поступака користе се само извори једносмерне струје. Најчешће се користи једносмерна струја обрнутог поларитета. Већина заваривачких машина једносмерне струје су константног напона.



Слика 26. Шема исправљача са трансформатором

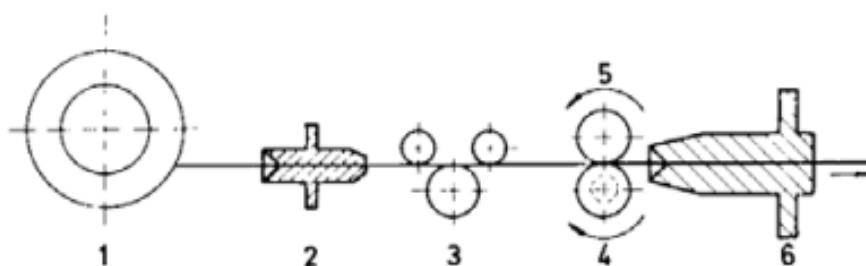
Извор напајања за MIG/MAG је заваривачки трансформатор (погледати поглавље 2.2.1) са исправљачем на секундару (Слика 26). Наизменична струја се из секундарног намотаја спроводи у исправљач да би се добила једносмерна струја неопходна за заваривање. Наизменична струја се исправља у једносмерну помоћу силицијумских диода мостно повезаних. [1] [8] Реалан изглед исправљача је на слици 27.



Слика 27. Реалан приказ исправљача [10]

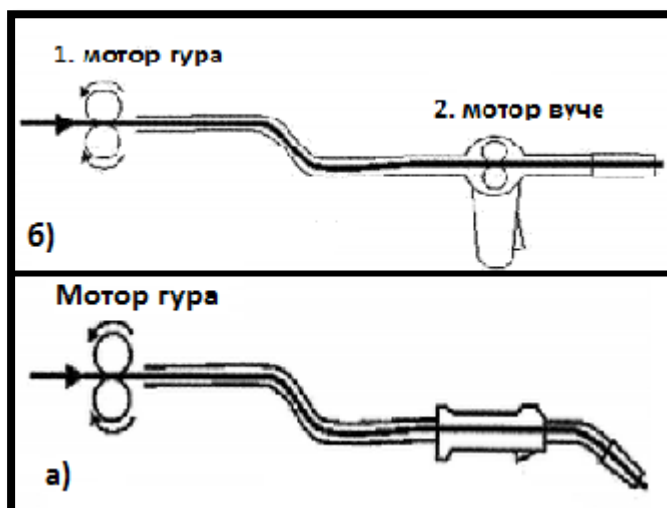
3.2.2 Механизам за додавање жице

Уређаји за довођење жице састоје се од: (1) котура са жицом, (2) излазне вођице, (3) ваљака за усмеравање жице, (4) погонских ваљка, (5) притисног ваљка и (6) улазне вођице, што се види са слике 28. [5]



Слика 28. Шема довођења жице [5]

Регулатор доводи жицу са претходно подешеном брзином кроз савитљиви вод у заваривачки пиштољ кроз лук а затим у метал шав. Жица за заваривање на скоро свим релативно великим направама за одмотавање постављена је на стуб са кога се она доводи кад се калем обрће. Погонски точкови унутар механизма за довођење жице, помоћу малог електромотора врше гурање или вучење. Постоје три основне врсте уређаја за довођење жице. То су уређаји за довођење типа гурања (Слика 29, а), уређаји за довођење типа вучења и уређаји за довођење типа гурање-вучење (Слика 29, б).



Слика 29. Додавање жице типа гурањем и типа гурање-вучење [11]

Уређаји не доводе аутоматски жице свих пречника, точкови за довођење често се морају променити да би се прилагодили опсегупречника жице која се доводи. [8] (Слика 30)

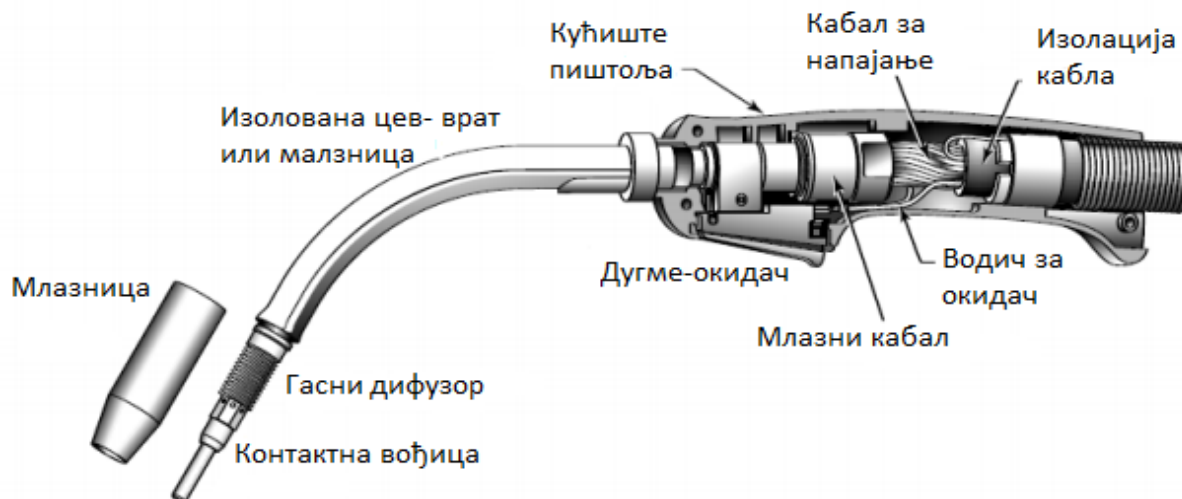


Слика 30. Точкићи за разне пречнике жица [10]

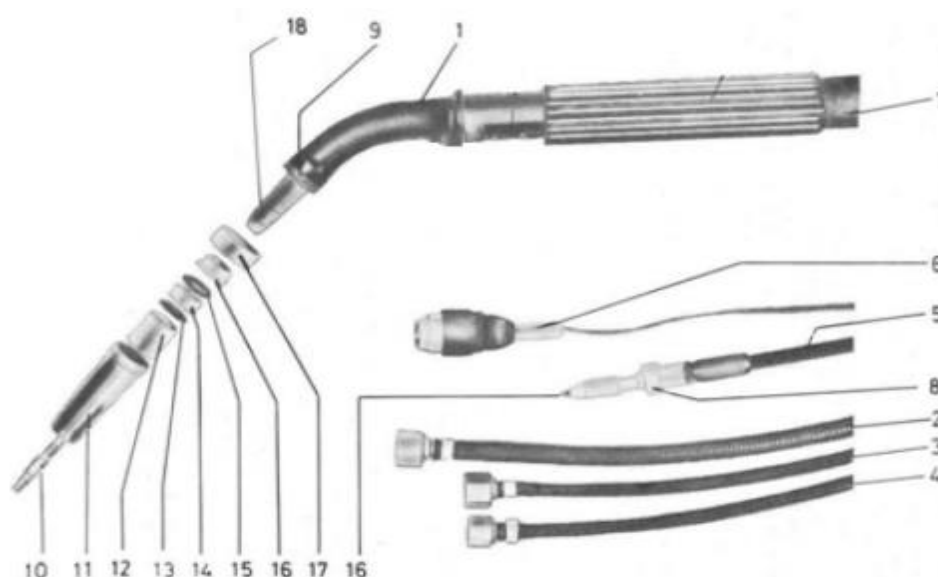
3.2.3 Заваривачки пиштољ

Пиштољ за заваривање је основни алат заваривача код MIG/MAG заваривања. Конструкција пиштоља зависи од јачине уређаја, врсте заваривања (полуаутоматско, аутоматско, роботизовано), како ће се доводити жица у пиштољ. Пиштољи се израђују у две основне варијанте. За струје од 100 до 500 А производе се ваздушним хлађењем, док се за струје од 200 до 600 А производе воденим хлађењем. [11, 12]

Пиштољ је компонента опреме за заваривање која спада у део потрошних материјала тј. у пиштољу су поједини делови потрошни. Зависно од услова рада, делови се мењају по потреби. [11] Пиштољ као целину чине појединачни делови који су приказани на слици 31.



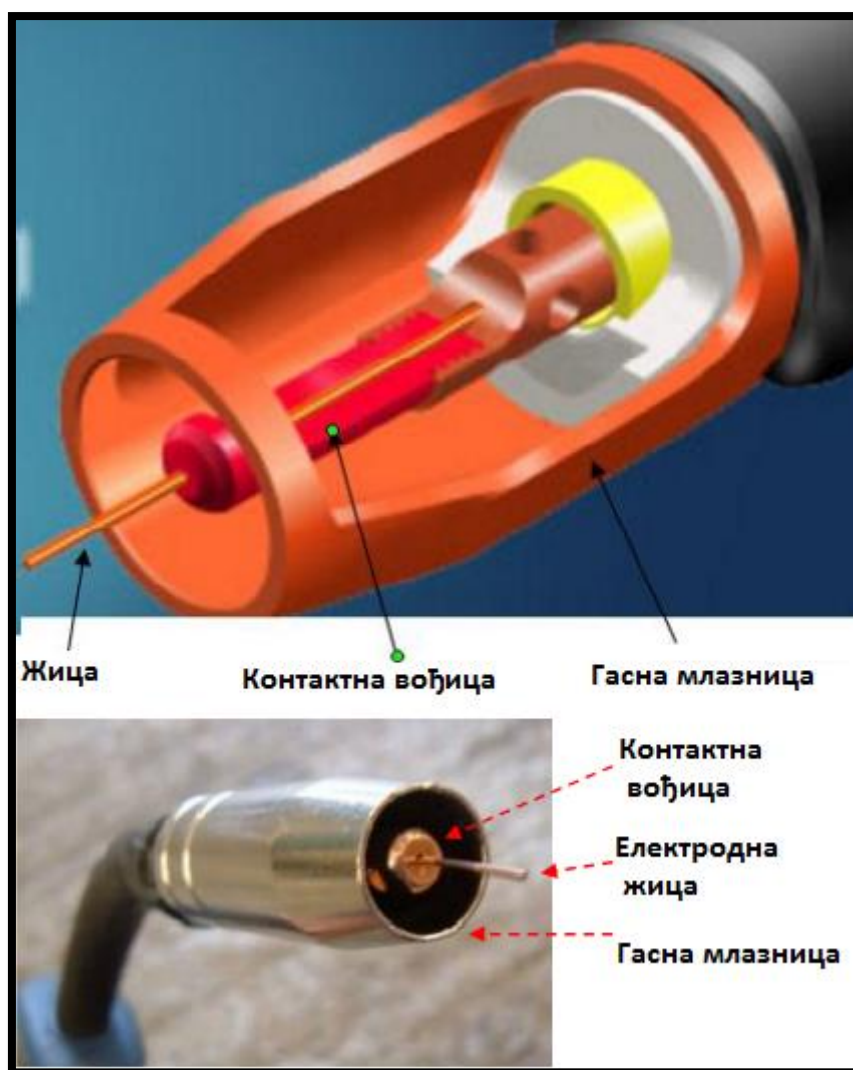
Слика 31. Компоненте пиштоља за заваривање ваздушним хлађењем [12]



Слика 32. Компоненте пиштоља са воденим хлађењем [13]

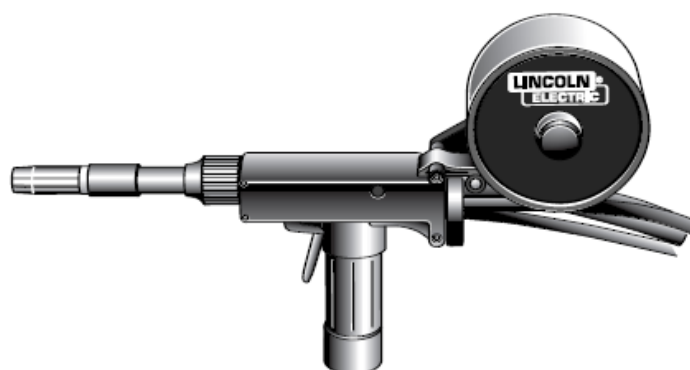
Као што се може уочити са слике 32 пиштољ са воденим хлађењем се састоји од: (1) цеви пиштоља, (2) проводника струје са воденим хлађењем, (3) црева за расхладну воду, (4) црева за довод гаса, (5) облоге (бужир) за довод жице, (6) контролног кабла, (7) заштитног црева, (8) улазне вођице за жицу, (9) одстојна чаура, (10) контактне вођице, (11) млазнице за гас, (12) изолационог прстена, (13) заптивног прстена, (14) одстојног прстена, (15) притисног прстена, (16) уматак за довођење жичане електроде од Al, (17) навртке за повезивање, (18) гасне малазнице.

Контактна вођица пиштоља налази се скоро у електричном луку што захтева издржљивост на механичка и топлотна напрезања. Температуре достижу и до $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ у близини контактне вођице, која је направљена од бакра. Унутрашњост контактне вођице је битна, зато што жица мора лако проћи кроз њу како би се постигао што бољи електрични лук, али и стабилност ради бољег завара. Врсте и величине контактне вођице зависе од пиштоља, жице, итд. [13]. Слика 33 приказује пресек и реалан изглед врха пиштоља.



Слика 33. Врх пиштоља за заваривање

Комбинација MIG/MAG пиштоља и уређаја за довођење жице садржи мали калем жице унутар кућишта пиштоља. Ови пиштољи са калемом често се користе за довођење fine жице (меке жице малог пречника-алуминијумска жица пречника 0.76 mm) коју би на други начин било тешко или немогуће довести кроз друге савитљиве водове. Слика 34. [8]



Слика 34. Заваривачки пиштољ са калемом жице [12]

3.3 Параметри који утичу на заварени спој код MIG/MAG заваривања

Две најзначајније карактеристике завара које треба регулисати су висина завара и ширина завара. Ово је значајно обезбедити да би се заварени спој правилно попунио са минимумом грешака завривања. У овом случају ако је висина завара сувише велика постаће веома тешка израда следећих завара који треба да имају добар увар. Може се мењати како величина завара тако и његов облик. [8]

Од разних међусобно узрочних параметара који утичу на облик и квалитет завара биће издвојени следећи:

- јачина струје
- напон заваривачког лука
- брзина заваривања
- брзина довођења жице
- заштитни гас

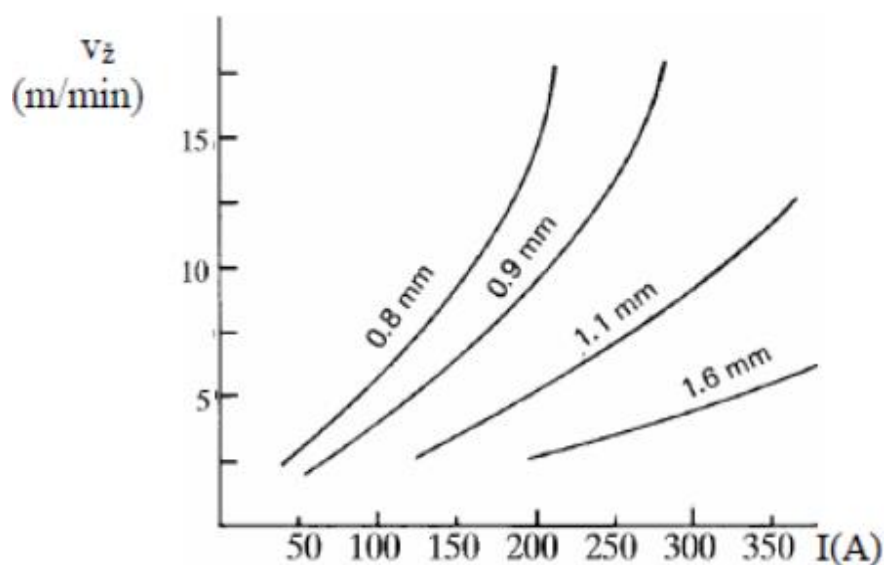
Поред ових корисно је дати још неколико напомена које се односе на припрему за MIG/MAG заваривање и без којих заварени спој неће бити квалитетан потребно је: одабрати врсту и величину електродне жице сходно радном предмету, усвојити брзину довођења жице, испробати на празно (без струје) рад са заваривачким пиштољем и подесити дужину слободног краја жице, утврдити технику заваривања .

Прилагодити радни предмет према дебљини. MIG/MAG заваривање се може изводити у природном I – жлебу (правоугаоном), V - жлебу, 1/2V жлебу и K - жлебу. Челичне лимове/плоче дебљине до 12 mm могуће је обострано заваривати у I - жлебу, а за веће дебљине потребно је закошавање и више пролазно заваривање. [1]

3.3.1 Јачина струје

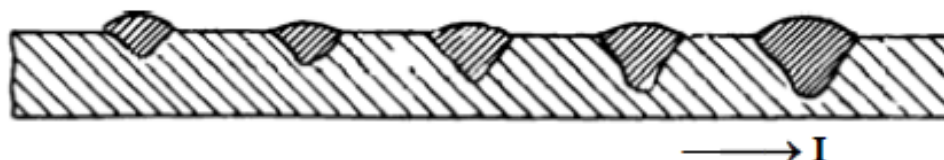
Подешавање јачине струје врши се помоћу прекидача за регулацију напона. Постоји велики број положаја регулације, чије се вредности налазе на предњој страни апарата за заваривање. Променом положаја прекидача мења се напон на излазу уређаја за заваривање, а тиме се коригује и струја заваривања. [14]

Јачина струје заваривања директно зависи од подешавања брзине довођења жичане електроде. Дакле, струја заваривања се подешава узајамно са брзином довођења жичане електроде. [15] Ако жица има већу доводну брзину потребно је да буде већа и јачина струје, такође ако је већи промер жице. Зависност брзине довођења жице, односно топљења жице и јачине струје је линеарна за мање вредности струје, док код већих струја постаје нелинеарна. [16] Дијаграм на слици 35, приказује зависност брзине довођења жице и јачине струје.



Слика 35. Зависност јачине струје и довођења жице [16]

Са прејакком струјом заваривања при осталим непромењеним параметрима долази до: већег уваривања у основни материјал, лошијег изгледа лица шава, веће надвишење шава, оштри заједи од прегревања у прелазној зони (уз завар), повећања распрскавања (пуцни). Са преслабом струјом заваривања при осталим непромењеним параметрима долази до: недовољног уваривања, неједнаке ширине површине шава (завара), могућности појаве налепљивања. [15]



Слика 36. Зависност облика шава од јачине струје [15]

Код МАG поступка заваривања уобичајене вредности струје заваривања се крећу од 100 до 200 А/мм². Узима се у обзир површина пресека електродне жице чији је пречник 1 mm, тако да је њена површина 0,785 mm². Ово значи да се струја креће у границама од 78 до око 160 А. [15]

Јачина струје (I_{1.2} и I_{1.6}) за електродну жицу пречника d= 1.2 mm и d=1.6 mm код МАG поступка рачуна се према следећим изразима [1]:

$$I_{1.2} = 308 \cdot \log V_t - 17, \text{ A},$$

$$I_{1.6} = 378 \cdot \log V_t + 26, \text{ A}.$$

Заваривање у принудним полжајима се изводи са јачинама струје које су мање од оних које су препоручене за хоризонтални – положени положај заваривања: за принудни положај (вертикални) струја се умањује за 10 – 15 %, за принудне положаје (надглавни, хоризонтално – вертикални) струја се умањује за 15 – 20 %, за унутрашње угаоне спојеве струја је мања 5 – 10 %, за заваривање CrNi челика струја се умањује 25 – 30 %. [15]



Слика 37. Приказ лоших завара зависно од струје [15]

3.3.2 Напон заваривачког лука

Из почетка поглавља 3.3.2 може се закључити да на контролној табли не постоји посебан елемент за регулацију струје, већ се помоћу прекидача за промену напона коригује и струја заваривања.

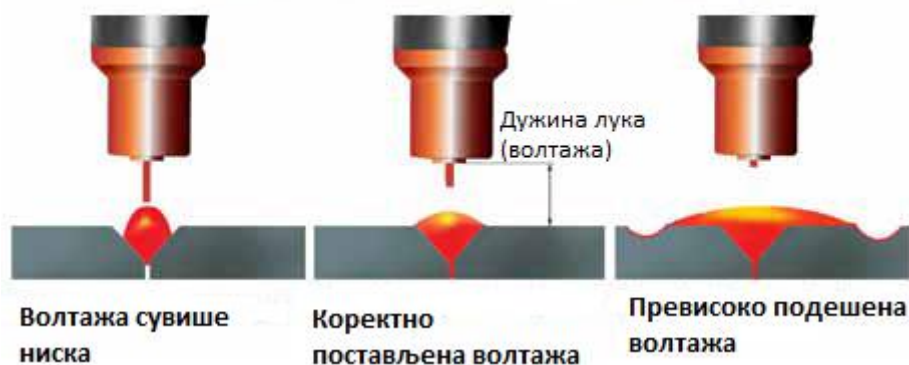
Напон лука (дужина лука) користи се за регулацију облика завара. Када се напон лука повећа висина завара се смањи а ширина завара се повећа. Шав постаје равнији. Укупна величина завара (количина метала шаву у њему) остаје иста. Само се облик и изглед површине завара мења. Повећавајући ширину завара, он по висини постаје стрмији и метал шаву кваси основни материјал ефикасније. Увар (растапање) у радни комад се побољшава. [8]

Вредност напона заваривања а и струје заваривања директно зависи од величине извученог дела електродне жице - извучени део мерено од дизне. Слика 38. [15]



Слика 38. Шематски облици вара с обзиром на дужину излаза жице [15]

Волтажа сувише ниска (дугачак заваривачки лук): заваривачки лук је нестабилан, лице шава (завара) има груб изглед (наребрен), лошија је заштита завара (растопа). Волтажа сувише висока (прекратак заваривачки лук): овај лук се урања у растопљени метал завара тако да се услед тога растоп узбуркава и креће испред лука на загрејану површину лима где постоји велика опасност од налепљивања и заједа. Видети слику 39.



Слика 39. Шематски облици вара са обзиром на волтажу

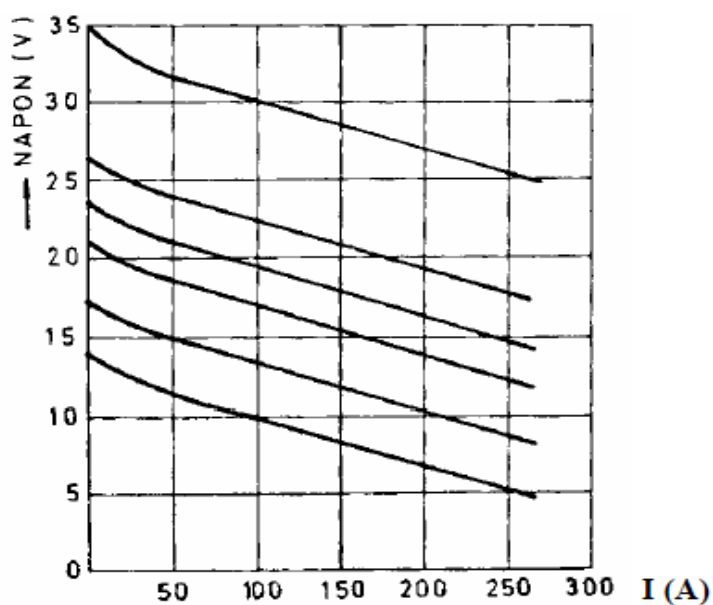
Радни напон електричног лука код MAG поступка може се добити по формули [1]:

$$U = 14 + 0.05 \cdot I, V.$$



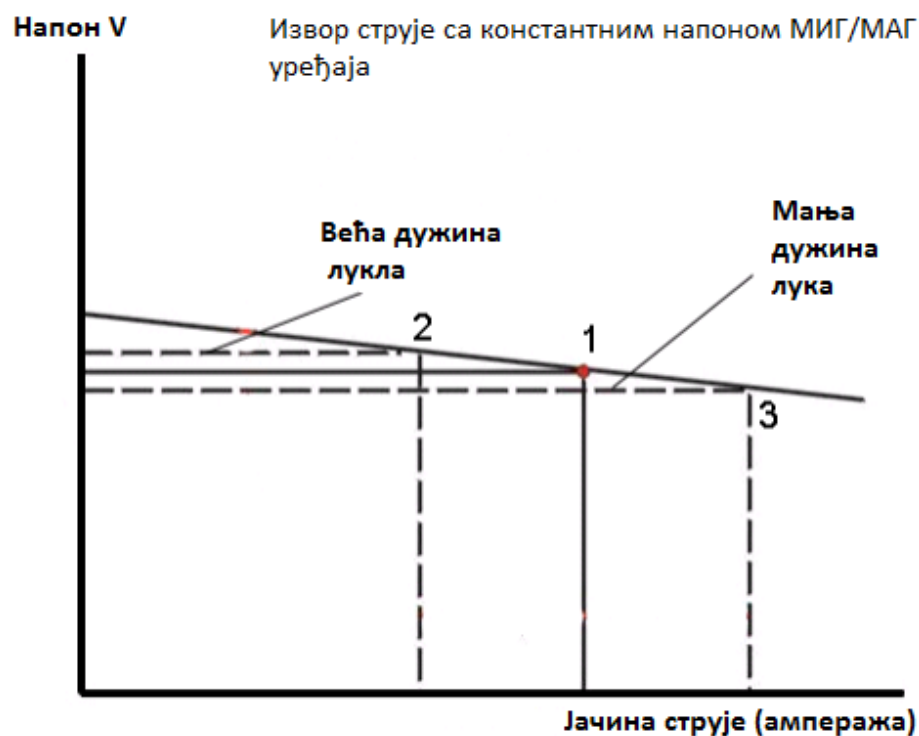
Слика 40. Приказ лоших завара зависно од напона [15]

Основна карактеристика сваког извора струје је зависност напона од јачине струје, односно његова спољна или статичка карактеристика. За полуаутоматске поступке заваривања (MIG/MAG) по правилу се користи благопадајућа, односно константна карактеристика извора. [5] На слици 41. приказан је извор који има 6 струјно-напонских карактеристика што омогућава да се напон празног хода регулише у опсегу од 14 до 35 V. Одабрани напон и брзина довођења жице одређују јачину струје и напон лука а тиме и облик преноса металних капљица од жице у купку. [1]



Слика 41. Благопадајућа струјно-напонска карактеристика [5]

Заваривање оптималним напонам (дужином лука) и оптималном брзином жице која даје коректну јачину струје означено је тачком 1. (Слика 42) Све време жица излази брзином која је задата на командној табли, а јачина струје има вредност топљења жице тако да лук одржава равномерним. Покушајем да се смањи лук (примицање пиштоља) тачка 3, истом брзином којим се слук смањено повећала се јачина струје (видети амперажу испод тачке 3 колико је већа од ампераже испод тачке 1). Тако јака струја брзо истопи жицу, након чега се лук враћа на првобитни положај, тачка 1. Исто се дешава ако заваривач покуша да одмакне пиштољ да би повећао дужину лука, тачка 2. Брзина којом оператер одмакне уређај смањује амперажу (видети колико је јачина струје испод тачке 2 мања од јачине струје испод тачке 1), жица се спорије топи, након чега се враћа на почетни положај, тачка 1. [10]



Слика 42. Струјно-напонска статичка карактеристика [10]

MIG/MAG заваривачки уређаји су извори струје чије је својство само-регулација дужине електричног лука. Заваривач не може контролисати дужину лука примицањем или одмицањем пиштоља, дужину лука аутоматски одржава уређај истом све време.

3.3.3 Брзина заваривања

Брзина заваривања подразумева брзину којом се електрични лук помера по линији спајања – заваривања.



Слика 43. Утицај брзине заваривања на облик шави [15]

Када је брзина заваривања превелика добија се: релативно мали растоп (узак), мала дубина уваривања (проваривања), завар је узак, долази до појаве зареза на прелазу заваара према основном материјалу. Дакле, брзина заваривања директно утиче на дубину уваривања, ширину и надвишење заваара као и на количину унешене топлоте. Мањом брзином заваривања добија се већа унешена топлота и већа брзина заваривања даје мањи унос топлоте.



Слика 44. Приказ лоших заваара зависно од брзине заваривања

Поред технолошки искуствених табела (табела 2) у којима су оквирно дате вредности за брзину заваривања, струју, напон, брзину додавања жице, праве вредности параметара (са којима се добија најоптималнији заварени спој што се тиче карактеристика и визуелног изгледа) се утврђују на основу проба које треба урадити пре почетка израде конструкције, на пробним комадима. Ове пробе се раде са више комбинација параметара заваривања што значи да је један завар потребно пробати урадити са 3 – 5 комбинација параметара заваривања. [15]

Брзина заваривања (V_z) рачуна се по изразу [1]:

$$V_z = \frac{m \cdot 6000}{A_z \cdot \rho}, \frac{cm}{min},$$

где је: m - маса депонованог метала у g/s , A_z - површина заваара у mm^2 , ρ - густина додатног материјала у g/cm^3 .

Табела 2. Режи́ми полуаутоматског и аутоматског заваривања сучеоних спојева у заштитном гасу CO₂ [1]

Дебљина материјала	Зазор	Број пролаза а	Пречник електродне жице	Струја заваривања	Напон	Брзина заваривања	Проток гаса
mm	mm	-	mm	A	V	m/h	l/min
0.6-1.0	0.5-0.8	1	0.5-0.8	50-60	18-20	20-25	6-7
1.2-2.0	0.8-1.0	1-2	0.8-1.0	70-100	18-20	18-24	10-12
3.0-5.0	1.6-2.0	1-2	1.6-2.0	180-200	28-30	20-22	14-16
6.0-8.0	1.8-2.2	1-2	2.0	250-300	28-30	18-22	16-18
8.0-12.0	1.8-2.2	2-3	2.0	250-300	28-30	16-20	18-20

3.3.4 Заштитни гас

Уопштено говорећи о заваривању топљивом електродном жицом, могу да се користе следећи заштитни гасови:

- инертни- аргон (Ar), хелијум (He),
- активни- угљен-диоксид (CO₂,) азот (N₂),
- мешавина гасова (Ar+He, Ar+CO₂, Ar+O₂)

Сви заштитни гасови се испоручују у челичним боцама под притиском који се редукционим вентилом (Слика 45) свде на радни притисак од неколико *bara*. Инертни гасови (Ar, He) под притиском од $150 \pm 3 \text{ bara}$, а активни као што је CO₂ под притиском од 60-100 *bara*. [1]



Слика 45. Редукциони вентил за Ar/CO₂ са протокомером и манометром [10]

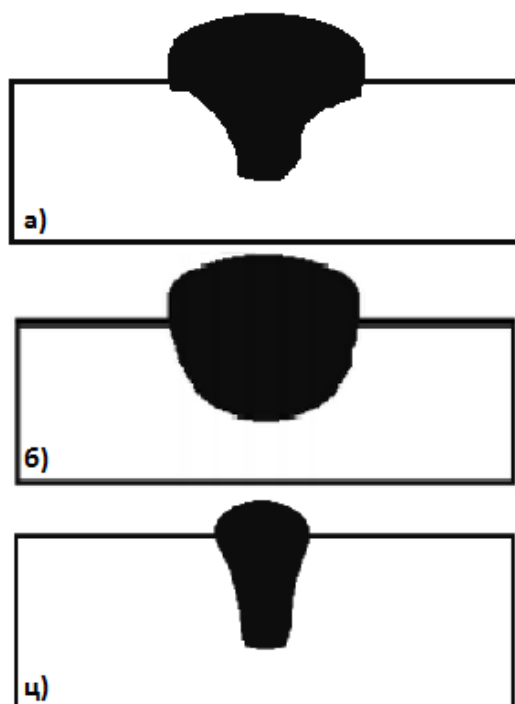
CO₂ се највише употребљава као заштита за израду разних заварених конструкција од нискоугљеничних инисколегираних челика пошто је јефтинији од аргона, а омогућава већу радну брзину као и дубље уваривање. Бољи је него аргон за неумирених угљеничних челика, ако се ови челици заварују у чистом аргону појављују се гасни мехурови у металу шава.

Инертни гасови углавном Ar најчешће се користе за заваривање нерђајућих челика, нежелезних метала и нихових легура (Al, Mg, Cu). За спајање танких делова од метала

мање термичке проводности боље је и јефтиније користити аргон, за Al, Cu, Mg може се употребити смеша Ar+He. [1]

Проток гаса зависи од доста фактора, као на пример: којим гасом се заварује (потребан проток гаса CO₂ је мањи него Ar+CO₂), којом се брзином заварује (већа брзина заваривања, већи проток гаса је потребан), којом јачином струје се ради (већа ампеража већи је проток), ширина млазнице (са широм млазницом је већи проток), материјал који се вари (за Al је погодно више гаса). [10]

На слици 46, (а) види се утицај заштитног гаса аргона на геометрију завара, под (б) је приказан утицај хелијума на геометрију завара и са (ц) је означено утицање угљен-диоксида на геометрију завара.



Слика 46. Утицај различитих заштитних гасова на облик завара

Количина заштитног гаса такође завис од промера жице. Потрошња гаса знатно се повећава на отвореном простору. Просечне количине потребног гаса приказане су у табели 3. [17]

Табела 3. Потрошња гаса у зависности од промера жице [17]

Промер жице (mm)	Потрошња гаса (l/min)
0.8	Од 6 до 8
1.0	Од 8 до 10
1.2	Од 10 до 12
1.6	Од 14 до 16

4. Поређење параметара који утичу на финални квалитет производа тачкастог и MIG/MAG заваривања

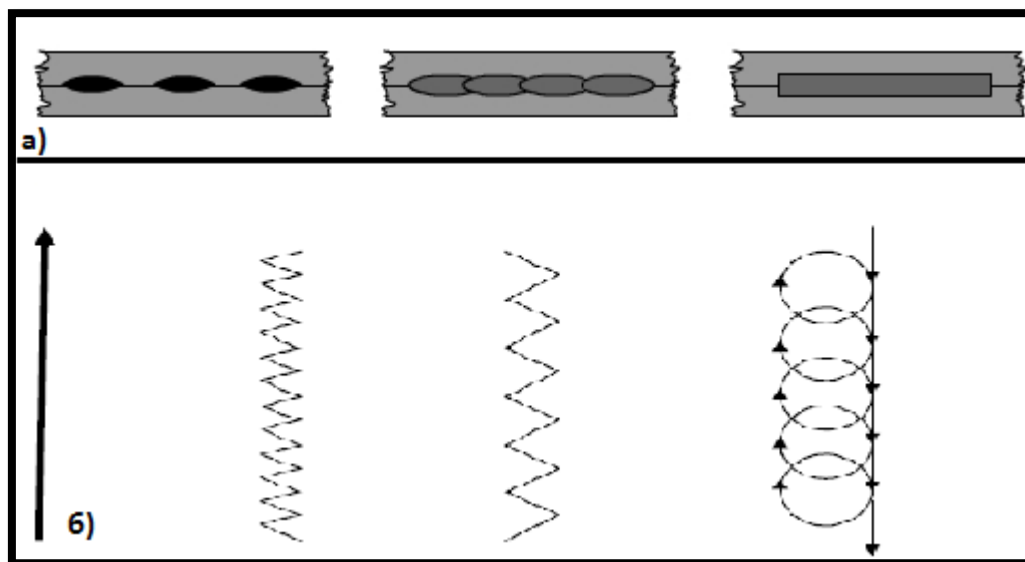
Предности заваривања оба начина огледају се у могућности аутоматизације и роботизације. Висока поновљивост и флексибилност робота омогућава висок квалитет и економичност израде завара. Један од најважнијих фактора и предности робота у односу на људског оператера је могућност флексибилног и истовременог покретања више оса како би постигао и остварио задату путању комплексног радног комада. Применом робота расте поузданост процеса што гарантује квалитетнији и поузданији завар.



Слика 47. Заваривачки роботски уређај MIG [18]

Робусни уређај за заваривање од дужине роботске руке 2000 mm је лагане конструкције, компактне структуре, брзи динамички одговор, стабилан и поуздан рад. Производ је једноставан за инсталацију, заузима мало простора, испуњава захтеве флексибилне производње. Може се брзо ставити у производњу и побољшати учинковитост. Широко се користи у заваривању бицикала, прибора за електричне аутомобиле, ограде, пољопривредних машина, прибора за намјештај, ауто дијелова, седишта за аутомобиле, спортске опреме, медицинске опреме. [18]

Још једна од разлика између електроотпорног и MIG/MAG заваривања је у техници заваривања. Док су код електроотпорног тачкастог заваривања електроде у стању мировања током заваривања (део операције заваривања када се струја пропусти кроз преклопни спој), електродна жица код MIG/MAG заваривања се током пропуштања струје константно мора померати преко места споја и то на различите начине. Слика 48.



Слика 48. Кретање завара

а) код електроотпорног заваривања б) код MIG/MAG заваривања [15]

Пратити слику 48, б. Прво се увиђа праволинијско кретање, које се примењује се код делова мањих дебљина у хоризонталном положају и за све случајеве заваривања “одозго—надоле”. Такође се примењује при заваривању вишезаварним начином (везаним заварима) и у одређеним случајевима код коренских завара. [15]

Друго и треће тзв. уско њихање (15–40 mm ширина) се примењује за заваривање у свим положајима и за заваривање угаоних спојева у принудним положајима.

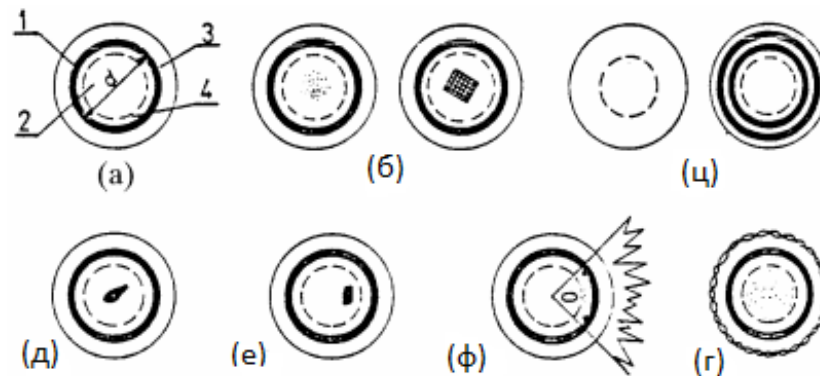
Померање у облику петље је последње у низу на слици. Ширина њихања је 3–16 mm, пречник круга 3–20 mm. Користи се у случају када је потребно нанети веће количине додатног материјала, може се применити и при коренском завару у оштром углу у хоризонталном положају.

Попречним померањем врха електродне жице повећава се ширина завара и смањује се брзина заваривања. Превелика амплитуда њихања врха доводи до грешака налепљивања тј. непотпуног стапања са основним материјалом. Растоп при превеликој амплитуди њихања и при релативно великој струји може отићи испод лука на основни материјал што доводи до налепљивања. [15]

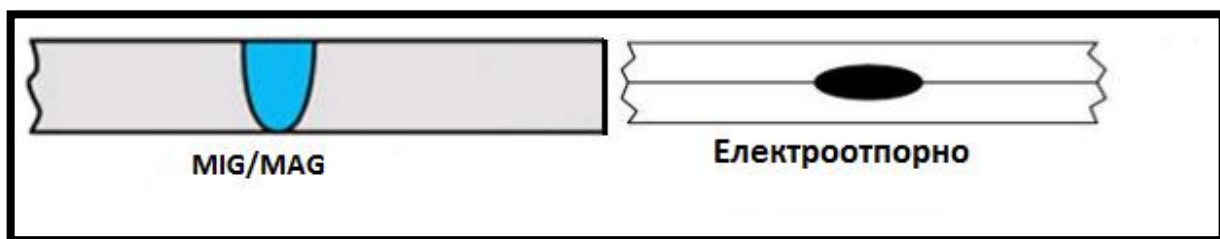
Као што постоје грешке при електролучном заваривању узроковане пометутим техникама и разним параметрима заваривања (поглавље 3.3), тако постоје грешке и код тачкастог заваривања.

Најчешће грешке код тачкастог електроотпорног заваривања су: (б) порозност, где је средња зона тамна или коцкаста, (ц) лепљење, где нема једног или има два тамна

прстена, (д, е) шупљина, појављују се црне мрље у средишњој зони, (ф) прскање, (г) прегорела тачка. Слика 49. Тачка обележена са (а) на истој слици представља изглед исправног зава, на којем треба да се виде: (1) тамни прстен, (2) сива средња зона, (3) спољни светли прстен, (4) унутрашњи светли прстен. Основни узрок настанка ових грешака је погрешан избор параметара заваривања. [5]



Слика 49. Грешке код тачкасто заварених спојева на радиограму [5]



Слика 50. Разлика завареног споја између MIG/MAG и електроотпорног тачкастог заваривања

5. Закључак

Заваривање је сложен поступак, чији продукт не може бити добар ако се претходно правилно и према литератури прописано не усвоје задати параметри. Поред параметара на квалитет финалног производа утичу и друге карактеристике као што су: механичке и термичке особине радног материјала, техника заваривања, итд. Параметри заваривања су узајамно повезани што се може видети на примеру код MIG/MAG заваривања где јачина струје заваривања директно зависи од подешавања брзине довођења жичане електроде.

Уређај за заваривање је повезан у једну целину од различитих елемената, ову целину елемената уређаја обједињују разне електронске и електричне компоненте као што су: трансформатори, диоде, електроде, кондензатори, потенциометри и други.

Што се тиче квалитета завареног споја битно је водити рачуна о облику и величини метала шава, који се опет регулишу горе поменутим карактеристикама и параметрима. Карактеристике завара које треба регулисати су висина и ширина завара. Ово је потребно обезбедити да би се заварени спој правилно попунио са минимумом грешака завривања (MIG/MAG). Код тачкастог заваривања један од главних утицаја на квалитет заварене тачке је време.

У масовној производњи поготово индустрији аутомобила најзаступљеније је роботизовано тачкасто заваривање. Развитком роботизације уређаја у многоме се смањио напор и штетни утицај на оператера, а повећала продуктивност и квалитет финалних производа. Такође стварају се прилике за нова радна места као што су за: програмере (роботичаре), инжењере електротехнике, инжењере машинства.

6. Литература

- [1] УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ Факултет инжењерских наука, Технологија ливења и заваривања Милорад Јовановић, Вукић Лазић
- [2] Машинска техничка школа "14.октобар" Краљево, наставни материјал: <http://topzavarivac.weebly.com/1047107210741072108810801074107211141077.html>
- [3] Даринка Крчек, Електроотпорно тачкасто заваривање код валовитих страница дистрибутивних котлова: file:///C:/Users/Korisnik/Downloads/krcek_darinka_mev_2018_zavrs_struc.pdf
- [4] Физика – за сваког по нешто, Славољуб Митић: <https://fizis.rs/%D0%B3%D0%B8%D0%BC%D0%BD%D0%B0%D0%B7%D0%B8%D1%98%D0%B0/iii-%D1%80%D0%B0%D0%B7%D1%80%D0%B5%D0%B4/naizmenicna-struja/transformatori/>
- [5] Седмак, А., Шијачки-Жеравчић, В., Милосављевић, А., Ђорђевић, В., Вукићевић, М.: Машински материјали II део, издање Машинског факултета Универзитета у Београду, 2000: <http://afrodita.rcub.bg.ac.rs/~rzoran/ZAVAELOTP.pdf>
- [6] СВЕУЧИЛИШТЕ У ЗАГРЕБУ ФАКУЛТЕТ СТРОЈАРСТВА И БРОДОГРАДЊЕ, Ален Хлевњак: http://repozitorij.fsb.hr/4737/1/Hlevnjak_2015_zavrsni_preddiplomski.pdf
- [7] ИНДУСТРИЈСКА ПНЕУМАТИКА, Студијски програм Мехатроника, Проф. Др Марина Мијановић Маркуш: https://www.ucg.ac.me/skladiste/blog_4480/objava_9490/fajlovi/6_Aktuatori_cilindri.pdf
- [8] VEŠTINE I TEHNOLOGIJE ZAVARIVANJA, Prvo izdanje, Dave Smith
- [9] Zavarivanje.info 2020, RAM: <https://www.zavarivanje.info/cd/11940/zavarivanje-moderni-postupci-mig-mag-tig-rel-autogeno>
- [10] ZONA VAR DOO, Novi Begorad: <https://var.rs/sve-o-zavarivanju/migmag-zavarivanje-co2-zavarivanje/>
- [11] DRUŠTVO ZA TEHNIKU ZAVARIVANJA ISTRA, dipl. ing. Marijan Rudan: <http://www.dtz.hr/upload/pdf/2.%20SEMINAR/Brosura%20seminar%202.pdf>
- [12] LINCOLN ELECTRIC, Gas Metal Arc Welding, Jeff Nadzam: [https://m.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable MIGMAWires-SuperArc-SuperArcLA-90/c4200.pdf](https://m.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_MIGMAWires-SuperArc-SuperArcLA-90/c4200.pdf)
- [13] B.Bajić: Elektrolučno zavarivanje u zaštiti inertnog i aktivnog gasa mig-mag – Tehnološke i metalurške osnove, Gorenje-Varstroj – Lendava
- [14] CITRONIX D.O.O. 24000 SUBOTICA, Magnetna polja 6: http://www.citronix.rs/docs/KU_Citronix_MMT200A.pdf
- [15] PARAMETRI ZAVARIVANJA I NJIHOV UTICAJ NA KVALITET I VIZUELNI IZGLED ZAVARENOSTI SPOJA TJ. ZAVARA, AlatiStherM d.o.o, Pripremio: Srboљub Stevanović dipl. maš.inž: <http://www.alatistherm.co.rs/pdf.zavarivanje/ParametriZavarivanja.pdf>

- [16] Mr Milan Milotić: Priručnik za zavarivače 2. Dopunjeno izdanje, BCD Elektro d.o.o Doboj, Saobraćajni fakultet Doboj, Doboj, 2008.
- [17] Josip Brezetić: Tehnologija II- Zavarivanje, Veleučilište u Karlovcu, Podloge za učenje
- [18] Peking Kaberry International Trade Co Ltd: <http://hr.chinahonyen.com/welding-robot/mig-welding-robot/2000-mm-arm-length-mig-welding-robot.html>