

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

Марија Д. Перић

МИГ/МАГ заваривање метала

Завршни рад

Крагујевац, 2020.

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Производне технологије

Број индекса: 27/2017

Марија Д. Перић

МИГ/МАГ заваривање метала

Завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. др Вукић Лазих-ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да:

1. Наведе најважније карактеристике МАГ/МИГ заваривања;
2. Опише заваривачку опрему за МАГ/МИГ заваривање;
3. Размотри најважније додатне и потрошне материјале за заваривање челика и обојених метала;
4. Објасни и опише најважније технолошке параметре заваривања;
5. Прикаже примену наведених метода и поступак одређивања најповољније технологије заваривања.

Препоручена литература:

1. Јовановић, М., Лазић, В.: *Технологија ливења и заваривања*, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2015.
2. Јовановић, М., Лазић, В.: *Практикум РЕЛ и МИГ/МАГ заваривања*, помоћни универзитетски уџбеник, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2008.
3. Јовановић, М., Адамовић, Д., Лазић, В.: *Технологија заваривања-приручник*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 1996.

У Крагујевцу, 2020. године

Ментор:

Проф. др Вукић Лазић

Садржај

1. Увод.....	1
2. Карактеристике МИГ/МАГ заваривања.....	3
2.1 Уводне напомене о МИГ/МАГ заваривању.....	3
2.2 Електрични лук.....	4
3.2.1 Компоненте електричног лука.....	6
2.3 Механизам образовања шава.....	7
2.3.1 Начин извођења заварених спојева.....	8
2.3.2 Елементи шава.....	11
2.4 Формирање капљице.....	11
2.5 Облици преноса растопљеног метала.....	13
3. Заваривачка опрема за МИГ/МАГ заваривање.....	19
3.1 Особине извора напајања за МИГ/МАГ заваривање.....	20
3.2 Саставни делови уређаја за МИГ/МАГ заваривање.....	20
3.2.1 Извор напајања.....	21
3.2.2 Уређај за додавање жице.....	22
3.2.3 Пиштољ за заваривање.....	23
4. Додатни и потрошни материјали за МАГ/МИГ заваривање.....	26
4.1 Развој електродне жице за МИГ/МАГ заваривање.....	26
4.2 Врсте жица за МИГ/МАГ заваривање и њихове особине.....	28
4.2.1 Пуне електродне жице.....	29
4.2.2 Пуњене електродне жице.....	29
4.3 Заштитни гасови за МИГ/МАГ заваривање.....	30
5. Технолошки параметри и технологија МАГ/МИГ заваривања.....	33
5.1 Најугицајнији параметри МАГ/МИГ заваривања.....	33
5.1.1 Јачина струје заваривања.....	33
5.1.2 Напон електричног лука.....	35
5.1.3 Врста и пречник електродне жице.....	36
5.1.4 Брзина заваривања.....	37
5.1.5 Врста заштитног гаса и његова потрошња.....	37
5.1.6 Поларитет жичане електроде.....	38
5.1.7 Величина додатног индуктивитета.....	38
5.1.8 Дужина слободног краја жичане електроде.....	38
5.1.9 Удаљеност млазнице заштитног гаса од радног предмета.....	40
5.1.10 Положај пиштоља у односу на радни комад и смер заваривања.....	40

5.2 Технолошки параметри заваривања у заштити гаса	42
5.2.1 Прорачун технолошких параметара МАГ заваривања	42
5.2.2 Технолошки параметри МИГ- заваривања.....	47
5.3 Технологија МАГ/МИГ заваривања пуним и пуњеним жицама	50
5.3.1 Металургија МИГ заваривања.....	51
5.3.2 Металургија МАГ заваривања.....	51
5.3.3 Металургија МАГ заваривања пуњеним жицама	52
5.3.4 Технологија МАГ/МИГ заваривања пулсирајућим луком	55
6. Примена МАГ/МИГ заваривања.....	57
6.1 Избор технологије заваривања челика класе Weldom 700	57
6.1.1 Моделска испитивања сучеоних спојева	60
6.1.2 Примери примене одабране технологије на реалним склоповима	66
7. Закључак.....	69

Резиме

У овом завршном раду детаљније се говори о МАГ/МИГ заваривању и његовим карактеристикама. Поред тога, описана је заваривачка опрема за МАГ/МИГ заваривање. Такође, дат је преглед и опис додатних и потрошних материјала, као и најважнијих технолошких параметара МАГ/МИГ заваривања. Наведене су и најважније области примене МАГ/МИГ заваривања, као и начин избора најповољније технологије заваривања челика повишене јачине.

Кључне речи: МИГ/МАГ заваривање, додатни материјали, заштитни гасови, заваривачка опрема, параметри заваривања, примери примене.

Abstract

The topic of this paper is gas metal arc welding process (GMAW), its main characteristics as well as welding equipment. Besides, in paper is given a review of the filler materials and the most important technological parameters used in this welding process. In the end, the areas of application are given as well as one example of selection of the most appropriate welding technology of high strength steels.

Keywords: GMAW, welding, filler material, gases, equipment, parameters.

1. Увод

МАГ/МИГ метод заваривања је вид електролучног заваривања у заштитној атмосфери активног или инертног гаса. Електролучно заваривање топљивом електродом се скраћено обележава као МАГ (*metal active gas*) или МИГ (*metal inert gas*), код МАГ поступка се користи CO_2 као заштита или мешавина гасова која се понаша као активни гас, а код МИГ се користи He , Ar или мешавина која се понаша као инертан гас.



Слика 1.1 Пример практичне примене МАГ/МИГ заваривања [8]

МАГ/МИГ заваривање се изводи знатно лакше него при РЕЛ заваривању, јер радник само води заваривачки пиштољ дуж споја, а захваљујући саморегулацији аутоматски се одржава одабрана дужина лука, при чему радник не мора да примиче заваривачки пиштољ ка металном купатилу. Електрични лук остварује се између радног комада и топљиве континуално довођене жице која је у овом поступку заваривања уједно и додатни материјал. Код МАГ/МИГ заваривања извор струје и помоћна опрема су исти, али су различити заваривачки аутомати, додатне електродне жице и заштитни гасови. Методима МАГ/МИГ је техно-економски оправдано заваривати лимове, плоче, цеви и конструкционе профиле. МАГ/МИГ заваривање се може механизовати 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. У првим годинама примене МАГ/МИГ-а коришћене су само пуне жице, али се последњих деценија све више употребљавају и пуњене жице. Електролучно заваривање у заштити инертних/активних гасова (МАГ/МИГ или *GMAW - Gas Metal Arc Welding*) примену у индустрији налазе тек у 20. веку.

МАГ – метод заваривања се 1953. године у Совјетском Савезу први пут примењује. Углавном има највећу практичну примени због:

- релативно ниске цене заштитног гаса угљен-диоксида који се добија као земни гас или споредни производ у железарама, кречанама и у процесима алкохолног врења,
- могуће механизације или аутоматизације процеса,
- мало грешака у споју,
- велике продуктивности заваривања и др.

Примењује се за заваривање угљеничних и нисколегираних челика, као и челика повишене јачине у целом опсегу дебљине, како у радионичким условима тако и на терену, уз примену механизације или аутоматизације али и уз обавезну заштиту од струјања ваздуха.

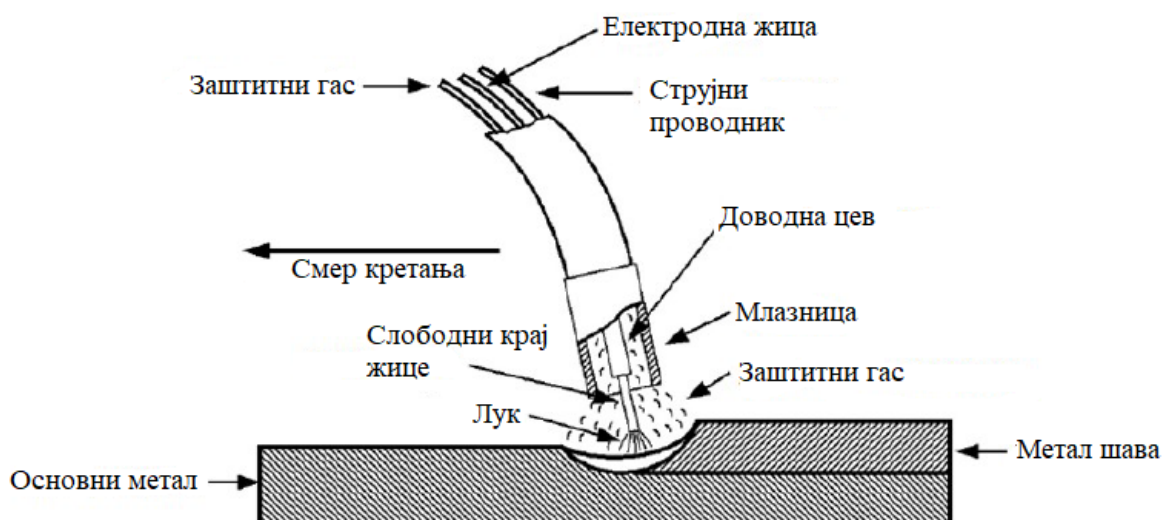
Заваривање МАГ поступком се почело примењивати 1948. године. Због коришћења аргона као скупљег заштитног гаса МИГ поступак је био знатно мање у примени од МАГ поступка. МИГ поступак се претежно примењује за заваривање високолегираних челика и нежелезних метала (Al, Cu, Ti и њихових легура) које ни у ком случају није могуће заваривати у заштити активних гасова. МИГ поступак са концентрисаним луком користи се за наваривање челика.

Предности МАГ/МИГ поступка су:

- универзална примена са тачке гледишта основног материјала,
- велика брзина топљења,
- велика брзина заваривања,
- релативно једноставна обука заваривача (за наведене челике),
- једноставна механизација поступка,
- применљив у принудним положајима,
- мали инвестициони трошкови (за стандардну варијанту) и др.

Мане МАГ/МИГ поступка су:

- опасност од грешака у почетку заваривања,
- опасност од грешака при спором заваривању, због истицања течног метала испред електричног лука,
- релативно компликована обука заваривача (за високолегиране челике и обојене метале),
- тешкоће при заваривању на отвореном (струјање ваздуха).

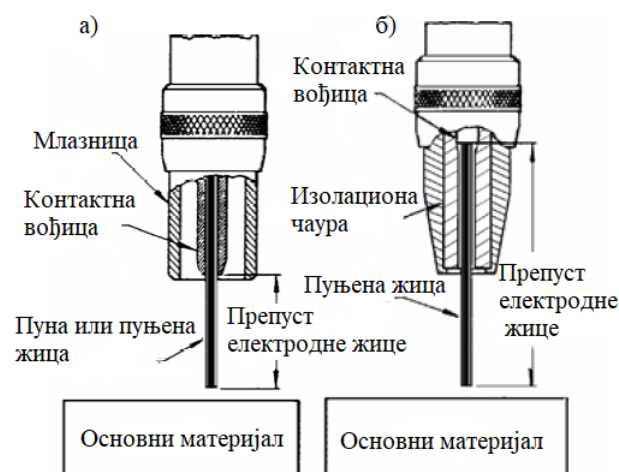


Слика 1.2 Електролучно заваривање топливом електродном жицом у заштити гаса [5]

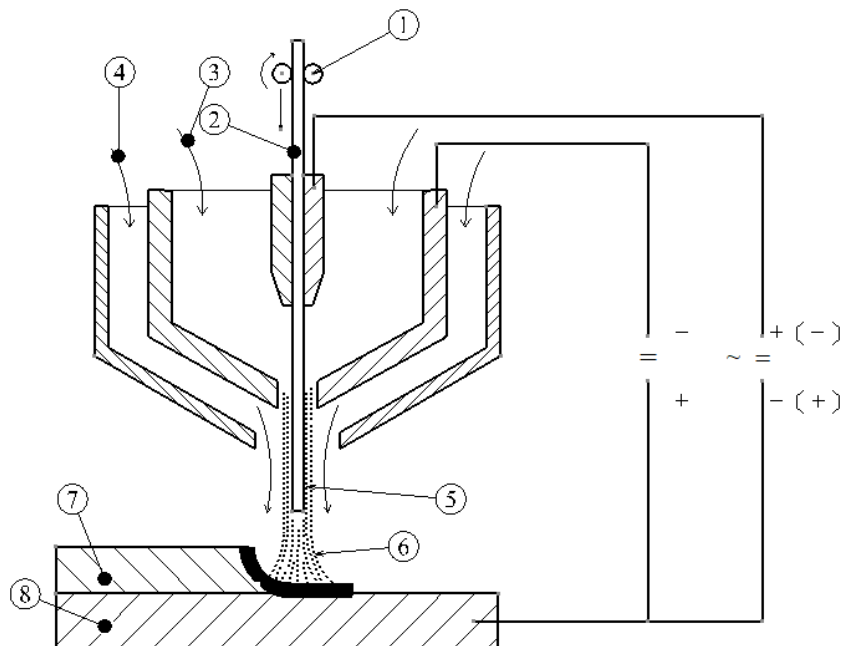
2. Карактеристике МИГ/МАГ заваривања

2.1 Уводне напомене о МИГ/МАГ заваривању

При заваривању у заштити гаса користи се једносмерна струја обрнутог поларитета ($E+$), што значи да се радни предмет везује за минус пол извора струје. Често се МИГ/МАГ поступци означавају заједничком скраћеницом GMAW, који се сврставају у три варијанте: МИГ, МАГ, (сл. 2.1а) и метод самозащитних електродних жица са пуњеним језгром, (сл. 2.1б). МИГ-плазмени метод (сл. 2.2) спада у посебан поступак заваривања [1].



Слика 2.1 Шема основних варијанти заваривања топљивом електродном жицом:
 а) заваривање пуном или пуњеном електродном жицом у заштитном гасу,
 б) заваривање пуњеном жицом без заштитног гаса (самозащита) [8]



Слика 2.2 Шема плазменог МИГ-заваривања; 1-додавач, 2-жица, 3-плазмени гас, 4-заштитни гас, 5-плазмени лук, 6-МИГ лук, 7-навар, 8-подлога [3]

Одлике свих поступака заваривања у заштити гаса:

- Процес заваривања се лако механизује и аутоматизује уз израду помоћних уређаја за специфичне конструкције;
- Заваривач лако прати зону заваривања што омогућава правилно формирање шавова;
- Постиже се релативно велика продуктивност рада уз добар квалитет завареног споја;
- Образује се занемарљиво мало троске, што смањује време за њено уклањање;
- Заваривање се изводи са релативно великом густином струје и малим уносом топлоте, те се добија релативно дубок увар, при невеликом загревању основног метала [1].

Основне карактеристике код МАГ поступка заваривања:

- Заваривање се може изводити у свим положајима ;
- Параметри заваривања: $I=40-500\text{ A}$; $U=16-35\text{ V}$; $v_z=15-60\text{ m/h}$
- Спољна карактеристика извора: равна (благо опадајућа, пад 2 V на 100 A) ($U=\text{const}$);
- Заварују се: нискоугљенични, нисколегирани и челици повишене јачине;
- Заштитни гас може бити: CO_2 или мешавина $\text{Ar} + \text{CO}_2$;
- Струја једносмерна: (E+);
- Најчешће се заварују ваљани производи железара и топионица: лимови, плоче, шипке, профилне цеви и цеви;

Основне карактеристике код МИГ поступка заваривања:

- Заваривање се може изводити у свим положајима;
- Заварују се: високолегирани челици и нежелезни метали и легуре;
- Струја једносмерна: (E+);
- Параметри заваривања: $I=150-500\text{ A}$; $U=20-30\text{ V}$; $v_z=6-90\text{ m/h}$;
- Додатни материјал је сличан основном материјалу;
- Спољна карактеристика извора: равна (благо опадајућа, пад 2 V на 100 A) ($U=\text{const}$);
- Проток аргона: $q=20\text{ l/min}$, струјање – ламинарно [2, 3]

2.2 Електрични лук

Електрични лук је стабилно електрично пражњење кроз међупростор, између електродне жице и ОМ, испуњен јонизованим гасом. Да би гас био јонизован у њему морају да постоје слободни носиоци струје у облику јона или електрона. Гасовима као што су азот и кисеоник мора се добити одређена количина енергије, тзв. енергија јонизације. Величина те енергије изражена у електронволтима (eV) за неке хемијске елементе и молекуле дата је у табели 2.1 [1].

Табела 2.1 Потенцијал јонизације (eV) неких хемијских елемената и молекула [1]

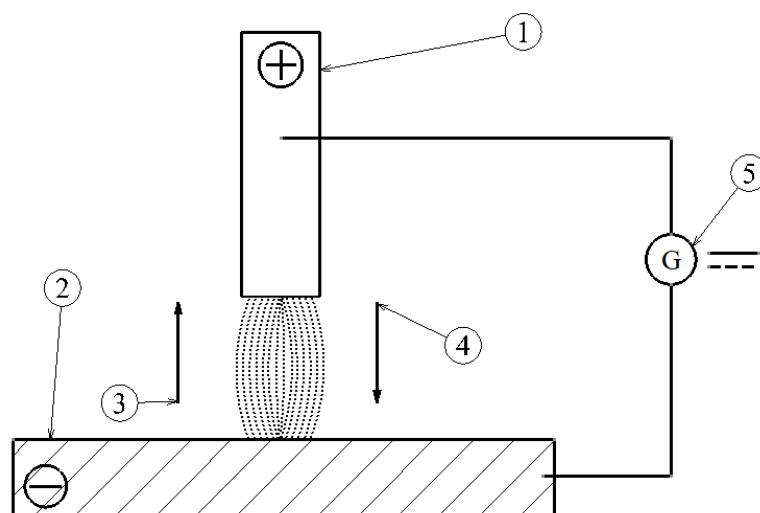
H	Na	K	Ca	N ₂	CO ₂	O ₂	Fe	He	N
13.59	5.14	4.43	6.11	15.8	14.3	12.5	7.83	24.56	14.55

Начин довођења енергије потребне за јонизацију:

- Загревањем гаса до релативно високе температуре, при чему расте брзина кретања атома и молекула који се сударају те настаје термојонизација;
- Бомбардовањем гаса електромагнетним таласима;
- Јаким електричним пољем које убрзава електроне.

Најважнији чиниоци који могу суделовати у успостављању лука су они који омогућавају да почне емисија електрона из негативног поља. Да би се добио електрични лук, мора се врхом електроде на тренутак додирнути радни предмет, тако да се створи кратак спој, при чему ће се врх електроде усијати услед електричног отпора. Када се врх електроде одмакне на правилно одстојање од радног предмета, између њих ће се појавити електрични лук. Место контакта електроде се загрева тзв. Цуловим ефектом (RI^2). При раздвајању електрода настаје термичка емисија електрона из катоде. Може доћи до миграције електрона из материјала катоде приликом веома високог напона који може изазвати емисију, што доводи до остављања трага на врху електрода, тзв. катодна мрља. Услед усијања врха електроде он почиње да емитије електроне према предмету (анода) врло великом брзином, која се креће до 1000 km/s . При кретању ка аноди електрони се сударају са електрично неутралним атомима и молекулима, стварајући тако нове електроне, јоне и атоме, чије усмерено кретање одржава електрични лук. Постоје јони који апсорбују електроне те се тако неутралише позитивно наелектрисање јона, тзв. рекомбинација јона. У тренутку кад јонизација и електрична проводност гаса у међуелектродном простору достигну одређен ниво, јавља се електрични лук или стуб јако јонизованог гаса који се одликује бљештавом светлошћу и високом температуром.

У случају лука наизменичне струје, када се мења поларитет, у сваком полупериоду долази до гашења и паљења лука брзином 100 пута у секунди. Електроде и гас остају у готово истом стању, с обзиром на веома кратко време прекида лука, па се лук поново успоставља. Посредством електричног лука олакшава се прелазак истопљеног додатног метала у шав и понекад се отклањају тешко топљиви површински оксиди, тзв. катодним чишћењем. Најбитније параметарске карактеристике електричног лука су: напон лука, густина и јачина струје у луку, дужина лука. Разликују се два карактеристична начина одржавања електричног лука: устаљени - статички, када напон и струја у току довољно дугог времена не мењају своје вредности и неустаљени – динамички када напон и струја мењају своје вредности под дејством спољних чинилаца, или због промене параметара заваривања [1, 2, 11, 12, 13].



Слика 2.3 Електрични лук: 1-електрода, 2-радни предмет, 3- јон, 4- електрон, 5- извор струје [12]

3.2.1 Компоненте електричног лука

Електрични лук се може поделити на три главне области: катодну област, анодну област и стуб лука. Катодна област увек емитује електроне, а анодна привлачи електроне. У анодној и катодној области могу се уочити удубљења (жаришта) односно испупчења (мрље) и одговарајуће области пада катодног и анодног напона. Катодна мрља је мало испупчена површина на врху катоде из које се емитују електрони, а анодна мрља представља део удубљене површине која прима електроне. У електричном луку не важи Омов закон.

Процес емитовања електрона може бити изазван довођењем топлоте, дејством електричног поља и ударом честица супротног наелектрисања. Стуб електричног лука је јонизован простор између електрода у коме су гасови и паре метала у великом степену дисоцирани и јонизовани па стога спроводе електричну струју. Појава јонизације у стубу лука је праћена супротно појавом рекомбинације, тј. образовањем неутралних атома и молекула, при удару наелектрисаних честица о електроде. Двоатомни гасови, који се готово увек налазе у стубу електричног лука дисоцирају при температурама 4000-8000°C, а будући да је у стубу лука температура $T \approx 5000-30000^\circ\text{C}$, то значи да је степен јонизације врло висок или потпун.

Електрични лук се у зависности од напонске разлике између електрода може успоставити на два начина:

- Прескакањем електрона у случају велике напонске разлике између размакнутих електрода и
- Додиром електрода, а затим њиховим незнатним размицањем

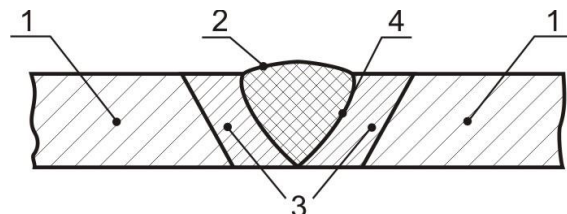
У првом случају протицање електрона може настати уколико се примене специјални уређаји – јонизатори који стварају импулсе високе фреквенције и напона од неколико хиљада волти (тзв. HF уређаји).

У другом случају, довољан је напон U_0 - величине неколико десетина волти, углавном испод 80 V; при додиру електрода настаје јака струја кратког споја, место

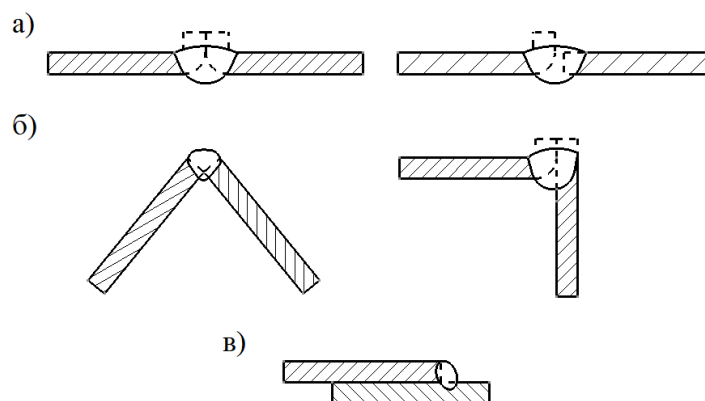
додира се загрева и тиме олакшава термичка емисија електрона и јонизација гаса, која је праћена и фотоемисијом и емисијом услед дејства електричног поља [2, 13].

2.3 Механизам образовања шав

Шав је део завареног споја који се образује очвршћивањем растопа мешавине истопљеног основног и додатног материјала на месту споја. У неким случајевима шав се образује само стапањем и очвршћивањем ивица основног материјала (сл. 2.4).



Слика 2.4 Сучено заварени спој: 1- основни материјал, 2- шав, 3- зона утицаја топлоте (ЗУТ), 4- зона стапања [2]



Слика 2.5 Облици спојева изведени без додатног материјала:
а) сучеони, б) рубни, в) преклопни [2]

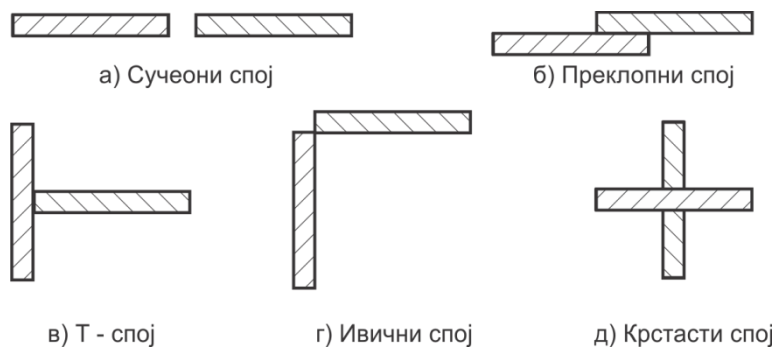
Заваривачки лук ослобађа топлоту којом се топе стране завариваних делова и врх жице, оба растопљена метала образују заваривачко купатило, тзв. металну купку смештену у жлебу. Температуре су различите у зависности од зоне лука, почевши од температуре очвршћивања, па до температуре испаравања метала у катодној (ОМ-) и анодној (Е+) области.

Између слободних електрона или хемијских једињења при високој температури у зони лука постоји могућност настанка хемијских реакција. Због кратког времена у коме настају реакције, а температура у разним тачкама лука различита, ове реакције нигде не достижу равнотежно стање, већ се одвијају по закону деловања масе, тј. њихове концентрације, слободне енергије и максималних температура. Хемијски елементи који учествују у хемијским реакцијама могу бити у две или три фазе. Очвршћивање метала шава почиње у зони изван директног деловања заваривачког лука, на додирној површини купке са загрејаним основним металом који је остао у чврстом стању. Облици преноса капљица, утичу на могуће заваривање у принудним положајима, на дубину уваривања, премештање металне купке и на губитке због прштања [1, 2].

2.3.1 Начин извођења заварених спојева

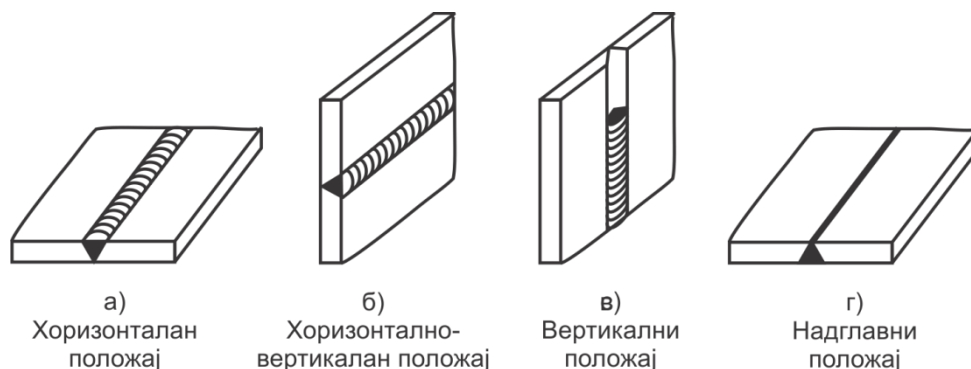
Шав са конструкционе тачке гледишта и начина извођења може бити:

1. Према врсти споја (сл. 2.6) сучеои (а), преклопни (б), Т-спој (в). Ивични или рубни (г) и крстасти спој (д). Угаони шав је везни елемент за преклопне, угаоне, Т-спој и крстасте спојеве.



Слика 2.6 Врста заварених спојева [2]

2. Према положају у простору заварен спој може бити (сл. 2.7): хоризонталан (а), хоризонталан у вертикалној равни (б), вертикалан (в) и изнад главе (или надлазни) (г).



Слика 2.7 Основни положаји заваривања [2]

Заваривање у хоризонталном положају се најлакше изводи и највише се примењује. Шавови који се изводе у положајима који нису хоризонтални називају се шавови у принудним положајима.

Додатни материјал је део материјала електроде или жице који се при заваривању топи изнад купатила, тако да се меша и очвршћава са растопљеним основним металом образујући најпре купку.

Метално купатило је локално истопљени и удубљени део основног материјала на месту спајања у коме је унет и измешан део истопљеног додатног материјала.

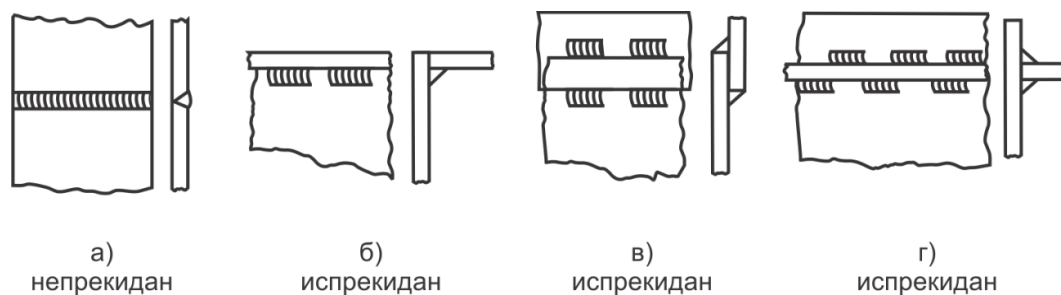
Метал шава је очврсла мешавина растопа металног купатила, тј. купке.

Зона стапања (сл. 2.4) је гранична површина између метала шава и зоне утицаја топлоте.

Зона утицаја топлоте (ЗУТ) је део основног материјала који је са обе стране сучеоног споја чврсто повезан за шав. У ЗУТ-у се појављују физичко-хемијске и структурне промене услед топлоте унете при заваривању. Ширина зоне утицаја

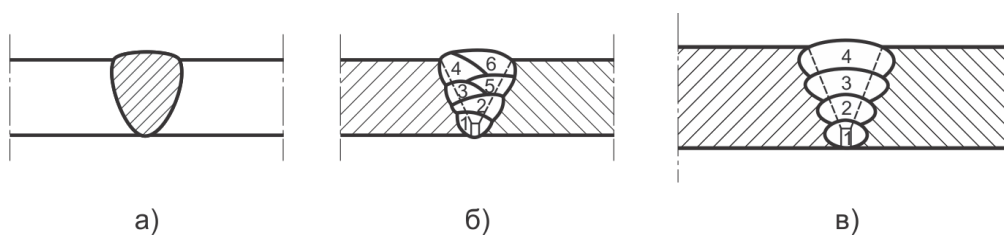
топлоте, зависи од укупног уноса топлоте и њене концентрације, а особине ЗУТ-а зависе од основног материјала, методе и поступка заваривања, додатног материјала, температуре предгревања и брзине хлађења неких тачака. Зона стапања и ЗУТ-а се скупа назива зона око шав.

3. Према континуитету шав може бити (сл. 2.8): непрекидан (а), или испрекидан (б, в, г). Код обострано испрекиданих шавова разликују се упоредни (в) и наизменични (г). Ови шавови изводе се при спајању радних предмета веће дужине.



Слика 2.8 Приказ континуитета шавова [2]

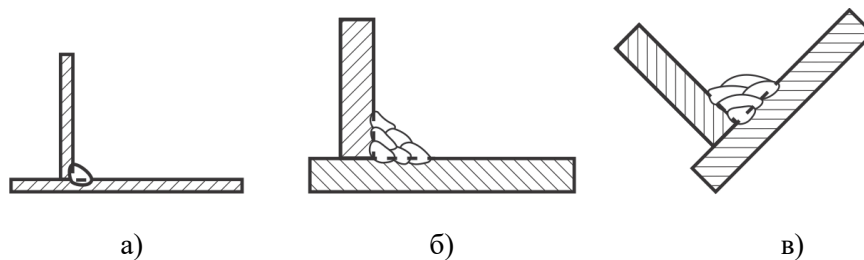
4. Према броју завара може бити једнопролазан (а) ако је изведен једним заваром и вишепролазан (б) ако је изведен полагањем више завара, или вишеслојан (в) ако је изведен помоћу више слојева (сл. 2.9).



Слика 2.9 Врсте шавова: а) једнопролазан, б) вишепролазан и в) вишеслојан [2]

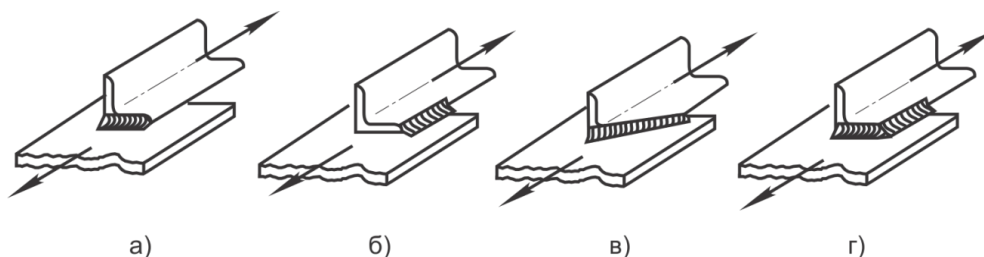
Од дужине шав, попречног пресека жлеба, метода заваривања и тсл. зависи из колико потеза се може извести шав. Очврснути материјал шав при једном пролазу назива се завар. Први завар означен бројем (1) на (сл. 2.9б) зове се коренски, а последњи (6) покривни завар. Ако се жлеб испуњава попречним клађењем врха електроде између зидова жлеба и малим подужним померањем добија се вишеслојни шав (сл. 2.9в), при чему бројеви 1, 2, 3 и 4 означавају слојеве.

Угаони шавови (сл. 2.10) такође се могу извести једним заваром или полагањем више завара било у бочном положају или најлакше у коритастом положају.



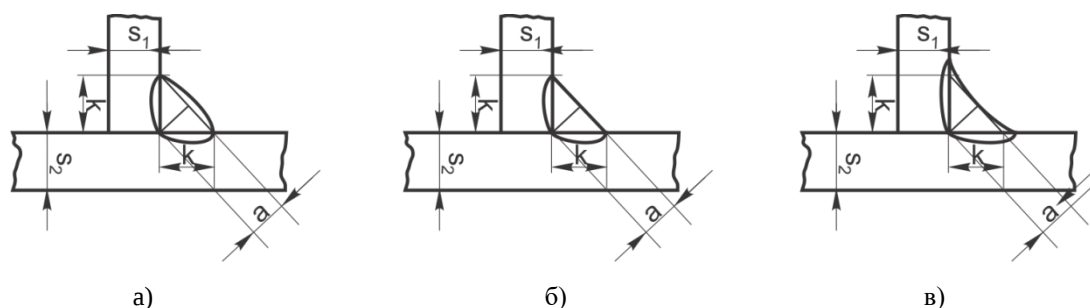
Слика 2.10 Извођење угаоних шавова у бочном положају (а и б) и у коритастом положају (в) [13]

5. Према дејству затежуће силе (сл. 2.11) шав може бити: попречан (чеони) – управан на правац дејства силе, подужан (бочни угаони) – паралелан правцу дејства силе, кос – под неким углом у односу на правац дејства силе и комбинован.



Слика 2.11 Приказ шавова према дејству спољне силе: а) чеони, б) бочни угаони, в) коси, г) комбиновани [13]

6. На основу облика попречног пресека угаоних шавова (сл. 2.12), могу бити испупчени (конкавни) (а), равни (б) и удубљени (конвексни) (в).



а- дебљина угаоног шав, к- катета угаоног шав

Слика 2.12 Врсте угаоних шавова према облику попречног пресека шав [2]

Равни шавови су најповољнији, док се испупчени допуштају само за статичка оптерећења, јер при динамичком оптерећењу стварају велику концентрацију напона, а већи је и утрошак додатног материјала. Удубљени угаони шавови најпогоднији су за променљива оптерећења због повољнијег тока напонских линија сила. У погледу димензија, угаони шав треба да има $a = 0.7 \cdot s_{\min}$, што одговара катети $k = a\sqrt{2}$, где је $s_{\min}$ - минимална дебљина лима у угаоном споју.

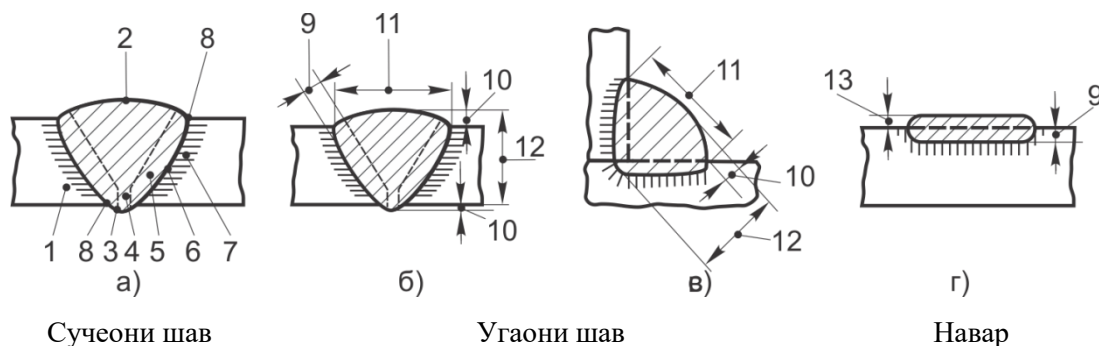
7. Према намени шав може бити носив и спојни, зависно од тога да ли преноси знатније спољашње оптерећење које делује на спој или служи само за повезивање елемената у конструкциону целину.

8. Према јачини шавови се сврставају у класе чврстине, а према компактности или намени шавови могу бити заптивни (херметички) или порозни. Класа чврстине шав показује да заварени спој омогућава преношење одређеног оптерећења са једног спојног елемента на други, при чему се увек не захтева и херметичност. Насупрот томе, бројни су примери шавова, који поред одређене чврстине, морају да гарантују добру херметичност.

9. Припоји су кратки завари (делимични завари) од неколико милиметара до неколико центиметара (зависно од дебљине спајаних предмета), којима се фиксирају елементи пре заваривања да би се спречило њихово померање и умањиле деформације и кривљење. Њихов број, дужина, растојање и распоред се одређује према технолошким условима [2].

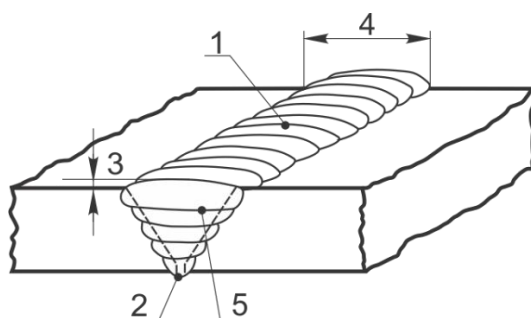
2.3.2 Елементи шав

Основни елементи сучеоних и угаоних шавова, као и навара, приказани су на слици 2.13. Изглед шав за зависи од претходне припреме страница, типа жлеба, технолошког поступка заваривања, као и врсте и дебљине радног предмета.



1- основни материјал, 2-лице шав, 3- наличје шав, 4- корен шав, 5- увар, 6-граница увара, 7- зона утицаја топлоте (ЗУТ), 8- ивица шав, 9- дубина увара, 10- надвишење шав, 11- ширина лица шав, 12- дебљина шав, 13- дебљина навара

Слика 2.13 Елементи сучеоних и угаоних спојева и навара [5]



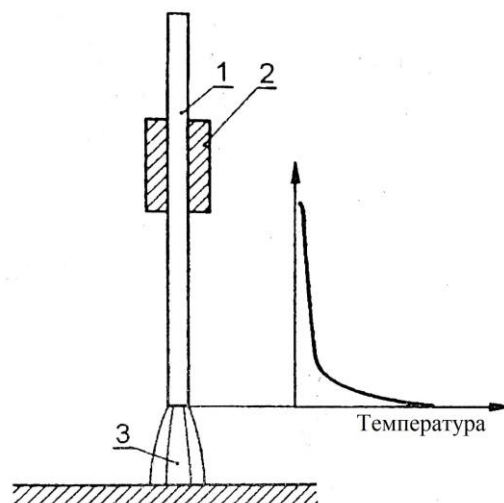
1- лице шав, 2- корен шав, 3- надвишење шав, 4- ширина шав, 5- увар

Слика 2.14 Аксонометријски приказ елемената шав [2]

2.4 Формирање капљице

Највећа количина топлоте је на крају електричне жице до лука, а одвођење топлоте је мало због једног смера провођења топлоте. Приликом загревања и топљења електродне жице долази до формирања капљица течног метала на врху електроде, која постепено повећава своју масу и прелази у купку растопљеног метала. Расподела температура на слободном крају електродне жице приказана је на слици 2.15. Најважније силе које делују на капљицу су:

- Силе површинског напона растопљеног метала врха жице;
- Сила земљине теже (гравитациона сила);
- Електромагнетне силе;
- Силе струјања гасова и експлозије и др.



Слика 2.15 Распдела температура на слободном крају електродне жице: 1- жица, 2- контактна вођица, 3- електрични лук [13]

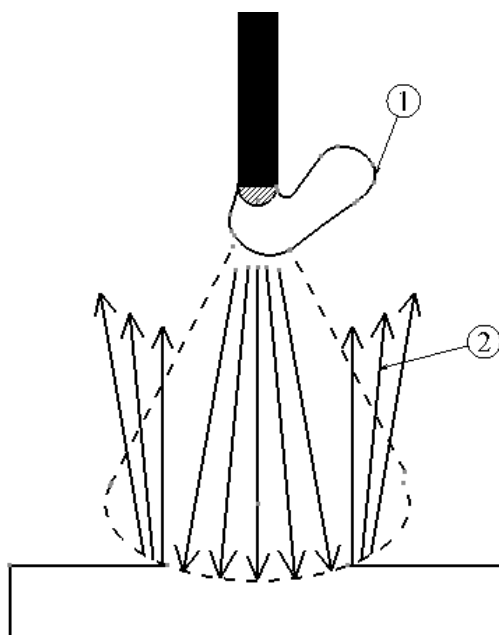
Силе површинског напона теже да одрже капљицу на врху електроде. Ако не би било других сила које делују на капљицу, она би се одвојила онда кад тежина капљице постане већа од силе површинског напона.

Деловање гравитационе силе зависи од положаја заваривања. У хоризонталном положају, капљица виси на врху електроде и кида се у тренутку кад сила земљине теже надмаши силу површинског напона; при заваривању у принудним положајима тежина капљице отежава њено одвајање.

Електромагнетне силе настају узајамним дејством електричног и магнетног поља образованог при протицању струје у електричном луку. Захваљујући овим силама, капљица бива одсечена као маказама тзв. "pinch" ефектом.

Силе струјања гасова настају због динамичког притиска гасова јонизованих у луку. Лук успостављен између врха електроде и радног комада има облик купе чија се основа ослања на комад, без обзира на поларитет. У оваквом луку, јонизовани гасови се крећу од електродне жице ка купки, што помаже одвајању капљица или убрзавању већ откинуте капљице. Динамички притисак јонизованог гаса одражава се и на страну метала у купки, јер потискује растоп под доњу основу лука што повећава дубину уваривања. При великом порасту притиска, углавном код РЕЛ поступка и МИГ заваривања алуминијума капљица се може распрснути због дејства сила експлозија [1].

При погрешном везивању жице на негативан пол извора, може доћи до бочног савијања капљице (сл. 2.16) што изазива велико прштање.



Слика 2.16 Узношење капљице због одбојног млаза јонизованог гаса, 1- капљица, 2- одбијен гас млаза [1]

2.5 Облици преноса растопљеног метала

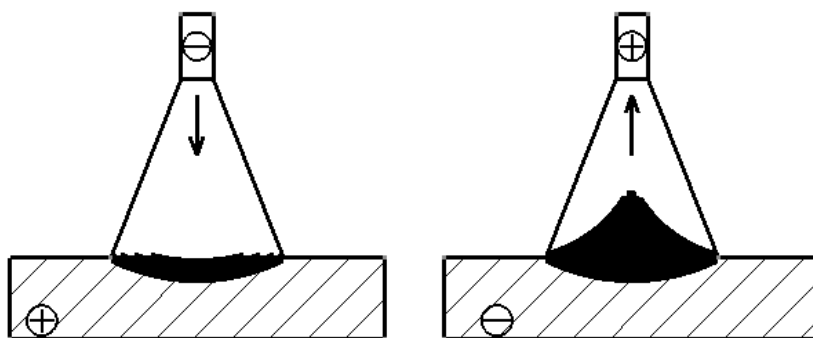
Механизам преноса растопљеног метала кроз електрични лук је врло компликован и још увек неразјашњен, али укључује следеће битне појмове: гравитацију, површинске напоне, магнетно поље око лука, притисак од струјања гасова, притисак плазме и експлозија гасова.

Гравитација увек делује на доле, она омета процес преноса додатног метала.

Површински напони теже да створе капљицу сферног облика и спречава њено одвајање од електроде, а када се капљица одвоји и дође у металну купку спречава њено разливање, што помаже при заваривању у принудним положајима.

Магнетно поље око електричног лука производи електродинамичку силу. Ова сила делује у радијалном и аксијалном правцу. Смер деловања радијалне компоненте електродинамичке силе је према оси проводника, при чему долази до сужења пречника капљице, а аксијалне компоненте делују у смеру преноса додатног материјала.

Од *притиска плазме* појављује се сила која утиче на метал шава и на облик металне купке заваривања једносмерном струјом. Када је електрода на негативном полу сила делује у правцу преноса додатног материјала, стварајући удубљења на металној купки, а када је на позитивном полу сила делује супротно кретању додатног материјала, стварајући испупчења (сл. 2.17).



Слика 2.17 Деловање притиска плазме [14]

Притисак од струјања гасова делује у правцу преноса додатног метала, а утиче на образовање ивица шави.

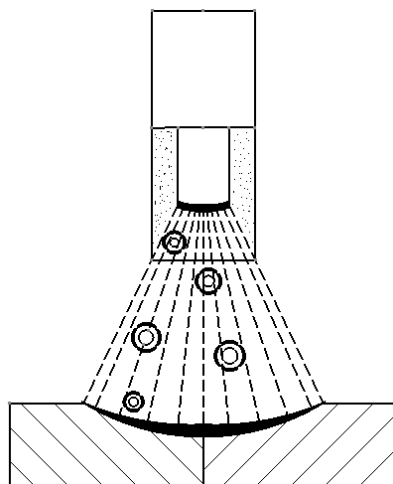
Експлозија гасова заробљених у капљици додатног метала помажу при преносу додатног метала, јер излазе из капљице на њеној загрејаној страни, што ствара силу реакције у правцу кретања капљице. Експлозије гасова могу да изазову распрскивање додатног метала ван металне купке [11].

Капљице могу попримити различите облике и величине, у зависности од врсте и величине силе која делује на врх електроде. Силе које делују на врх растопљене електроде утичу на услове одвајања капљица и кретање кроз електрични лук, као што и одређује пренос метала до металне купке. У зависности од метода и параметара заваривања мења се облик преноса и количина додатног метала пренетог у купку. Облици преноса течних капљица кроз стуб електричног лука могу бити:

- Пренос у капљицама;
- Краткоспојни пренос;
- Млазни пренос;
- Импулсни пренос;
- Пренос под заштитом троске.

Капљичаст пренос настаје дугачким луком код МИГ/МАГ заваривања.

Млазни пренос (сл. 2.18) настаје кратким луком код МИГ заваривања и ТИГ заваривања са додатним металом [1].



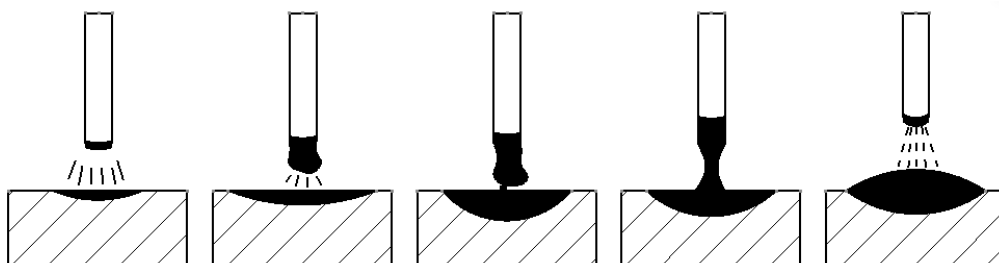
Слика 2.18 Пренос додатног метала у млазу [11]

Импулсни пренос одвија се у луку који се напаја основном и пулсирајућом струјом.

1. Капљичасти преноси могу бити:

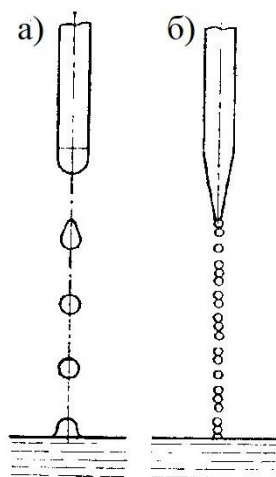
- Крупнокапљичасти;
- Ситнокапљичасти;
- Експлозивни.

Крупнокапљичаст пренос (сл. 2.19) – формирање капљица већег пречника од пречника електроде, при чему се образовање и прелет капљица одвија са малим фреквенцијама, тако да се у зони лука налази увек једна капљица. Крупнокапљичаст пренос карактеристичан је за мале густине струје.



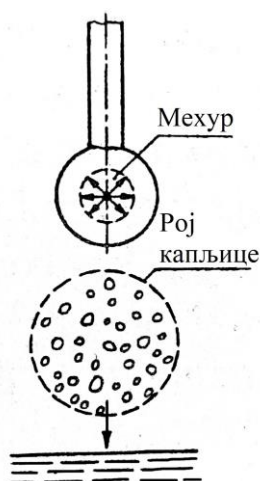
Слика 2.19 Пренос додатног метала крупним капима [14]

Ситнокапљичаст пренос – присуство више капљица истовремено у међуелектродном простору. Ситне капљице мањег пречника од пречника електроде, кидају се на већим фреквенцијама уз утицај електромагнетних сила. Пренос у ситним капима настаје код МИГ/МАГ заваривања са малом густином струје. Преноси могу бити: пренос потиском и млазни пренос (сл. 2.20). Пренос потиском је формирање ситних капљица пречника сличног електродном пречнику, затим кидање капи и одбацавање великом брзином до металне купке. Овај пренос настаје код МИГ заваривања алуминијума, односно при заваривању импулсном струјом. Млазни пренос карактерише стапање жице на челу и боковима, при чему се жица изоштрава у облику игле. Истопљени метал се у ситним капљицама великом брзином одбацује у металну купку. Овај пренос се користи код МАГ заваривања код кога млазни пренос може настати само у високоаргонској заштити мешавине гасова ($Ar+CO_2$).



Слика 2.20 Облици преноса у ситним капима: а) потисни и б) млазни [1]

Експлозивни пренос – настаје при заваривању обложеном електродом, када се на њеном врху појави мехур са ослобођеним гасовима из течног метала. Због пораста притиска гаса долази до експлозије при чему се мехур разбија на рој ситних не увек једнаких капљица (сл. 2.21). Овај пренос се може учити код МИГ заваривања са већим притиском аргона [1].

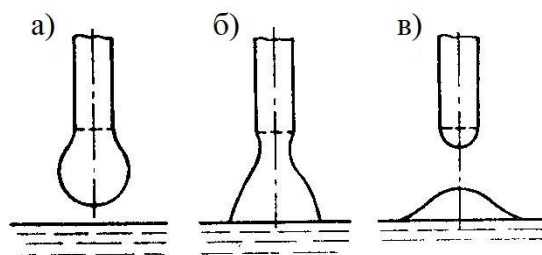


Слика 2.21 Пренос експлозијом

2. Краткоспојни пренос - тренутни или стални контакт између површине купке и врха жице. Нарастајућа капљица на крају електроде при невеликој дужини лука може изазвати кратак спој, угасити лук и довести до наглог пораста струје (сл. 2.22). При заједничком деловању електромагнетне силе и силе површинског напона које одвајају капљицу и усмеравају ка купки [1].

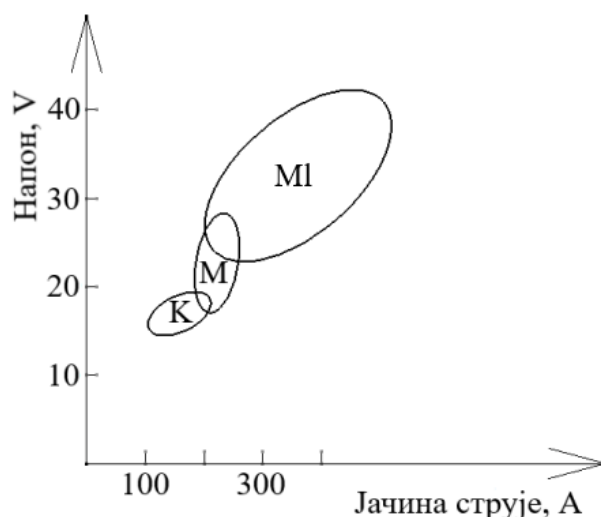
Приликом одсецања капљице прекида се струјно коло и стварају се услови за поновно успостављање лука и преноса. Према облику преноса метала при заваривању челика GMA-поступцима, могу се уочити:

- Крупнокапљичаст пренос;
- Ситнокапљичаст пренос;
- Краткоспојни пренос.



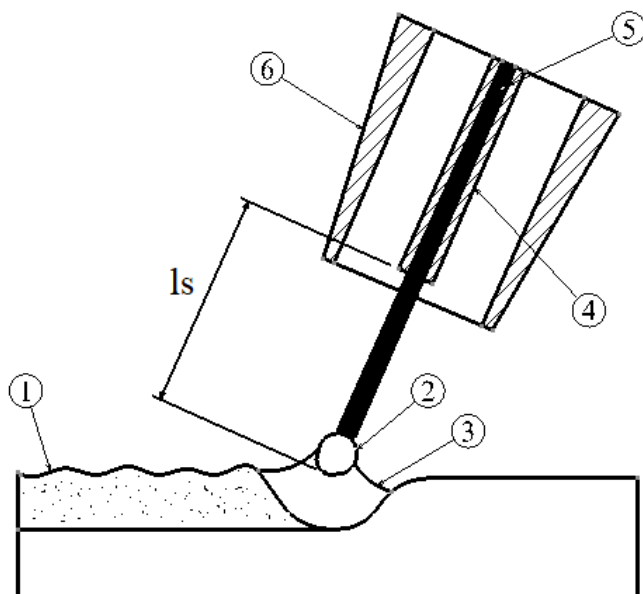
Слика 2.22 Временски редослед краткоспојног преноса: а) пораст капљице, б) кратак спој, в) одвајање капљице и њено усисавање у купку [1]

Најважнији чиниоци који утичу на облик преноса метала су: параметри електричног лука и састав заштитног гаса. Утицај струјних параметара на облик преноса приказан је на слици 2.23. При дугачком луку пренос је капљичаст, при средњем луку је мешовит, а при довољно кратком луку краткоспојни. Високоаргонска мешавина гасова (82% Ar + 18% CO₂) у односу на чист CO₂, смањује величину капљице, повећава њихову фреквенцију и смањује могућност појаве краткоспојеног преноса.

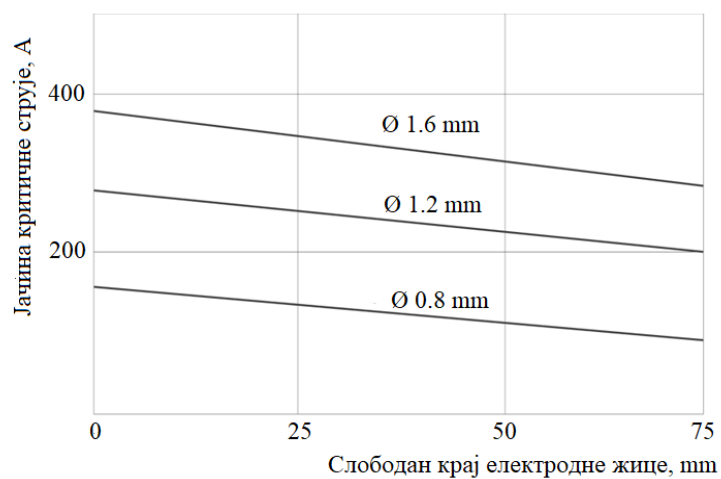


Слика 2.23 Утицај струјних параметара на облик преноса; K- краткоспојени, M- мешовити, MI- млазни [1]

Облик преноса зависи од јачине струје, при константној дужини лука. У области малих јачина струја, на врху електроде се споро формирају велике капљице које долазе редом у кратком споју, а у области већих јачина струја формирају се капљице малих димензија. Критична област је прелазак са једног облика преноса на други, који се дешава у веома уском интервалу јачине струје, у којој је транспорт мешовит – краткоспојни + ситнокапљичаст. На јачину струје утиче слободан крај електродне жице и њен пречник. Растојање од врха жице до најближе тачке електричног контакта је слободан крај (сл. 2.24). Са порастом слободног краја, критична област помера се ка мањој јачини струје (сл. 2.25).



Слика 2.24 Слободни крај електродне жице: 1- шав, 2- лук, 3- растоп, 4- вођица, 5- жица, 6- млазница [1]



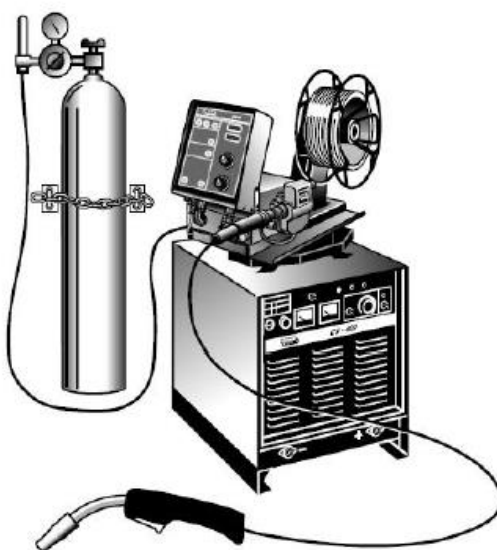
Слика 2.25 Зависност критичне струје од слободног краја жице пречника 0.8, 1.2 и 1.6 mm

3. Заваривачка опрема за МИГ/МАГ заваривање

Опрема за МИГ и МАГ заваривање је у основи иста, једино се мења гас који се прикључује на апарат. Заваривање топљивом електродном жицом у заштити гаса може се делимично или потпуно механизовати, зависно од тога да ли је аутоматизовано само примицање врха електроде ка купки или и вођење заваривачког пиштоља. Код полуаутомата основни елемент је давач електродне жице, а код аутомата заваривачка глава. Уређај за заваривање топљивом електродом у заштити гаса састоји се из: *извора напајања, опреме за довод електричне жице, пиштоља, додатне опреме, редуктора, грејача гаса и мешача.*

За разне варијанте и технологије ови уређаји се могу разликовати углавном само по конструкцији, јер су у питању сличне намене и слични принципи рада, такође су условљени степеном механизације или аутоматизације технолошког процеса. Савремено опремљена радна места за заваривање у заштити гаса често су роботизована, а између параметара заваривања и показатеља квалитета завареног споја успостављена је повратна спрега.

Као извор једносмерне струје за напајање електричног лука у почетку су употребљавани *селенски исправљачи*, затим *силицијумски*, *тиристорски* и најзад *инверторски претварачи*. Нова конструкциона решења извора напајања (напона) и управљачких система била су неопходна и због увођења нових варијанти заваривања у заштити гаса као што су, процес са пулсирајућом или модулисаном струјом. Ове варијанте намећу потребу програмирања спољашње карактеристике извора струје ($V-A$). Истовремено са програмирањем процесних параметара уводи се и програмирање кинематских параметара везаних за кретање и позиционирање лука, врха електроде, заваривачке главе, све помоћу заваривачких робота. За обе варијанте GMA заваривања, тј. МАГ и МИГ, користи се исти основни уређај. Разлике постоје само у надградњи неких компонената везаних за специфичност МИГ поступка. На слици 3.1 је приказана опрема за МАГ/МИГ заваривање [1].



Слика 3.1 Опрема за МИГ/МАГ заваривање [6]

3.1 Особине извора напајања за МИГ/МАГ заваривање

Код поступка заваривања у заштити гаса имају велики значај особине извора напајања. Изводи се једносмерном струјом позитивног поларитета ($E+$). При заваривању користе се извори равне и благо опадајуће ($V-A$) карактеристике, као и динамичке карактеристике заваривачког кола који зависи од карактеристике извора напона, регулисаних индукционим пригушивачем укљученим у заваривачко коло. При заваривању краткоспојним или пулсирајућим луком, индукциони отпорник спречава брз пораст или пад струје. При избору одговарајућих параметара подешава се напон празног хода и индуктивност заваривачког струјног кола према пречнику електродне жице и струјним параметрима, овај извор даће правилан облик шава уз незнатно прштање и стабилан лук. Сувише мала индуктивност препознаје се по "пуккетању лука" и великом али равномерном прштању, а веома велика индуктивност - грубим капљицама метала и појединачним експлозијама праћеним грубим и неуједначеним распрскивањем. Фотографски приказ МИГ/МАГ уређаја је дат на слици 3.2 [1].



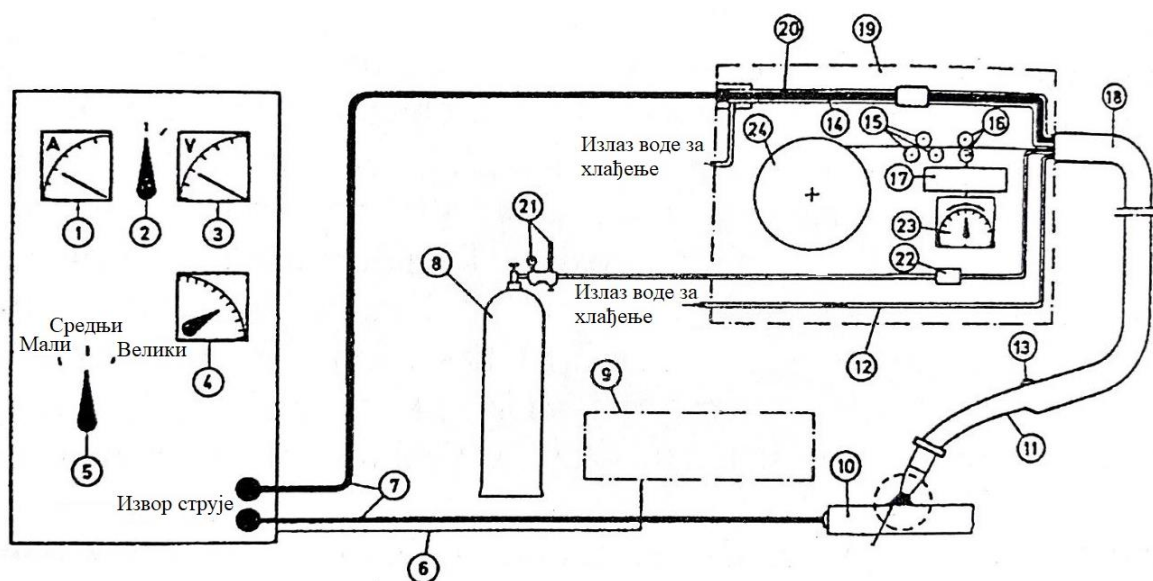
Слика 3.2 Уређај за МИГ/МАГ заваривање [9]

3.2 Саставни делови уређаја за МИГ/МАГ заваривање

Шема уређаја за МАГ/МИГ заваривање дата је на слици 3.3, а на слици 3.4 приказан је процес топљења електродне жице.

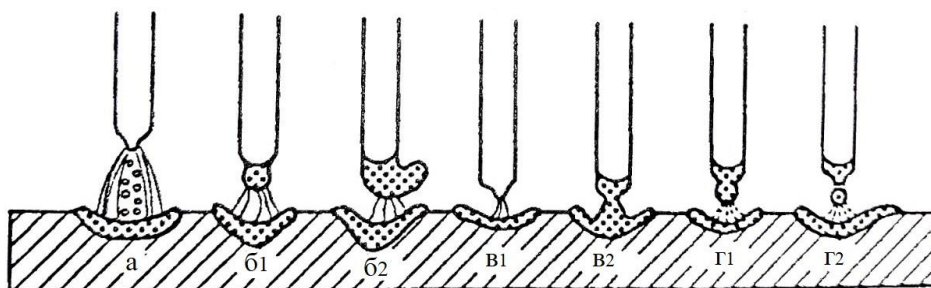
Опрема за МИГ/МАГ заваривање састоји се из следећих делова:

- Извора напона заваривања са системом за хлађење (ваздушног или воденог) и системом за управљање (командног уређаја);
- Уређаја за додавање жице са котура (тзв. додавача електродне жице);
- Пиштоља за заваривање са цревима и кабловима (заваривачке главе);
- Боце са заштитним гасом, редукционим вентилом, мерачом протока и грејачем;
- Каблова за напајање електричном струјом.



Амперметар, 2- Мрежни прекидач, 3- Волтметар, 4- Прекидач за избор напона празног хода, 5- Прекидач за избор одговарајућег индуктивитета, 6- Командни кабал 7- Струјни кабал, 8- Боца заштитног гаса, 9- Уређај за покретање пиштоља, 10- Радни комад, 11- Пиштољ за заваривање, 12- Црево за расхладну воду, 13- Прекидач, 14- Струјни кабал, 15- Ваљци за довођење жице, 16- Погонски ваљци за довођење жице, 17- Електромотор за погонске ваљке, 18- Пакет црева, 19- Командни орман, 20- Црево за расхладну воду, 21- Регулациони вентил са мерачом протока гаса, 22- Магнетни вентил за заштитни гас, 23- Регулатор брзине довођења жичане електроде, 24- Котур са жицом

Слика 3.3 Шема уређаја за МИГ/МАГ заваривање [1]

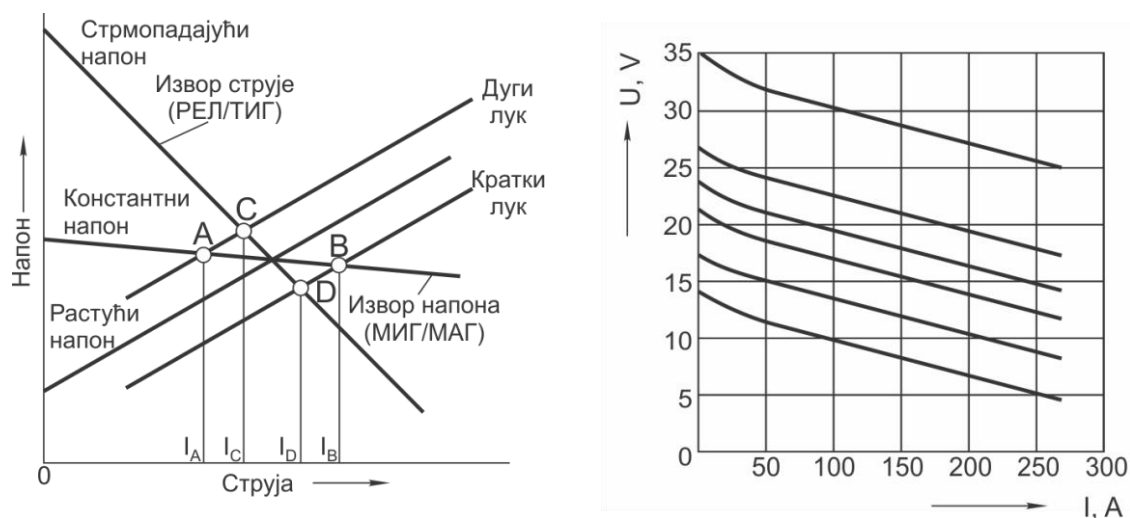


а- пренос у млазу, б- крупнокапљичаст пренос (б₁- формирање капљице, б₂- ексцентрично потиснута капљица), в- краткоспојени пренос (в₁- формирање капљице, в₂- уроњавање и пренос капљице), г- пулсирајући пренос (г₁- формирање капљице, г₂- пренос капљице)

Слика 3.4 Шематски приказ облика преноса додатног метала [1]

3.2.1 Извор напајања

Извор напајања МАГ/МИГ лука може бити *исправљач* или *претварач*. Уопште се за поступке електролучног заваривања могу употребити *извори са равном* ($U \approx \text{const}$), *благорастућом* или *стрмопадајућом струјно - напонском карактеристиком* (сл. 3.5а). За МАГ/МИГ заваривање користе се уређаји са константним напонем, за разлику од уређаја са константном струјом који су намењени за ручне поступке електролучних заваривања (РЕЛ и ТИГ) [1].

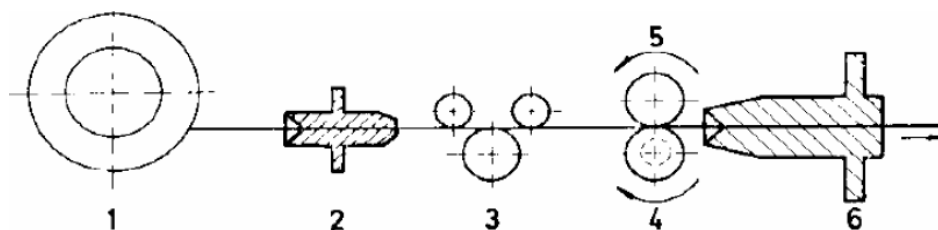


Слика 3.5 Карактеристике уређаја и лука: а) струјно-напонска карактеристика МАГ/МИГ извора и статичке карактеристике лука, б) спољне волт-амперске карактеристике МАГ/МИГ уређаја [2]

МАГ/МИГ поступцима највише одговарају извори струје са константним напонам зато што омогућавају саморегулацију дужине лука. Најпре је запажено да при случајном смањењу дужине лука од дугог на кратки лук, струја заваривања знатно расте (од I_A на I_B) (сл. 3.5а). Због знатног пораста јачине струје, долази до бржег топљења врха електродне жице и повећања дужине лука. То се назива *ефектом саморегулације*. Супротно томе, код стрмопадајуће $U-I$ карактеристике јачина струје се незнатно мења при промени дужине лука, те саморегулације неће бити. То је и разлог што се не могу замењивати извори за МАГ/МИГ са изворима за РЕЛ/ТИГ. За прве се каже да су у питању извори напона, а за друге (РЕЛ/ТИГ) извори струје [1].

3.2.2 Уређај за додавање жице

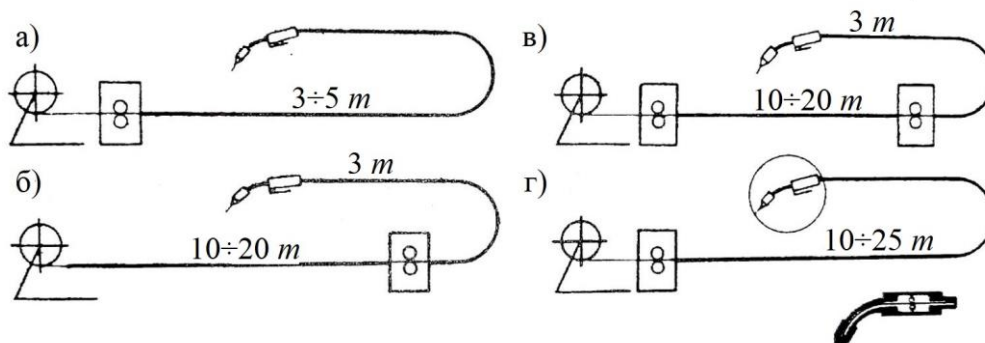
Уређај за додавање жице има основну улогу да константном брзином доводи жицу на место споја. Састоји се од електромотора, назубљених и погонских ваљака, као и одговарајућег уређаја за стежање и усмеравање жице (сл. 3.6). Постоје три типа конструкционог решења овог уређаја: вучни, гурајући и комбиновани (сл. 3.7). Довођење жице кроз гипко црево мора да буде равномерно без трзања и са брзим стартом. Ако настане трзање жице то указује да су ожлебљени ваљци запрљани или да је површина електродне жице груба [1].



1- Калем са жичаном електродом, 2- Излазна водица, 3- Ваљци за дотеривање и усмеравање жичане електроде, 4- Погонски ваљци, 5- Притисни ваљак, 6- Улазна вођица

Слика 3.6 Шема уређаја за додавање жице [1]

Са катула жице, до пиштоља за заваривање, жица се доводи по тзв. систему гурања (engl. *push*) или систему гурања-вучења (engl. *push-pull*) (сл. 3.7). Различитим конструкционим решењима ових уређаја, омогућава се поуздано довођење жице на уобичајене радне даљине (од 3-5 m, па чак до 10-25 m).

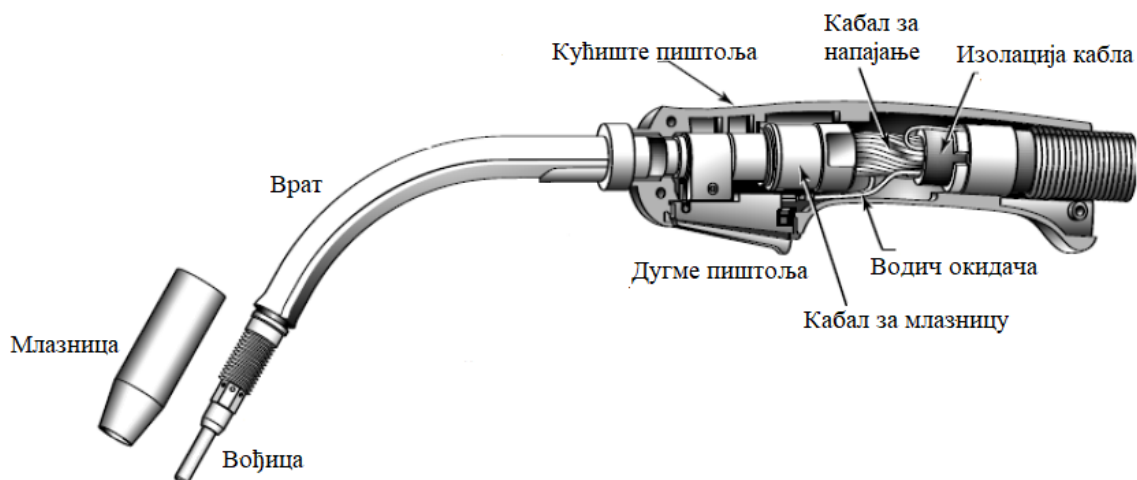


Слика 3.7 Системи довођења електроодних жица при заваривању у заштити гаса:

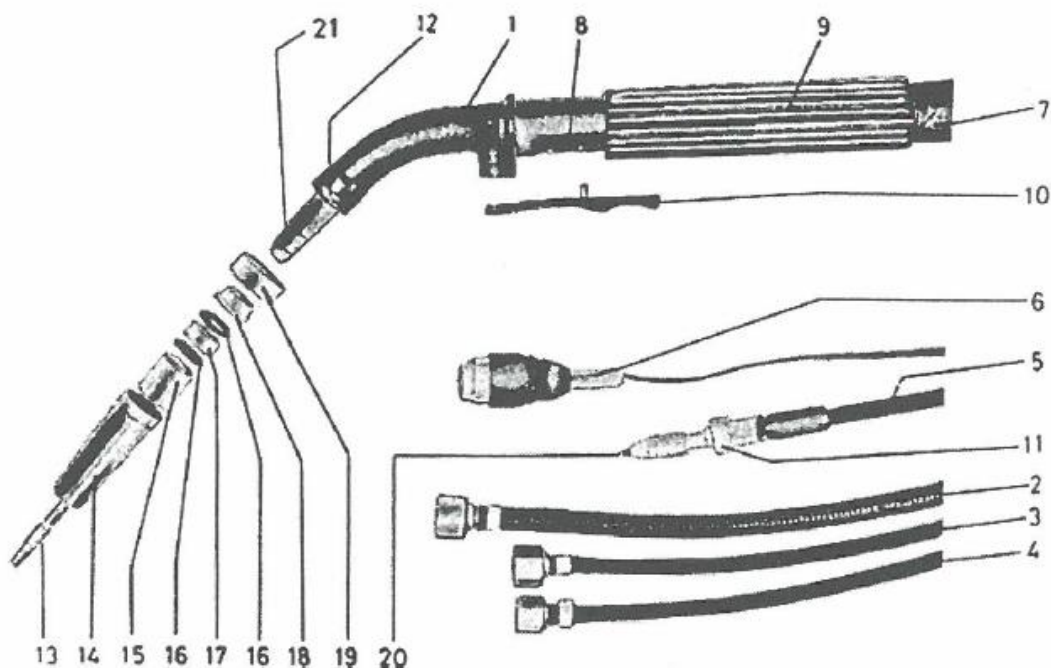
а) систем гурања, б) систем вучење-гурање, в) двојни систем вучење-гурање,
г) систем гурање-вучење

3.2.3 Пиштољ за заваривање

У почетку држачи жице били су у облику пиштоља са посебно уграђеним цревом за водено хлађење. Касније се користио држач у облику луле са изменљивим завршетком, а хлађење водом је замењено ваздушним хлађењем (сл.3.8). Док је данас развој држача усмерен ка смањењу тежине, уз могућност регулисања слободног краја жице и побољшању хигијене рада инсталирањем уређаја за усисавање заваривачког дима и прашине.



Слика 3.8 Компоненте пиштоља за заваривање ваздушним хлађењем [10]



1- тело пиштоља, 2- струјни кабал са воденим хлађењем, 3- цево за расхладну воду, 4- цево за заштитни гас, 5- цево за довођење жичане електроде, 6- петополни кабал са петополном утичницом, 7- заштитно цево, 8- улазна вођица за жичану электроду, 9- одстојна чаура, 10- контактна вођица, 11- млазница са гасом, 12- изолациони прстен, 13- заптивни прстен, 14- одстојни прстен, 16- притисни прстен, 17- навртка за повезивање, 18- гасна дизна

Слика 3.9 Компоненте пиштоља за заваривање воденим хлађењем

Пиштољ се израђује најчешће у две варијанте. За струју $I < 350$ А производи се са ваздушним хлађењем, а за струју $I > 350$ А са воденим хлађењем. У пиштољу постоје поједини делови који су потрошни. Делови који су изложени хабању су пре свега контактна вођица ("дизна") и млазница ("шоба"). Саставни делови пиштоља са воденим хлађењем приказани су на слици 3.9.

Контактна вођица – има улогу да преноси струју и води жичану электроду. Израђује се од бакра (Cu-Cr-Zr) у облику цевчице, који има добру електропроводљивост и термостойаност. Вођица има нарезан спољашњи навој како би се завилала у дифузор (адаптер). Електрична жица мора лако проћи кроз вођицу како би се постигао што бољи електрични лук, као и стабилност ради бољег завара. Пречници жица су стандардизовани $d = 0,8; 1,0; 1,6$ и $2,4$ mm.

Млазница за гас (сл. 3.10) – служи да усмери заштитни гас око врха електродне жице тако да гас прекрива заваривачко купатило. Млазницу треба повремено чистити од налепина тј. очврслих капљица течних метала. За скидање налепина понекад се користе паста или спреј. Обично се израђује од бакра, који има добру топлотну проводљивост па неће доћи до топљења врха млазнице. При вртложном струјању лук постаје нестабилан па су млазнице тако конструисане да омогуће ламинарно струјање.

Од остале опреме за МАГ/МИГ заваривање треба споменути: регулациони вентил за подешавање притиска односно протока заштитног гаса, мерач протока потрошње заштитног гаса, комору за мешање (у случају заваривања у смеси више гасова) и грејач који спречава настанак "сувог леда", тј. чврстог CO_2 у регулационом вентилу.



Слика 3.10 Врх пиштоља за МИГ/МАГ заваривање [2]

Комплетан уређај за МИГ/МАГ заваривање састоји се од: извора напајања, командног модула, катура са жицом, боце са заштитним гасом и каблова за пиштољ, односно уземљења [1].

4. Додатни и потрошни материјали за МАГ/МИГ заваривање

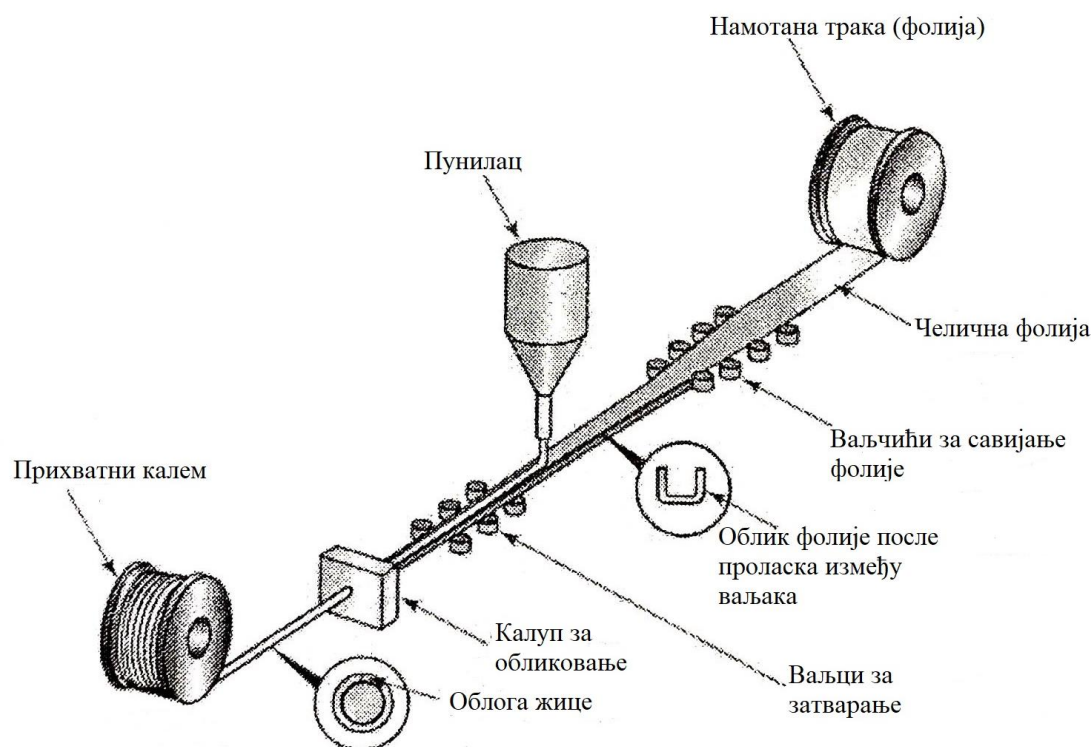
4.1 Развој електродне жице за МИГ/МАГ заваривање

У почетним годинама развоја и примене МИГ-а (1945-1950.) и МАГ-а (1953-1955.) коришћене су само пуне електродне жице. Од 1956. године датује експериментисање и употреба пуњених жица за CO_2 заваривање челика. Пуне жице биле су, а и данас су, по хемијском саставу и механичким особинама, веома блиске основном материјалу. Оне су намењене за заваривање нискоугљеничних и нисколегираних челика, затим челика повишне јачине и нерђајућих (Cr-Ni) челика, а пуне жице од лаких и обојених метала служе за заваривање легура алуминијума и магнезијума, дезоксидисаног бакра и силицијумске бронзе. Правило да би електродна жица требало да буде слична основном материјалу има изузетака; наиме од неких кртих легура (нпр. ливеног гвожђа), никако се не може вучењем на топло кроз серију калибрисаних отвора, добити танка жица. Ипак се ливено гвожђе може спајати МИГ-ом и помоћу додатне жице од силицијумске бронзе по поступку званом заваривачко лемљење.

Додатни материјали за МИГ/МАГ заваривање челика припадају висококвалитетним челицима ($P \leq 0.025\%$, $S \leq 0.035\%$) добијеним у електропећима. Поред веома ниског садржаја нечистоћа (P и S), електродне челичне жице за МАГ заваривање имају повећан садржај дезоксидатора Mn и Si. Наиме, долази до дисоцијације CO_2 у електричном луку према хемијским реакцијама: $\text{CO} = \text{CO} + 1/2 \text{O}_2$; $\text{CO} = \text{C} + 1/2 \text{O}_2$, које стварају слободан кисеоник; оксидација гвожђа и других елемената у челику, може се спречити дезоксидаторима Si и Mn који брже реагују са ослобођеним кисеоником и образују једињења MnO и SiO_2 нерастворљива у течном гвожђу. Ови оксиди при кристализацији купке излазе на површину шава у виду стакласте троске. Додатне жице за заваривање угљеничних челика имају око 0.12% C, 1.4-1.6% Mn и 0.8-1.0% Si, као и низак садржај P и S.

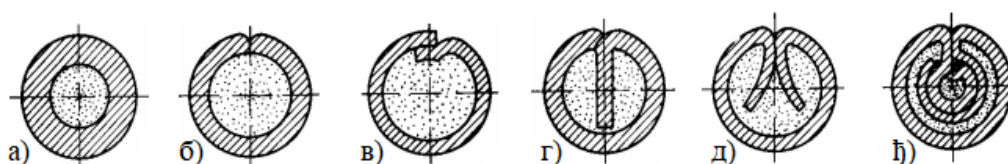
На електродним жицама наноси се танак слој бакра, дебљине 1-3 μm , у циљу снижавања контактеног електричног отпора између жице и вођице, који такође смањује трење при проласку жице кроз вођицу и штити челичну жицу од корозије док се она држи у магацину.

1956. године уведен је нови тип топлјиве електродне жице: жица са језгром од прашка, који се састоји од одговарајућих легирајућих елемената и састојака за образовање троске. Тиме је остварена давнашња тежња многих инжењера и металурга да се исти састојци као код облога РЕЛ-електрода убаце у меку жицу и тако механизује поступак заваривања. Тракаста фолија од меког челика најпре се преко ваљака савија у облику слова У (сл. 4.1), а затим се пуни неким спрашеним металима: феро-манганом, феро-молибденом, феро-хромом, феро-никлом и топитељима: рутилом (TiO_2), кречњаком (CaCO_3) и флуоритом (калцијум флуоридом - CaF_2) који повећава течљивост троске. Даље трака пролази кроз калуп са централном рупом (калибар) који затвара У-профил и најзад се већ формирана пуњена жица намотава на калем.



Слика 4.1 Израда пуњене жице од челичне фолије и праха [2]

Према начину затварања челичне фолије, пуњене жице могу бити различитих облика приказаних на слици 4.2.



Слика 4.2 Карактеристични пресеци пуњених жица [8]

Ове жице, назване "пуњене жице" данас су нашле велику примену како у комбинацији са заштитним гасом тако и без њега, пошто се сагоревањем прашка ослобађају гасови који штите растопљени метал од ваздуха (самозаштита). Практично су то једине електродне жице са којима се може успешно заваривати на ваздуху без посебних мера.

Као додатни материјал за заваривање у заштити гаса данас се могу употребити, у зависности од расположивих заваривачких уређаја, и технологије: електродне жице – пуне и пуњене, биле голе или са заштитном превлаком, као и пуне и пуњене електродне траке, такође голе или са превлакама. Стандардизовани пречници пуњених жица су: 1.2; 1.6; 2.0; 2.4 и 3.2 mm, а за принудне положаје се препоручују жице пречника испод 2 mm. Додатни материјал се испоручује у савијеним круговима или намотан на калемове различитих димензија и тежина прилагођених за заваривање на разним врстама заваривачких уређаја [1, 2].

4.2 Врсте жица за МИГ/МАГ заваривање и њихове особине

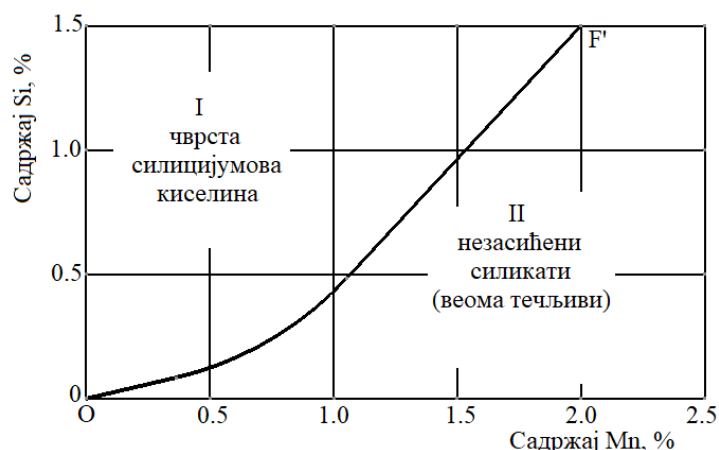
За заваривање топљивом електродном жицом употребљавају се пуне или пуњене жице, које су због њихове додатне функције назване електродним жицама.

Електродне жице спадају у железарске производе највишег квалитета, с обзиром на садржај фосфора и сумпора, јер и ови елементи утичу на стабилност процеса заваривања и механичке особине споја. Од жица се тражи:

- Стални и одрживи хемијски састав (код свих испорука);
- Минимални садржај гасова у металу;
- Уска толеранција пречника жице;
- Висок квалитет површине голих или пресвучених (превучених) жица;
- Чиста површина;
- Одговарајућа еластичност;
- Могућност равномерног намотавања на калем.

Посебно се производе жице од нискоугљеничних, нисколегираних и високолегираних (Cr-Ni) челика. За неке челике повишене јачине (C-Mn и микролегиране) одговарају жице исте као и за нискоугљеничне челике, док се за термички побољшане челике препоручују посебне жице, а за неке од њих и заваривање у мешавини гасова ($\text{Ar} + \text{CO}_2$) или ($\text{Ar} + \text{O}_2$). При МАГ заваривању нискоугљеничних и нисколегираних челика, у циљу смањења порозности, склоности ка прслинама и постизања потребне јачине и пластичности, треба водити рачуна о односу Mn/Si у жици. Код једне врсте жица тај је однос 1.3-2.4, код других 1.8-3.1 и код трећих 1.6-3.4.

Значај односа Mn/Si може се објаснити помоћу слике 4.3. Крива OF' је линија засићења силицијумом, која одговара равнотежи у систему метал-троска. Област испод OF' представља зону у којој се продукти реакције Mn и Si јављају у течном стању у као незасићен силикат $\text{SiO}_2\text{-MnO}$. Они се лако коагулишу и испливавају на површини купке у виду троске. Супротно томе, ако се координата тачке дефинисана садржајем Mn и Si нађе изнад криве OF' издвајаће се анхидрид силицијумове киселине (H_2SiO_3 -киселина; SiO_2 -анхидрид) који остаје у шаву у виду чврстог раствора. То може бити узрок кртости шавова. Из овог разлога, тачке одређене садржајем Mn и Si у електродним жицама морају лежати испод криве засићења OF', тим пре што је то важно за смањење порозности и склоности ка врућим (топлим) прслинама. Површина жица мора бити глатка и чиста, без рђе, коварине, прљавштине и масти. Површине жица од високолегираних челика морају да буду декапирани, а жице од нискоугљеничних челика, као што је већ речено, заштићују се танким слојем бакра или каткад никла, хрома или бронзе. Слој бакра је дебљине 0.001-0.003 mm, равномеран и добро повезан са подлогом. Главни циљ бакарисања је да се постигне добар електрични контакт са вођицом и да се смањи коефицијент трења између покретне жице и контактне вођице, и да се жица заштити од корозије. Жице са ољуштеним/оштећеним бакарним слојем не треба употребљавати, јер ће се заглављивати у вођици, што показује да су већ начете корозијом [1].



Слика 4.3 Област садржаја Si и Mn за успешну деоксидацију (II) [1]

Важна особине електродне жице јесте могућност лаког кретања кроз сиситем за вођење и пиштољ за заваривање. До компликација и прекида процеса заваривања при померању жице може доћи у случају великог отпора. Жица мора имати одређену јачину на кидање, глатке површине и велика опружна својства која се контролишу када жица лежи слободна. При великом удаљењу извора струје од места заваривања, мека електродна жица, може се избочавати, што ће отежати њено довођење или чак изазвати заглављивање. Све то даје нестабилан лук или доводи до делимичног стапања краја контактне вођице. Јачина на кидања жица зависи од пречника и мора да износи 900-1100 МПа за пречнике 0.6-0.8 mm, 800-1000 МПа за 1.2-1.6 mm и 600-800 МПа за пречнике 2 mm.

4.2.1 Пуне електродне жице

За МАГ заваривање, као додатни метали највише се употребљавају електродне жице израђене од меког челика са највише 0.12% С и повећаним садржајем Si (0.8-1.0%) и Mn (1.4-1.6%). То су квалитетни производи, који морају имати глатку површину без металуршких грешака и површинских прљавштина, јер оне могу изазвати порозност или неметалне укључке у шаву. Контрола белим рукавицама је најбоља, а ако се оне запрљају жица се одбацује. Жице се пресвлаче танким слојем бакра (дебљине 1-3 μm) који равномерно и добро налаже на подлогу.

Жице намењене поступку МИГ заваривања није могуће применити код МАГ поступка. Додатни метали за заваривање у заштити инертних гасова су (МИГ и ТИГ) скоро истог састава као и основни, док се код жица за МАГ заваривање меких и нисколегираних челика, ограничава садржај угљеника и води рачуна о односу Mn/Si (сл. 4.3). На овај начин постиже се тражена јачина и пластичност шав, а спречава порозност и умањује склоност ка прслинама [1].

4.2.2 Пуњене електродне жице

Поред пуних жица у новије време све више се примењују и пуњене жице или специјалне жице за рад са отвореним луком, тј. на ваздуху (самозащитне жице). Идеја да се састојци слични као код облоге електроде, убаце у језгро пуњене жице и тиме омогући непрекидан полуаутоматски рад је остварена. Пуњене жице употребљавају се само за заваривање челика, ливених гвожђа и наваривање челика и челичног лива.

Електродне жице са прашкастим језгром, у ствари су цевасте жице округлог спољњег пресека, испуњене смесом прашка базичног или рутилног карактера. Ове жице су намењене за заваривање и наваривање у заштити гаса или самозаштитним луком, као и за друге методе лучног заваривања. Зависно од састава језгра, жице се декларишу као базичне, рутилне, рутилно-целулозне, рутилно-флуоритне и др. Омогућавају лако увођење у метал шав не мале количине легирајућих елемената - чак до 10%. Ово је посебно важно при тврдом наваривању кад је неопходно унети легирајуће елементе (Cr, W) за образовање карбида, које није могуће убацили у навар преко пуних жица. Помоћу коефицијента пуњења дефинише се маса срца жице у односу на масу целе жице. У зависности од намене жице и њене конструкције, састав се може мењати у широким границама достижући и 40%. Жице пуњене прашком карактеришу се бољим заваривачким особинама него пуне, посебно тиме што мање прште. Самозаштитне пуњене жице се нарочито употребљавају за заваривање напољу, јер су мање осетљиве на дување ветра или промају, те су погодне за рад у теренским условима.

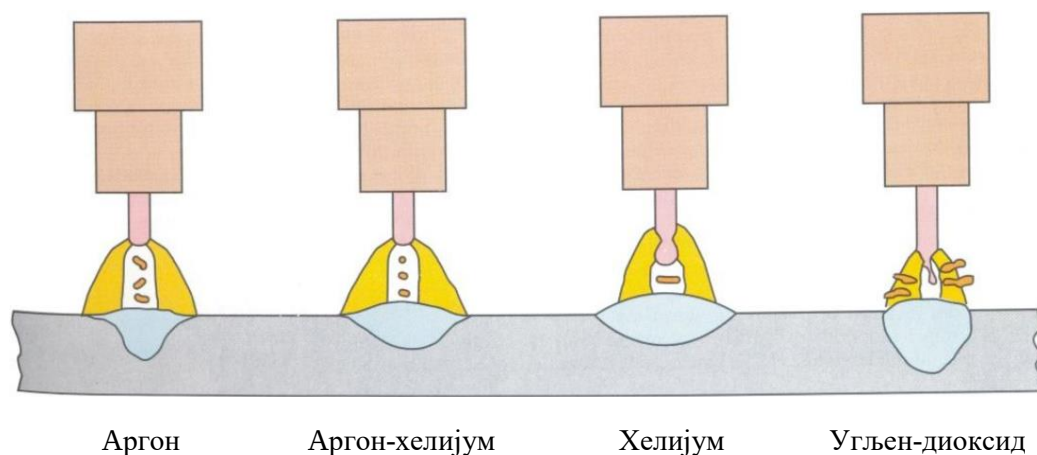
Мана пуњених жица јесте издвајање веома велике количине дима и прашине што смањује видљивост и погоршава хигијенско техничке услове при раду. Електродне жице пуњене прашком имају стандардизоване пречнике: 1.2; 1.6; 2.0; 2.4; 3.0 и 3.2 mm. Заваривање овим жицама у принудним положајима могуће је само ако се употребе жице пречника мањег од 2 mm.

4.3 Заштитни гасови за МИГ/МАГ заваривање

У зависности од основних материјала (угљенични, нисколегирани, нерђајући челици, Al, Mg, Cu и њихове легуре), врсте заварених спојева (сучеони, угаони, преклопни) и положаја заваривања (коритасти, хоризонталан, хоризонтално-вертикалан, вертикалан и изнад главе); могу се користити следећи технички гасови:

- инертни (Ar, He),
- активни (CO₂, O₂, N₂) и
- мешавина гасова (Ar+He, Ar+CO₂, Ar+O₂).

Облици (профили) навара и дубина уваривања добијени у заштити Ar, Ar+He, He и CO₂ дати су на слици 4.4.



Слика 4.4 Облици навара и дубина уваривања добијени у заштити Ar, Ar+He, He и CO₂ [2]

У случају примене чистог аргона, хелијума или njihове мешавине поступак се назива МИГ, а када се употреби CO_2 или смеша $\text{Ar}+\text{CO}_2$, односно смеша $\text{Ar}+\text{O}_2$ па макар било и само 1% O_2 заштитни гас постаје активан те се поступак назива МАГ. Врста заштитног гаса може олакшати и убрзати процес заваривања, допринети лакшем формирању шава и одржавању профила положеног завара и такође може спречити неке грешке у металу шава.

Аргон (Ar) је безбојни гас густине 1.78 kg/m^3 , што значи да је 1.4 пута тежи од ваздуха. Добија се рефтификацијом ваздуха уз претходно издвајање кисеоника због различитих температура кључања састојака ваздуха: кисеоник на -183°C и азот на -196°C . Аргон је инертан гас, без боје, мириса и укуса. Иако није отрован, треба имати у виду да Ar у затвореној просторији може да смањи концентрацију кисеоника. Аргон је стандардизован по JUS H.F1.018 (сада СРПС), где је прописан квалитет, употреба, метода испитивања и начин испоруке. Аргон се испоручује у челичним боцама означеним жутом бојом, запремине 40 l и притиска до 200 bara, при чему у боцу стаје 6 Nm^3 , односно 10 kg аргона. Боце са Ar се не празне до краја, већ се увек оставља довољан натпритисак да се спречи продирање ваздуха у боцу.

Угљен-диоксид је гас без боје и мириса, киселкастог укуса. До концентрације 2,5% CO_2 није опасан за удисање (краће време), али у већој концентрацији или при дуготрајнијем дејству може да буде штетан. Угљен-диоксид је стандардизован по JUS H.F1.016, складишти се у челичним боцама, означене тамносивом бојом, запремине 40 l и притиска 70–100 bara, тако да у сваку боцу стаје 15 Nm^3 односно 30 kg CO_2 . Стандардом су дефинисана три квалитета CO_2 : технички, чист и чврст (суви лед). При заваривању се примењује чист CO_2 најмање концентрације 99,8% [6, 7].

У табели 4.1 дате су технолошке карактеристике гасова коришћених за заваривање челика МИГ-МАГ поступцима, а табела 4.2 приказује преглед могућих заштитних гасова за МАГ и МИГ поступке заваривања.

Табела 4.1 Технолошке карактеристике гасова коришћених за заваривање челика МИГ-МАГ поступцима

Врста челика	Начин заваривања	Заштитни гас	Технолошка карактеристика
Нискоугљенучни и нисколегирани челици	Р и М	CO ₂	Заваривање у свим положајима краткоспојеним луком, добро уваривање, релативно велико прштање
		CO ₂ + 20% O ₂	Повећано уваривање, остало слично као код CO ₂
		Ar + 20÷30% CO ₂	Већа стабилност лука, минимално прштање, равно и правилно лице шави
		Ar + 5÷12% O ₂	Слично као Ar + CO ₂
		Ar + 10% CO ₂ + 5% O ₂	Углавном за легиране челике
Високолегирани челици	Р и М	Ar	Стабилан краткоспојени пренос у млазу
		Ar + 2-5% O ₂	Велика стабилност лука, нарочито краткоспојеног
		Ar + 20% He + 5% CO ₂ Ar + 30% He + 5% O ₂	Нарочито велика стабилност краткоспојеног лука при заваривању нерђајућих и ватроотпорних челика
		Ar + 20÷30% CO ₂	Боља стабилност краткоспојеног преноса него у Ar, али је нешто мања отпорност на корозију

(Р- ручно заваривање, М- механизовано заваривање)

Табела 4.2 Врсте заштитних гасова за различите основне материјале

Гасови и смеше	Основи материјал за заваривање
Ar	Сви метали
He	Сви метали
Ar + 35÷75% He	Посебно се препоручује за алуминијум, бакар и никал (нарочито при заваривању у плафонском положају)
Ar + 0.5 O ₂	Алуминијум и његове легуре
Ar + 1÷2 O ₂	Високолегирани Cr-Ni челици
Ar + 3÷5 O ₂	Нискоугљенични и нисколегирани челици
Ar + 5÷10 H ₂	Високолегирани Cr-Ni челици за аутоматско заваривање
Ar + 25÷30 N ₂	Бакар и његове легуре
Ar + 20÷50 CO ₂	Нискоугљенични и нисколегирани челици
70% Ar + 20% CO ₂ + 2% O ₂	Нискоугљенични и нисколегирани челици
CO ₂	Нискоугљенични и нисколегирани челици
N ₂	Бакар и његове легуре

5. Технолошки параметри и технологија МАГ/МИГ заваривања

На квалитет оствареног споја од пресудног су значаја правилно одређени и у раду одржавани параметри заваривања. Они зависе од низа утицајних променљивих, као што су: врста споја, врста и пречник електродне жице, облик жлеба, дебљина и врста основног материјала, положај заваривања, као и посебни захтеви везани за непропустљивост, отпорност на корозију и др. Постоје бројни начини за одређивање параметара заваривања, начешће се они бирају на основу рачунских и искуствених препорука произвођача опреме и додатног материјала. Усвојени параметри служе као полазна основа за избор режима заваривања који се проверавају на пробним узорцима. После контроле заварених спојева, могу се коначно усвојити параметри заваривања од којих се очекује да у датим условима даје најбоље резултате [4].

5.1 Најутичајнији параметри МАГ/МИГ заваривања

Пре почетка рада, радник бира напон празног хода и фино га подешава на извору струје. Други енергетски параметар, јачина струје у луку зависи од брзине довођења жице; већој брзини одговара краћи лук па стога и јача струја, а кратком споју најјача струја. Да би се успоставили повољни енергетски услови, радник треба да избалансира напон празног хода и брзину довођења жице.

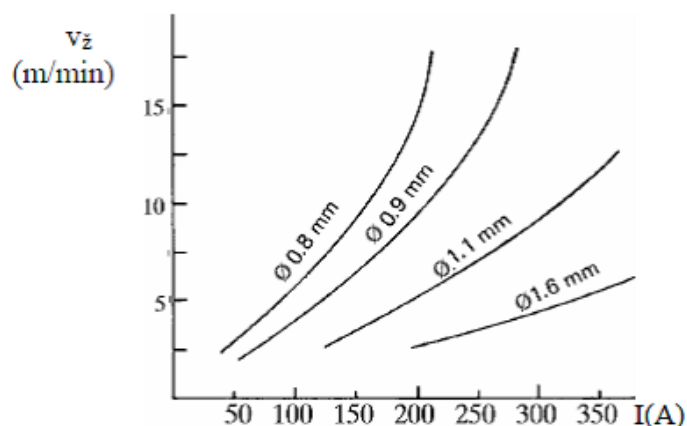
У најутичајније параметре МАГ заваривања, који у великој мери утичу на квалитет изведеног споја, спадају:

- Јачина струје заваривања (посредно се регулише брзином довођења жице),
- Напон електричног лука (радни напон),
- Врста и пречник електродне жице,
- Брзина заваривања,
- Врста заштитног гаса и његова потрошња,
- Поларитет жичане електроде,
- Величина додатног индуктивитета,
- Дужина слободног краја жичане електроде,
- Удаљеност млазнице заштитног гаса од радног комада,
- Положај пиштоља за заваривање у односу на радни предмет и смер заваривања итд [4].

5.1.1 Јачина струје заваривања

Јачина струје заваривања директно зависи од подешавања брзине довођења жичане електроде. Значи струја заваривања се директно подешава помоћу брзине довођења жичане електроде. Зависност јачине струје заваривања од брзине довођења електродне жице дата је на слици 5.1. Повећањем брзине довођења жице, а тиме и јачине струје, расте и дубина уваривања, односно и количина депонованог материјала у јединици времена. При осталим константним параметрима, зависност брзине топљења електродне жице и јачине струје је линеарна за мање вредности јачине струје, а при већим вредностима јачине струје, посебно код мањих пречника жице, зависност постаје

неллинеарна (сл. 5.1). Разлог за то је загревање слободног краја жице електричним отпором, те за константну брзину довођења жице већег пречника захтева се већа вредност јачине струје, с тим да је код МАГ/МИГ метода неллинеарност те зависности израженија у односу на РЕЛ метод заваривања [1, 7, 15].



Слика 5.1 Зависност јачине струје од брзине довођења жице за усвојени пречник жице [7]

Са већом густином струје постиже се боље уваривање и ужи шав што произлази из пораста специфичног топлотног флуksа. Ту постоји граница, јер би преоптерећење електродне жице великим јачинама струје довело до поремећаја процесних параметара заваривања.

Са прејаком струјом заваривања, при осталим непромењеним параметрима, долази до :

- Већег уваривања у основни материјал,
- Лошијег изгледа лица шава – завара,
- Већег надвишење шава – завара,
- Оштријег заједа од прегревања у прелазној зони – тик уз завар,
- Повећања распрскавања капљица метала.

Са преслабом (мањом) струјом заваривања, при осталим непромењеним параметрима, долази до:

- Недовољног уваривања,
- Неједнаке ширине површине шава – завара (уско – широко) и
- Могућности појаве налепљивања.

Код МАГ поступка заваривања уобичајене вредности струје заваривања се крећу од 100 до 200 A/mm^2 . Узима се у обзир површина пресека електродне жице чији је пречник 1 mm , тако да је њена површина 0,785 mm^2 . Ово значи да се струја креће у границама од 78 до око 160 А. Када се ради са смешом ова струја може ићи до 350 A/mm^2 што практично значи струју од око 280 А [15].



Премала струја

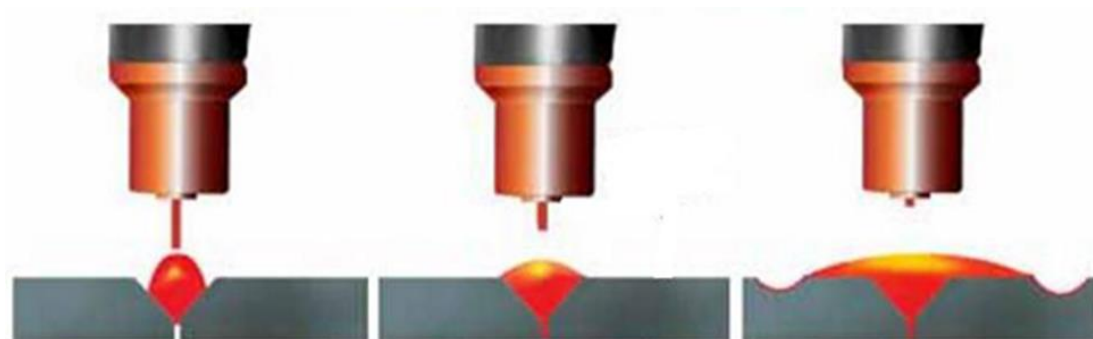


Превелик напон и струја

Слика 5.2 Реални приказ изгледа завара у зависности од јачине струје [15]

5.1.2 Напон електричног лука

Напон лука бира се на извору струје помоћу одговарајућег прекидача. Напон лука има значајан утицај на квалитет завареног споја, јер променом његових вредности утиче се на облик преноса додатног материјала, дубину уваривања и у мањој мери на димензије шавва. У физичком смислу, напон је условљен дужином лука – мања дужина лука даје нижи напон и обрнуто. Низак напон доводи до формирања ужег завара и веће дубине уваривања, а превисок напон до повећања ширине завара и релативно мале дубине увара, а поред тога и до распрскивања истопљених капи метала чиме се погоршавају хемијски састав шавва и услови за формирање шавва (сл. 5.3). Када су напон, јачина струје и пречник електродне жице правилно одабрани лук је стабилан и миран, распрскивање капљица метала је веома мало уз шав најбољег квалитета. На слици 5.4 приказане су зависности напона лука од јачине струје за различите пречнике електродне жице, а на слици 5.5 приказан је однос напона лука и струје заваривања [4].

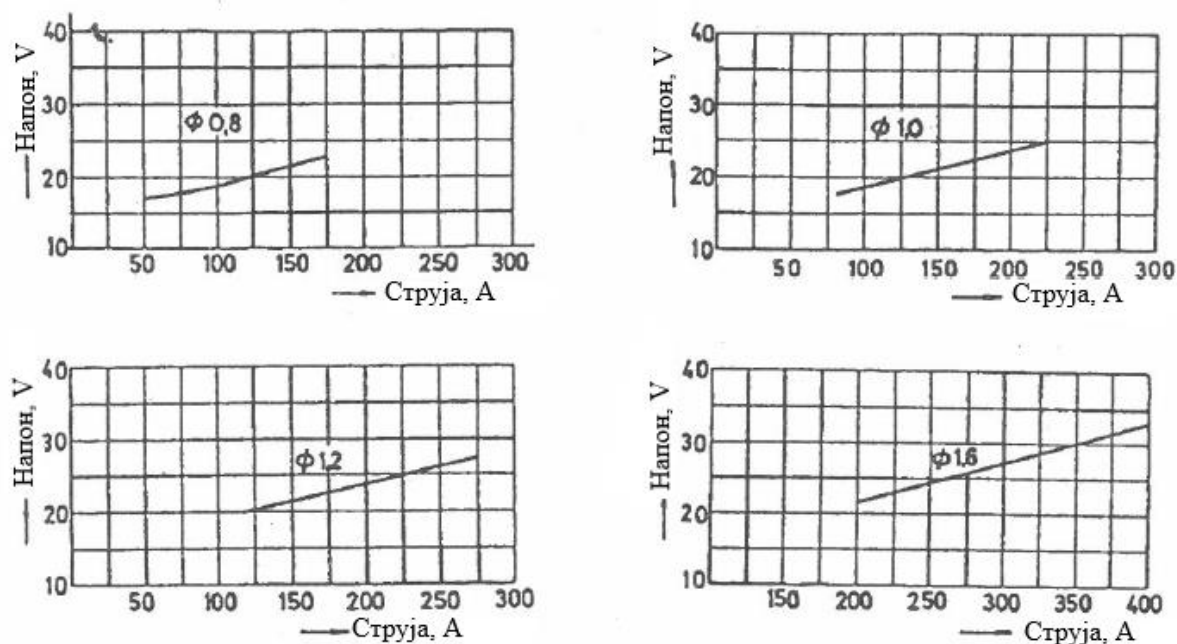


Низак напон лука

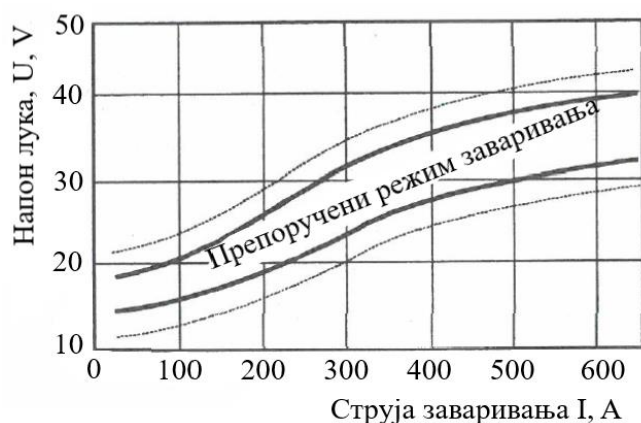
Повољан напон лука

Високи напон лука

Слика 5.3 Шематски облици завара с обзиром на напон електричног лука [15]



Слика 5.4 Зависност напона лука од јачине струје за различите пречнике електродне жице [4]



Слика 5.5 Препоручени режим заваривања [4]

5.1.3 Врста и пречник електродне жице

Пречник електродне жице бира се према дебљини основног материјала, а на основу пречника електродне жице бира се јачина струје. У случају недовољне јачине струје, односно превеликог пречника електродне жице, њено топљење је недовољно, а супротно томе долази до великог распрскивања, порозности и неправилне геометрије шавова. Стандардизовани пречници електродне жице су 0.6; 0.8; 1.0; 1.2; 1.6; 2.0 и 2.4 mm за пуне и 1.2; 1.6; 2.0; 2.4; 3.0 и 3.2 mm за пуњене електродне жице. Уколико је потребно постићи већу дубину уваривања, а мању ширину шавова примењују се мањи пречници (већа густина струје). Према томе, густина струје дефинисана је као количник јачине струје и пречника електродне жице. Највише се примењују жице пречника 1.2 и 1.6 mm, за које је углавном детаљно и разрађен прорачун параметара заваривања.

Препоручене вредности јачине струје и напона, зависно од пречника жице, дате су у табели 5.1.

Табела 5.1 Препоручене вредности јачине струје и напона лука

Пречник жице, <i>mm</i>	Јачина струје, <i>A</i>	Напон лука, <i>V</i>
0.8	50-200	16-25
1.0	80-230	18-25
1.2	100-380	18-35
1.6	150-450	22-35
2.4	380-650	26-38

За заваривање краткоспојеним преносом користе се жице пречника 0.8 – 1.2 *mm*, за прелазни/мешовити пренос узимају се жице пречника 1.2 *mm*, а за пренос у млазу жице пречника 1.2 – 1.6 *mm* или пуњене жице пречника 1.6 – 2.4 *mm* [4].

5.1.4 Брзина заваривања

Брзина заваривања се односи на брзину кретања електричног лука дуж линије спајања. Од правилно изабране брзине заваривања зависи геометрија споја, могућност појаве грешака, као и облик шавова. Мала брзина заваривања доводи до веће количине истопљеног метала који "бежи" испод и испред лука на хладан материјал при чему долази до грешака облика шавова, налепљивања, порозности и тсл. Превелика брзина заваривања доводи до мањег уваривања, уже гусенице зава, великог надвишења и лошег изгледа шавова. Најповољнију брзину заваривања треба изабрати на основу дебљине основног материјала, типа споја, положаја заваривања и др. [4].



Премала брзина заваривања



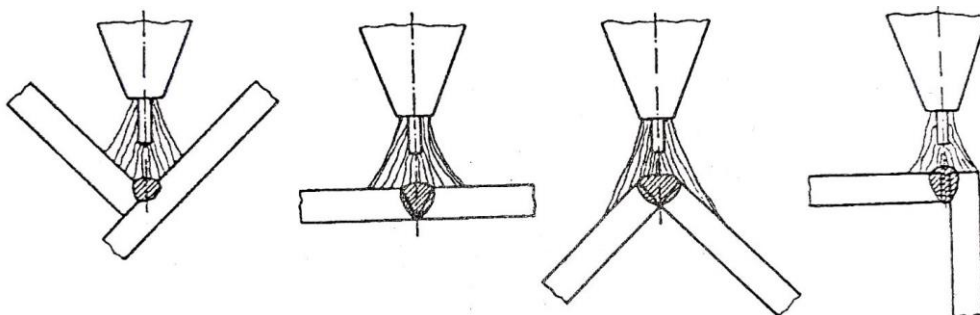
Превелика брзина заваривања

Слика 5.6 Изглед зава у зависности од брзине заваривања [15]

5.1.5 Врста заштитног гаса и његова потрошња

Врста заштитног гаса бира се у зависности од основног и додатног материјала. Проток гаса зависи од типа споја (сл. 5.7), облика и димензија жлеба, јачине струје, напона лука, брзине заваривања, места заваривања, типа пиштоља за заваривање и тсл.

Да би заштитни гас могао да обави функцију за коју је намењен неопходно је да буде потребне чистоће и да је присутан у одговарајућој количини. Недовољна количина заштитног гаса може проузроковати порозност метала шави, док с друге стране, превелика количина гаса појачава струјање, тј. турбуленцију заштитног гаса на излазу из млазнице што погоршава учинак заштите. Потрошња гаса оријентационо се креће, за сучеоне спојеве 500-600 l/h, а за угаоне спојеве 300-400 l/h [4].



Слика 5.7 Утицај типа споја на расипање и потрошњу заштитног гаса [4]

5.1.6 Поларитет жичане електроде

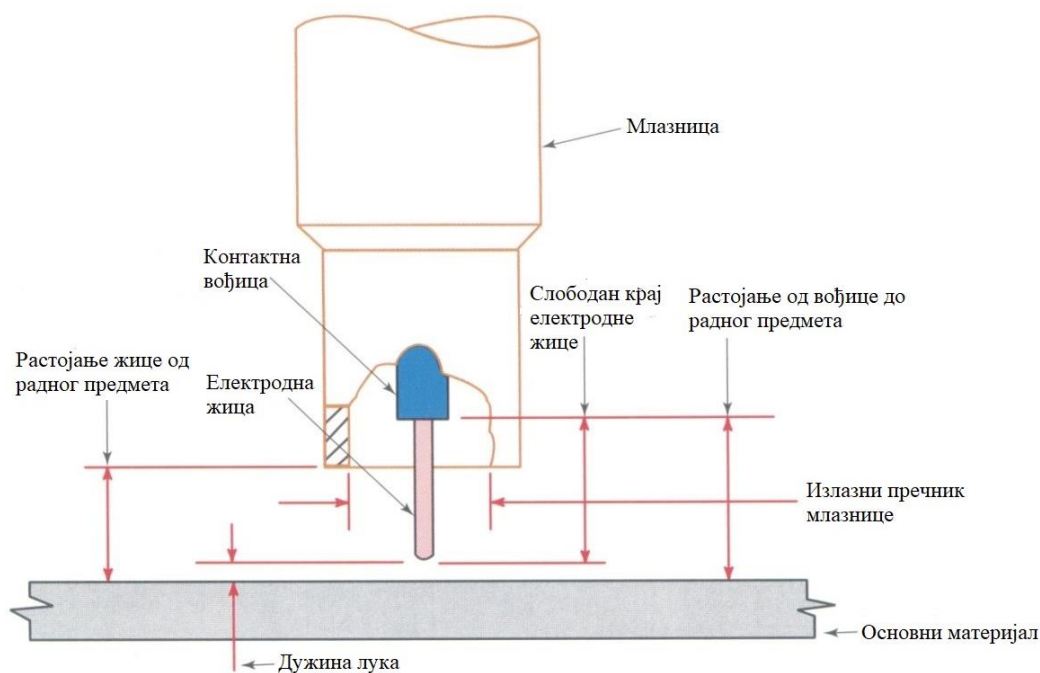
По правилу се за МАГ/МИГ заваривање електродна жица везује за + пол (обрнути поларитет, Е +), а у случају наваривања жичана електрода везује се за – пол (прави поларитет, Е -). Обрнути поларитет даје стабилан лук, равномернији пренос додатног материјала (по потреби пренос у млазу и при коришћењу активних гасова) са минималним губицима услед распрскивања. Као што је већ напоменуто користе се исправљачки извори једносмерне струје, а наизменична струја се не користи због мање стабилности лука при промени поларитета у сваком полупериоду циклуса.

5.1.7 Величина додатног индуктивитета

Добијање мирног и стабилног лука, нарочито при краткоспојном преносу, основна је улога додатног индуктивитета који се регулише преко струјних намотаја извора напајања. Да би се смањио број кратких спојева, мора се правилно изабрати напон лука и брзина топљења електродне жице. Ако је индуктивитет нижи, бржи је пораст јачине струје, кратки спојеви су учесталији, краће време се одржава лук и загревање је мање ("хладније" заваривање). У случају већег индуктивитета (пригушења), спорији је раст струје, ређе настају кратки спојеви и дуже је време одржавања лука ("топлије" заваривање). Без допунског индуктивитета не би било могуће заваривање краткоспојним преносом [4].

5.1.8 Дужина слободног краја жичане електроде

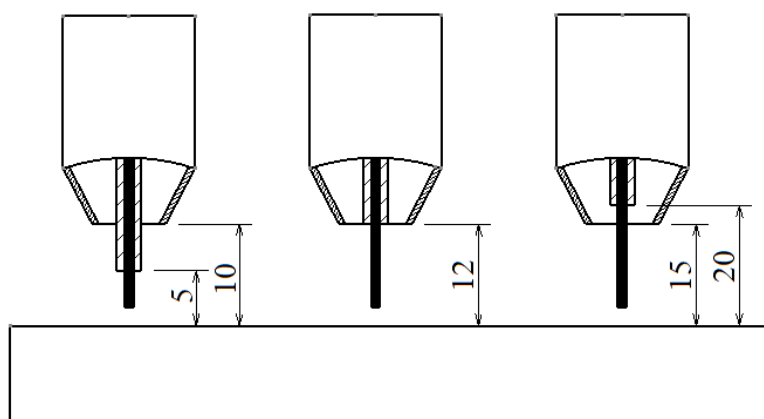
Слободни крај електродне жице мора да буде у одређеним границама, јер његова превелика дужина доводи до вишка додатног материјала, те је дата количина топлоте недовољна за његово топљење, самим тим уваривање је плитко, а облик шави неповољан. Супротно томе, премала дужина слободног краја жице доводи до нестабилности лука. Дужину слободног краја електродне жице неопходно је контролисати и по могућности одржавати је константном у току заваривања. На слици 5.8 приказане су карактеристичне геометријске величине при МАГ/МИГ заваривању.



Слика 5.8 Карактеристичне геометријске величине при МАГ/МИГ заваривању [4]

За режим краткоспојног преноса дужине слободног краја електродне жице креће се у распону 2.5-13 *mm*, а за остале облике преноса 2.5-25 *mm*. По правилу, треба ићи на што мању дужину слободног краја жице, јер се тако добија мирнији лук. С друге стране, слободни крај жице не сме да буде прекратак, јер би течан метал врло брзо оштетио млазницу [4, 7].

Поред слободног краја жице, и одстојање контактне вођице, као и млазнице од радног комада, битно утичу на заваривање (сл. 5.9). Пракса је показала да се вођица монтира у млазницу најчешће према шеми 5.9 в. У табели 5.2 дате су вредности за дужину слободног краја жице и за удаљење млазнице од јачине струје.



Слика 5.9 Положај млазнице за гас и контактне вођице за различите вредности јачина струје: а) $I=50-150\text{ A}$, б) $I=150-350\text{ A}$, в) $I>350\text{ A}$ [4]

Табела 5.2 Дужина слободног краја жице (*b*) и растојања млазнице (*a*)

Јачина струје, А	50	100	150	200	250	300	350	400
<i>b</i> , mm	5	6	8	10	12	14	17	20
<i>a</i> , mm	10	10	10	12	12	12	15	15
<i>a</i> – растојање млазнице од радног предмета, <i>b</i> – слободни крај електродне жице								

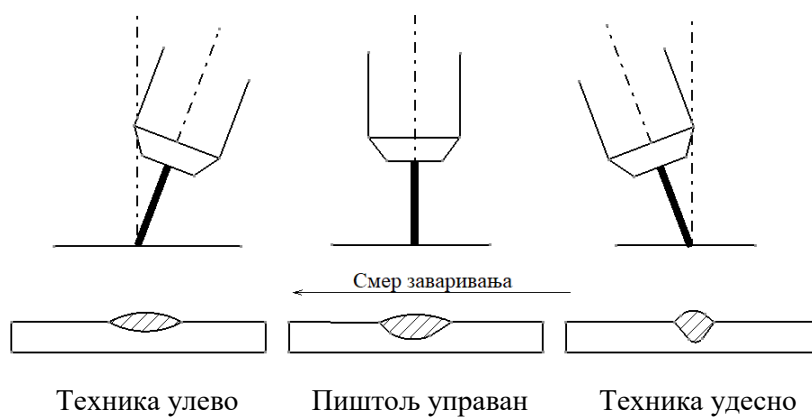
5.1.9 Удаљеност млазнице заштитног гаса од радног предмета

Ово растојање је веома битно правилно одабрати, јер се једино тако може обезбедити правилна заштита металног растопа, најбоља стабилност лука и заштита млазнице од првеликог трошења. С једне стране, одстојање млазнице од радног комада треба да буде што мање да би заштита гасом била што ефикаснија, док с друге стране, сувише мало одстојање излаже млазницу превеликој топлоти и смањује заваривачу могућност визуелне контроле зоне заваривања. Шематски приказ положаја млазнице у односу на контактну вођицу приказано је на слици 5.9, а вредност растојања млазнице у зависности од јачине струје дате су у табели 5.2 [4].

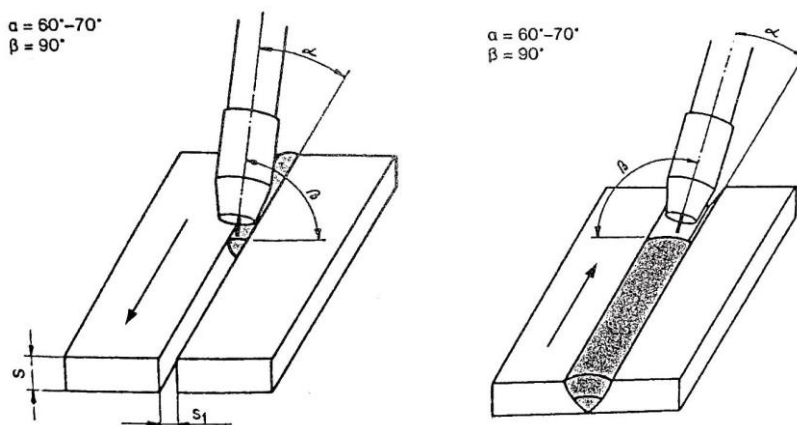
5.1.10 Положај пиштоља у односу на радни комад и смер заваривања.

Положај пиштоља у односу на радни комад има значајан утицај на облик шави и дубину уваривања. Код МАГ/МИГ заваривања користе се две основне технике: улево и удесно (слике 5.10 и 5.11), а која ће бити практично примењена, зависи од тога да ли се захтева већа дубина уваривања или лепши изглед шави. Технику улево карактерише мање уваривање, већа ширина шави али и већа порозност шави, те се примењује за заваривање тањих лимова. Технику удесно карактерише већа дубина увара, ужи и испупчен шав, лошији изглед али и мања порозност шави. Шав поседује боље механичке особине, те се примењује за заваривање дебљих лимова.

Према нагибу пиштоља у односу на вертикалну раван разликују се следеће технике заваривања: унапред (пиштољ нагнут у односу на смер заваривања), уназад (пиштољ нагнут у супротном смеру од смера заваривања) и неутрална (вертикалан положај пиштоља) (сл. 5.10). Иако је нагиб пиштоља релативно мали (10-15°), то знатно утиче на облик и димензије шави, као и на дубину уваривања [4].



Слика 5.10 Утицај положаја пиштоља на облик шави и дубину уваривања [15]



Слика 5.11 Технике МАГ/МИГ заваривања – улево и удесно [4]

Утицајни параметри на величину и ширину зава приказани су у табели 5.3.

Табела 5.3 Ранг утицаја параметара и техника МАГ/МИГ заваривања на облик шави

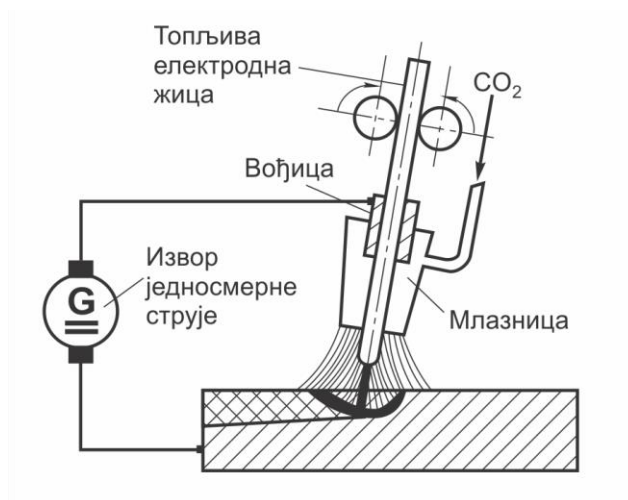
Параметри заваривања који се мењају	Захтеване промене							
	Провера		Брзина ношења		Величина шави/завара		Ширина	
	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓
Струја и брзина довођења жице	↑	↓	↑	↓	↑	↓	*	*
Напон	+	+	*	*	*	*	↓	↑
Брзина заваривања	+	+	*	*	↓	↑	↑	↓
Извучени део жице	↓	↑	↑	↓	↑	↓	↑	↓
Пречник жице	↓	↑		↑	*	*	*	*
% CO ₂ у заштитном гасу	↑	↓	*	*	*	+	↑	↓
Угао пиштоља	Удесно до 25°	Улево до 25°	*	*	*	*	удесно	улево

* Без утицаја ↑ Повећава ↓ Смањује + Мали утицај

5.2 Технолошки параметри заваривања у заштити гаса

5.2.1 Прорачун технолошких параметара МАГ заваривања

При извођењу сучеоних спојева у хоризонталном положају и угаоних спојева у коритастом положају, технолошки параметри заваривања приближно се одређују на основу полазних података, као што су: врста споја, пречник електродне жице и облик шава. Прво се, у зависности од дебљине делова и врсте споја, бирају облик и димензије жлеба према препорукама датим у табели 5.4.



Слика 5.12 Шема МАГ заваривања [3]

На основу података датих у табели 5.5 усваја се попречни пресек појединих завара и одређује укупан број пролаза. Треба имати у виду следеће препоруке за избор пречника електродне жице (d) зависно од дебљине (s) завариваних делова у сучеоном споју, односно од дебљине шава (a) код угаоних спојева (таб. 5.6 и 5.7).

Препоруке којих се треба држати у вези са дебљином угаоних шавова: за носећи угаони шав његова дебљина мора бити најмање 3 mm ($a_{\min}=3\text{ mm}$), односно највише $a_{\max}=0.7 \cdot s_{\min}$, где је $s_{\min}$ најтањи део у споју. Ако се из конструкционих разлога тражи да буде $a_{\max}>5\text{ mm}$, угаони шав треба извести са два или више пролаза.

Масу завара (M) која је потребна да се попуни део жлеба дужине $l=1\text{ cm}$ може се израчунати на основу усвојеног пресека одговарајућег завара (A_z).

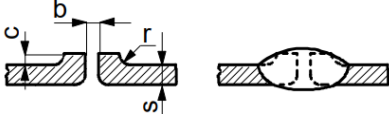
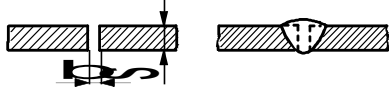
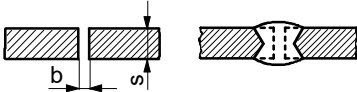
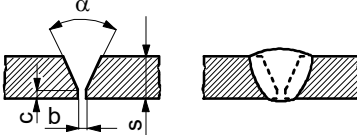
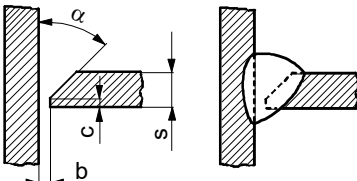
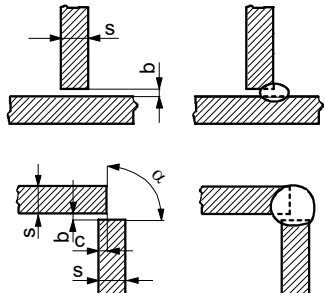
$$M = \rho \cdot V = \rho \cdot A_z \cdot l, g,$$

где су:

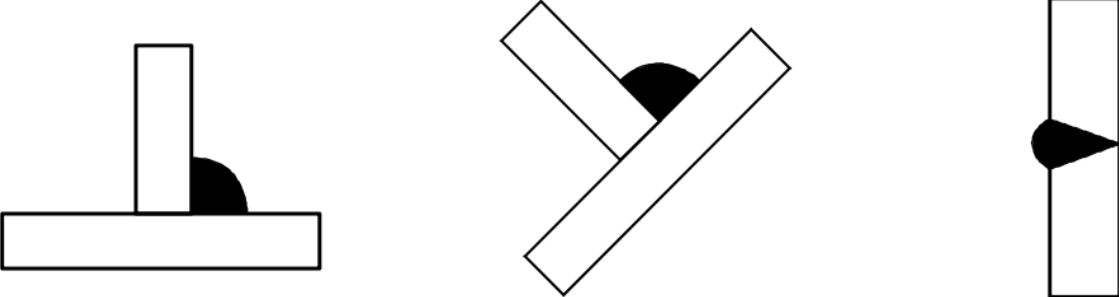
$$\rho = 7.85 \frac{g}{cm^3} - \text{густина електродне жице и}$$

$$V = A_z \cdot l - \text{јединична запремина завара на дужини од } 1\text{ cm}.$$

Табела 5.4 Припрема страница за заваривање у заштити CO_2

Врста шав	Пречник пресека шлеба и шав	Димензије жлеба				
		s	α	b	c	r
		mm	°	mm		
Рубни шав		≤ 2		≤ 0.5	s+1	$s \div 1.5s$
I-шав		≤ 2		≤ 0.5		
		2÷3		≤ 0.8		
		3÷6		≤ 1		
Двострани I-шав		6÷12		1÷3		
V-шав		5÷20	30÷50	≤ 2	1.5÷25	
½ V-шав		3÷16	40÷55	≤ 2	1.5÷25	
Угаони шав		>1		≤ 2		
		1÷4	90	≤ 2	≤ 2	
		>4	60÷90	≤ 2	≤ 2	

Табела 5.5 Гранични пресеци појединих завара

Врста споја	Врста завара	Допуштени пресек завара у mm^2 за:			
		Положај “а” за пречник жице:			
		d= 1.2 mm		d= 1.6 mm	
Сучеои	Корени завара	11.0		11.0	
	Завари испуне	6.25÷64.0		15.0÷64.0	
	Покривни завар	15.0÷64.0		15.0÷64.0	
Угаони	Завари попуње	Положај “а”		Положај “б”	
		d= 1.2 mm	d= 1.6 mm	d= 1.2 mm	d= 1.6 mm
		6.25÷64.0	15.0÷36.0	6.25÷36.0	15.0÷36.0
	Покривни завар	15.0÷64.0	15.0÷64.0	15.0÷36.0	15.0÷36.0
Према JUS CH3.011/82 разликују се а) хоризонталан б) коритаст в) хоризонтално-вертикалан					
					

Табела 5.6 Избор пречника електродне жице – сучеои спој

s, mm	≤2	2÷20	10÷30
d, mm	0.8	1.2	1.6

Табела 5.7 Избор пречника електродне жице – угаони спој

a, mm	2	3	>3
d, mm	1.2	1.2	1.6

Количина претопљене електродне жице у јединици времена израчунава се према следећим емпиријским изразима:

$$m_{1.2} = 0.64 + 0.11 \cdot M + 0.14 \cdot M^2, \text{ (за жицу } d=1,2 \text{ mm)}$$

$$m_{1.6} = 0.64 + 0.55 \cdot M - 0.055 \cdot M^2, \text{ (за жицу } d=1,6 \text{ mm)}$$

Лимови дебљине до 4 mm заварују се без припреме ивица у хоризонталном положају (до 3 mm у осталим положајима), док се за лимове веће дебљине израђују V, X и K – жлебови. Углови отвора жлеба су 40÷50°, а зазор између лимова 0÷2.5 mm.

Брзина заваривања и брзина топљења електродне жице може се израчунати преко претходно усвојене и израчунате величине.

Брзина заваривања рачуна се по изразу:

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

где су:

m- маса депонованог метала у g/s,

A_z - површина зава у mm^2 и

ρ - густина додатног материјала у g/cm^3 .

Брзина топљења електродне жице ($v_t = 1.2 \div 25 \frac{m}{min}$) рачуна се по изразу:

$$v_t = \frac{0.012732 \cdot A_z \cdot v_z}{d^2}, \frac{m}{min}.$$

Број пролаза може се одредити на два начина

- према искуственим подацима за различите дебљине лима (таб. 5.8)

Табела 5.8 Зависност броја пролаза од дебљине

s, mm	4÷8	6÷8	8÷15	15÷20	20÷30
n	2	3	6	8	12

- на основу површине попречног пресека жлеба (A) и зава (A_z):

$$n = \frac{A}{A_z},$$

где је $A_z = 0.0625 \div 0.64 \text{ cm}^2$ зависно од пречника жице, врсте жлеба и др. (таб. 5.5).

Најзад се израчунавају енергетски параметри заваривања у заштити гаса CO₂:

- јачина струје за електродну жицу пречника d=1.2 mm,
- јачина струје за електродну жицу пречника d=1.6 mm и
- радни напон електричног лука.

Јачина струје заваривања (I_{1.2} и I_{1.6}) за пречнике жице d=1.2 и d=1.6 mm рачуна се према следећим изразима:

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

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

Напон заваривања (радни напон):

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

Код сучеоних спојева усвајају се различити пресеци коренског завара, завара испуне и покривног завара, али тако да збир њихових попречних пресека буде нешто већи од површине попречног пресека одговарајућег жлеба.

CO₂ поступак се све више примењује, и у неким областима потискује гасно заваривање. У литератури се може наћи више различитих метода за одређивање основних параметара заваривања. Тако се према методи *W. Andersa* прорачун технолошких параметара заваривања у заштити CO₂ разликује од претходно изложеног у следећем:

Количина претопљене електродне жице у јединици времена (брзина топљења у g/s) израчунава се према изразу:

$$m = 2.5 \sqrt{\frac{A_z \cdot \rho}{500}}, g,$$

где је:

A_z - усвојени попречни пресек завара у mm^2 и

ρ - густина материјала у g/cm^3 .

Брзина заваривања рачуна се према изразу:

$$v_z = \frac{360 \cdot m}{A_z \cdot \rho}, \frac{m}{h}.$$

Брзина топљења електродне жице:

$$v_t = 649.1 \cdot \frac{m}{d^2}, \frac{m}{h},$$

где је d - пречник електродне жице у mm .

Јачина струје заваривања:

$$I = 236 \cdot m^{0.737}, A.$$

Напон заваривања (радни напон):

$$U = 26.6 \cdot m^{0.26}, V.$$

При прорачуну параметара заваривања по методи *W. Andersa* треба пажљиво изабрати површину попречног пресека завара $A_z=A_z$ (d , врсте завара, положаја заваривања, ...), прорачунати количину претопљене електродне жице m ($m_{max}=2.5$ g/s), јер сви остали параметри су директно зависни од ових величина.

На квалитет завареног споја утичу, поред поменутих параметара заваривања, још и дужина извученог (слободног) дела електродне жице, положај жичане електроде (пиштоља за заваривање) у односу на раван споја, удаљеност млазнице за гас од површине радног предмета, врста заштитног гаса и његова потрошња, поларитет жичане електроде, положај заваривања, променљиви индуктивитет и тсл. [3].

У табели 5.9 и 5.10 дате су препоруке за избор режима заваривања нискоугљеничних и нисколегираних конструкционих челика.

Табела 5.9 Режими полуаутоматског и аутоматског заваривања сучеоних спојева у заштитном гасу CO_2

Дебљина материјала	Зазор	Број пролаза	Пречник електродне жице	Струја заваривања	Напон лука	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÷5	1.6÷2.0	1÷2	1.6÷2.0	180÷200	28÷30	20÷22	14÷16
6÷8	1.8÷2.2	1÷2	2.0	250÷300	28÷30	18÷22	16÷18
8÷12	1.8÷2.2	2÷3	2.0	250÷300	28÷30	16÷20	18÷20

Табела 5.10 Режими полуаутоматског и аутоматског заваривања угаоних шавова у заштитном гасу CO_2

Дебљина материјала	Преч. ел. жице	Катета шав	Број пролаза	Струја заварив.	Напон	Брзина заварив.	Слобод. део ел. жице	Проток гаса
mm	mm	mm	-	A	V	m/h	mm	l/min
1.0÷1.3	0.5	1.0÷1.2	1	50÷60	18÷20	18÷20	8÷10	5÷6
1.0÷1.3	0.6	1.2÷2.0	1	60÷70	18÷20	18÷20	8÷10	5÷6
1.5÷2.0	0.8	1.2÷2.0	1	60÷75	18÷20	16÷18	8÷10	6÷8
1.5÷2.0	0.8	1.5÷3	1	70÷110	18÷20	16÷18	8÷10	6÷8
1.5÷3.0	1.2	2÷3	1	90÷130	20÷22	14÷16	10÷12	8÷10
3÷4	1.2	3÷4	1	120÷150	20÷22	16÷18	10÷12	8÷10
3÷4	1.6	3÷4	1	150÷180	28÷30	20÷22	16÷18	12÷14
5÷6	1.6	5÷6	1	230÷260	28÷30	26÷28	16÷18	16÷18
5÷6	2.0	5÷6	1	260÷300	28÷30	29÷31	20÷24	16÷18
7÷9	2.0	7÷9	1	300÷350	30÷32	20÷22	20÷24	18÷20
9÷11	2.0	9÷11	2	300÷350	30÷32	24÷26	20÷24	18÷20
11÷13	2.0	11÷13	3	300÷350	30÷32	24÷26	20÷24	18÷20
13÷15	2.0	13÷15	4	300÷350	30÷32	24÷26	20÷24	18÷20

5.2.2 Технолошки параметри МИГ- заваривања

МИГ поступак је сличан МАГ-у, с тим што се користи други заштитни гас - аргон или хелијум и нешто другачији пиштољ. Користи се најчешће код

легираних/нерђајућих челика и обојених метала и њихових легура дебљине до 20 *mm*, помоћу жице пречника 1-2.5 *mm*.

У заштити инертног гаса могу се заварити скоро све врсте нерђајућих челика. Примењују се сви начини преноса додатног материјала. За умањивање јачине струје, додаје се 3-5% кисеоника или угљен-диоксида аргону. Заваривање се изводи једносмерном струјом обрнутог поларитета, полуаутотски или аутоматски. Неопходно је одабрати повољне режиме заваривања који смањују удео основног метала у шаву и бирати челике и додатне метале са минималним садржајем штетних примеса. Потребно је одржавати што краћи извучени - слободни део електродне жице и одабрати оптималну брзину заваривања и потрошњу заштитних гасова, све у циљу спречавања контакта ваздуха са истопљеним металом. МИГ поступак се препоручује за заваривање алуминијума и његових легура из следећих разлога:

- Није потребна употреба топитеља,
- Применом једносмерне струје, а везивањем радног предмета на минус пол долази до катодног чишћења оксидног слоја са површине основног метала,
- Заваривање се изводи релативно великом брзином,
- Зона утицаја топлоте је релативно мала, а такође и деформације,
- Није потребна дуга обука заваривача.

Углавном се успешно заварују материјали дебљине од 3 *mm* у свим положајима. Најчешће се употребљава електродна жица пречника 1.6 *mm*, а за материјале дебљине преко 8 *mm* треба применити још и предгревање. У табели 5.11 су дати оријентациони подаци за МИГ заваривање алуминијума.

Како при заваривању алуминијума и његових легура постоје одређене тешкоће, као и при заваривању других лаких легура, то се треба придржавати следећег:

- пре заваривања уклонити слојеве оксида са страница жлеба и осталих површина на минималном растојању 30÷40 *mm*. Пре наношења следећег слоја неопходно је очистити површину претходног слоја,
- чишћење изводити искључиво четком од нерђајућег челика или одговарајућим стругачем. На површинама радног комада не смеју се правити дубоки зарези, јер они могу бити жариште корозије,
- припоје изводити према прописаном редоследу и на одговарајућем растојању.

Пре увођења МИГ поступка заваривања легура алуминијума коришћени су окси-ацетиленски, РЕЛ и ТИГ поступци заваривања. Тешкоће везане за примену гасног и РЕЛ заваривања превазиђене су проналаском ТИГ поступка, али су остали проблеми тешко приступачних угаоних шавова и недовољно концентрисане топлоте за дебеле пресеке. Готово све су тешкоће превазиђене применом МИГ поступка, нарочито за извођење угаоних шавова који чине знатан део спојева у завареним конструкцијама [4].

Табела 5.11 Оријентациони подаци за МИГ заваривање алуминијума

Дебљина	Тип споја	Број пролаза	Струја заваривања			Пречник електроде	Брзина заварив.	Потрошња аргона			Напомена (температура предгревања)
			H ¹⁾	V ¹⁾	O ¹⁾			H ¹⁾	V ¹⁾	O ¹⁾	
mm	-	-	A			mm	m/min	l/min			
3	Сучеони	1	140	-	-	1.6	0.8÷1.0	13	-	-	-
	Преклопни	1	140	-	-	1.6	-	13	-	-	
	Угаони	1	140	-	-	1.6	-	13	-	-	
4	Сучеони	1	160÷180	150÷160	140÷150	1.6	0.7÷1.0	14	20	20	-
	Преклопни	1	160÷180	150÷160	150	1.6	-	14	20	20	
	Угаони	1	160÷180	150÷165	160	1.6	-	14	20	20	
5	Сучеони	1	200÷220	160÷180	150÷170	1.6	0.6÷0.9	15	20	20	-
	Преклопни	1	200÷220	160÷180	165	1.6	-	15	20	20	
	Угаони	1	200÷220	160÷180	165	1.6	-	15	20	20	
8	Сучеони	2	280÷300	200÷230	200÷220	2.4	0.7÷0.9	17	25	25	150÷180°C
	Преклопни	1	280÷320	220	220	2.4	-	17	25	25	
	Угаони	1	300÷320	220	220	2.4	-	17	25	25	
12	Сучеони	2	350÷380	240	240	2.4	0.5÷0.9	20	25	25	200÷220°C
	Преклопни	2	350÷380	240	240	2.4	-	20	25	25	
	Угаони	2	350÷380	240	240	2.4	-	20	25	25	
20	Сучеони	2÷3	370÷390	250	250	2.4	0.3÷0.4	20	25	25	250°C
	Преклопни	2÷3	380÷400	380÷400	240÷270	2.4	-	20	25	25	
	Угаони	2÷3	380÷400	380÷400	240÷270	2.4	-	20	25	25	

Магнезијум и његове легуре заварују се сличном технологијом као алуминијум и његове легуре.

Заварљиве легуре бакра су углавном месинг и бронза, као и чист дезоксидисани бакар. Угаони и сучеони спојеви се успешно заварују са преносом додатног материјала у млазу, а посебно са пулсирајућим преносом додатног материјала. Бакарни делови добијени до 5 mm заварују се после предгревања до 350°C, а са повећањем дебљине та температура мора да буде од 600 до 800°C коју треба одржавати константном, док траје заваривање.

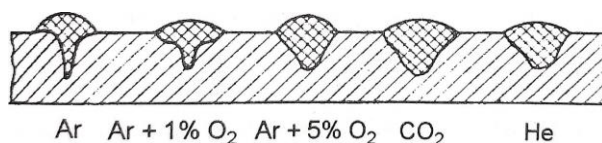
Чист никл и његове легуре заварују се обично на пресецима већим од 4 mm. Технологија заваривања никла и његових легура слична је оној којом се заварује високолегирани аустенитни корозивно отпорни челици. Најчешће се заваривање изводи са пулсирајућом струјом и краткоспојним преносом додатног материјала. Зона споја мора бити метално сјајна, очишћена од нечистоћа и оксидних скрама – механичким или хемијским средствима [3].

5.3 Технологија МАГ/МИГ заваривања пуним и пуњеним жицама

У заштити инертног или активног гаса заваривање топљивом електродном жицом је доста сложено, због динамичких појава које се одвијају у луку, као и у металној купки. Хемијски састав и физичке особине заштитног гаса имају велики утицај на особине лука, процес топљења жице, пренос капљица до купке, металургију заваривања, као и на формирање шави.

Специфичност заваривања топљивом електродном жицом јесте употреба струје велике густине и примена танких жица. Великом брзином се одвија пренос металних капљица, од врха електродне жице ка металној купки. Пренос капљица кроз лук може бити: појединачан-краткоспојни и у облику праволинијског низа раздвојених ситних капљица.

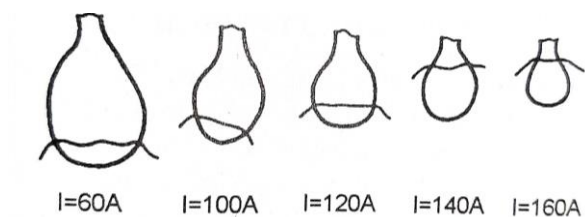
Узрок формирања малих појединачних капљица које се по правој линији преносе ка купки је пораст јачине струје изнад критичне (I_k). Код МАГ поступка, промена учесталости преласка и запремине капљица одвија се континуално, а код МИГ-а настаје скоковита промена како фреквенције транспорта, тако и запремине капљица. Врста заштитног гаса утиче на облик преноса, јер су потенцијали јонизације заштитних гасова различити: 15.7 V за аргон, 14.3 V за CO_2 и 24.5 V за хелијум. Одабран заштитни гас утиче на површински напон капљице, као и на температуру и облик лука. Утицај заштитног гаса на попречни пресек навара приказан је на слици 5.13 [4].



Слика 5.13 Утицај врсте заштитног гаса на попречни пресек навара при МИГ или МАГ заваривању [4]

Нестанак млазног преноса метала кроз лук захтева употребу аргона или мешавине богате аргоном. За електродну жицу пречника 1.2 mm критична јачина струје у аргонској мешавини креће се у границама 270-320 A, с тим што доња граница одговара већем уделу аргона у смеси. При употреби чистог CO_2 практично се не може постићи критична јачина струје потребна за млазни пренос.

Пренос капљица насталих топљењем позитивне електродне жице у заштити аргона, одвија се у правцу осе стуба лука. Велику улогу имају густина струје или величина критичне струје при МИГ процесу заваривања. Утицај јачине струје на облик и величину капљице дат је на слици 5.14.



Слика 5.14 Профили капљица и положај анодне мрље (место одвајања јона од електроде) при МИГ заваривању у аргону [4]

Анодна мрља се помера ка суженом делу капљице при већој густини струје, што олакшава њено одвајање. После кидања, капљица добија убрзање сразмерно јачини струје. У случају преласка на режим заваривања са надкритичном јачином струје, врх електроде више неће бити лоптастог облика, већ постаје коничан за углом при врху око 40-45°.

5.3.1 Металургија МИГ заваривања

Данас се заваривање топљивом електродном жицом у заштити инертног гаса (аргон, хелијум) употребљава за алуминијум, бакар и њихове легуре, а у случају челика ограничава се само на неке високолегирание челике. За заваривање неумирених угљеничних челика МИГ се не препоручује због склоности ка образовању гасних мехурова у шаву. У техничкој литератури нема задовољавајућег објашњења те порозности. Претпоставља се да је главни узрок томе дезоксидација (угљеником) оксида гвожђа садржаних у неумиреним челицима. Појава мехурова доприноси такође растварање азота и водоника који су примесе заштитног аргона.

5.3.2 Металургија МАГ заваривања

Заваривање МАГ-ом разликује се од МИГ-а по заштитном гасу. Основни активни гасови су CO_2 , O_2 , N_2 и H_2 који се разлажу на вема високим температурама (таб. 5.12). Од активних гасова главни је CO_2 који се употребљава самостално као заштитни гас при заваривању нискоугљеничних и нисколегираних челика.

Табела 5.12 Температура 90% не дисоцијације CO_2 и додатних гасова

Гас	Температура (90% дисоцијације), °C
CO_2	3527
H_2	4302
O_2	4827
N_2	8027

При МАГ заваривању у мешавини гасова, аргону се додаје највише до 30% CO_2 , чиме се поправља стабилност лука, смањује прштање и поправљају механичке особине завареног споја. Када се аргону дода CO_2 или O_2 , атмосфера лука постаје оксидишућа што смањује прштање и елиминише заједе настале "шетањем" лука по површини купке.

У случају заваривања челика у заштити ($\text{Ar} + \text{O}_2$), садржај кисеоника расте са 2 на 12% али то супротно очекивању доводи до смањења степена дисоцијације кисеоника (таб. 5.13) што значи да оксидациони потенцијал није функција концентрације O_2 већ O . У смеси степен дисоцијације расте ако је мање O_2 у мешавини.

Продукти оксидације настали за време заваривања, делимично одлазе у околину, као дим и заваривачка прашина, а делимично образују троску на површини купке, док део може остати заробљен у шаву у виду штетних неметалних укључака.

Табела 5.13 Степен дисоцијације кисеоника у заваривачком луку при 2720°C, за разне смеше Ar + O₂

Састав гасне смеше	Парцијални притисак кисеоника			
	Атома pO	Молекула pO ₂	Однос pO/pO ₂	Степен дисоцијације кисеоника O ₂ ↔ 2O
98% Ar+2% O ₂	0.014	0.013	0.93	0.70
94% Ar+6% O ₂	0.025	0.048	1.92	0.42
92% Ar+8% O ₂	0.029	0.065	2.24	0.36
88% Ar+12% O ₂	0.036	0.102	2.28	0.30

Мешавина гасова за заштиту лука спрема се обично на бази аргона са додатком до 30% CO₂ или 1-12% O₂, или са оба гаса истовремено. Проблеме оксидационог деловања ових гасова на неке метале треба увек узети у обзир. Високоаргонска мешавина Ar + CO₂ мења облик стуба лука и врсту преноса капљица. Додатак CO₂ аргону побољшава формирање и облик шава; уваривање постаје дубље, равномерније и заокружено у основи, а надвишење шава је веома испупчено. С обзиром на пораст запремине мешавине гасова због дисоцијације CO₂ постиже се боље покривање металне купке заштитним гасом, што спречава порозност.

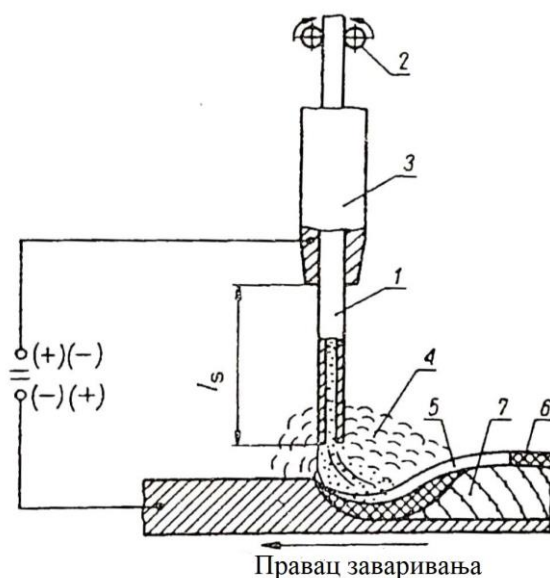
У високоаргонској мешавини, додатак O₂ доводи до смањења критичне јачине струје при којој се мења карактер преноса метала од крупних капљица на ситне капи, побољшава се формирање зава, смањује се порозност и прштање и расте продуктивност заваривања. Смањење порозности метала шава је резултат образовања веома течљиве купке (опада површински напон метала, а расте температура метала купке), што омогућава заваривање дебелих лимова у хоризонталном положају, а код вишеслојних шавова осигурава лако излажење гасова [4].

5.3.3 Металургија МАГ заваривања пуњеним жицама

Код свих начина заштите лука помоћу активних и инертних гасова, најбољи резултати постижу се ако се употреби електродна жица пуњена прашком. Прашак за образовање троске смештен је у танкозидне цевчице од меког челика, док се CO₂ може довести исто као и код заваривања пуном жицом. Прашкasto језгро садржи састојке који образују троску и заштитне гасове, затим дезоксидаторе (Mn, Si, Al, Ti) и елементе за лакшу јонизацију лука. У овом процесу купка се штити од приступа ваздуха, не само помоћу CO₂ доведеног из боце, већ и додатно гасовима насталим разлагањем или испаравањем дела састојака из језгра жице.

МАГ заваривање пуњеним жицама изводи се на два начина:

- као процес заваривања у заштити гасова CO₂, Ar + CO₂ или Ar и
- као процес самозаштитног заваривања (сл. 5.15).



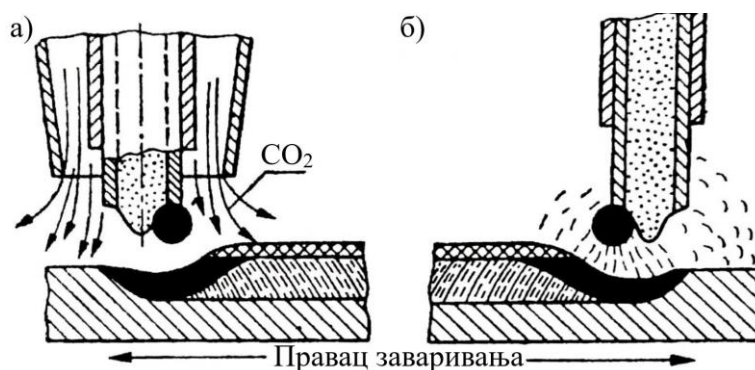
Слика 5.15 Шема самозаштитног МАГ заваривања; 1- електродна жица, 2- давач жице, 3- контактна вођица, 4- гасна заштита, 5- течна троска, 6- очврсла троска, 7- шав, l_s - слободан крај електродне жице [4]

Језгра пуњених жица имају исту улогу као облоге електрода код ручног електролучног заваривања, с тим што је количина прашка у језгру релативно мала те нема могућност њеног већег утицаја на металуршке процесе. Електродне жице са прашкастим језгром углавном се израђују од траке нискоугљеничног челика за дубоко извлачење, било савијањем и притискивањем или електроотпорским односно индукционим заваривањем. Основни чиниоци од којих зависи резултат заваривања пуњеним жицама јесу:

- Састојци садржани у прашкастом језгру,
- Елементи садржани у челичној кошуљници жице,
- Хемијски састав основног метала,
- Заштитна атмосфера шава (CO_2 или Ar/CO_2).

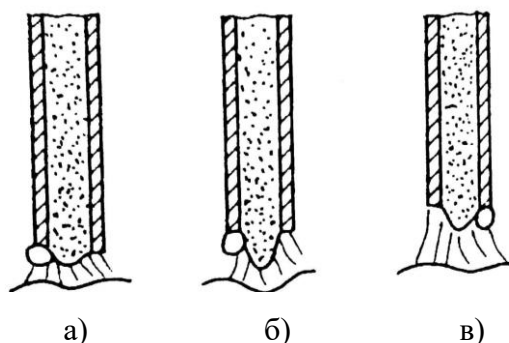
Главни састојци језгра су: једињења Si, Mn, Al, Ti, Zr која служе да вежу кисеоник и азот у оксиде и нитриде који прелазе у троску. Легирајући елементи углавном су: Ni, V, Cr, Co, Mn и Si који служе за повећање јачине, тврдоће, корозивне отпорности, ватропостојаности и отпорности на пузање. Жице са пуњеним језгром могу бити: базичне нисководоничне (0-4 ml водоника/100 g чистог метала шава), рутилно- базичне (1-6 ml/100 g), рутилне (5-15 ml/100 g), као и пуњене металним прахом са степеном депоновања блиском пуним жицама (95%). Стандардизовани пречници пуњених жица су: 1.2; 1.6; 2.0; 2.4; 3.0; 3.2 mm [4].

Шематски приказ процеса одржавања лука и топљења електродне жице, за случај додатне гасне заштите и самозаштите дат је на слици 5.16.



Слика 5.16 Топљење пуњене електродне жице: а) у заштити CO_2 , б) без заштите [4]

Прашкасто језгро електродне жице топи се на рачун топлоте зрачења лука и преноса топлоте конвекцијом из растопљене капљице, као и кондукцијом од загрејаних гасова. Од хемијског састава, топљивости и гранулације прашка углавном зависи равномерност топљења пуњених жица. Такође на топљење утичу и енергетски параметри заваривања. Повећање јачине струје доводи до бржег топљења цевчице, док повећање напона лука “заоштрава” врх језгра (сл. 5.18).



Слика 5.17 Топљење електродне жице: а) мала струја и низак напон, б) велика јачина струје и в) висок напон лука [4]

При заваривању пуњених жица најбољи услови добијају се при дужини слободног краја електродне жице од $l_s = (10-15) \cdot d$. Са додатним протоком CO_2 из боце при заваривању пуњених жица, остварује се потпуна заштита растопљеног метала капљице и купке. При употреби самозащитних жица, да би заштита била довољна, језгро мора имати већи садржај састојака који образују гасове, па је заваривање праћено већим димљењем и прашином. Садржај кисеоника у чистом металу шави може се смањити увођењем дезоксидатора у језгро, али смањењем садржаја азота. Ефикасност самозащитних електродних жица процењује се на основу садржаја азота у чистом металу шави. Мањи садржај азота и мања склоност ка обарзовању нитрида у шаву, постиже се снижавањем напона лука. Код самозащитних електродних жица пренос капљица се одвија на другачији начин него код пуних жица. На доњем крају облоге електроде остаје неистопљени језичак који усмерава гасове ка купки где су они најпотребнији.

Пуњене жице опште намене треба да испуне следеће захтеве:

- смање порозност шави,
- омогуће заваривање у принудним положајима и
- да метал шави и ЗУТ имају добра својства пластичности.

Нема потребе да се скупе пуњене жице употребљавају за заваривање нискоугљеничних и нисколегираних челика у радионичким условима, већ углавном за процесе репаратурних наваривања и извођење монтажних радова у теренским условима [4].

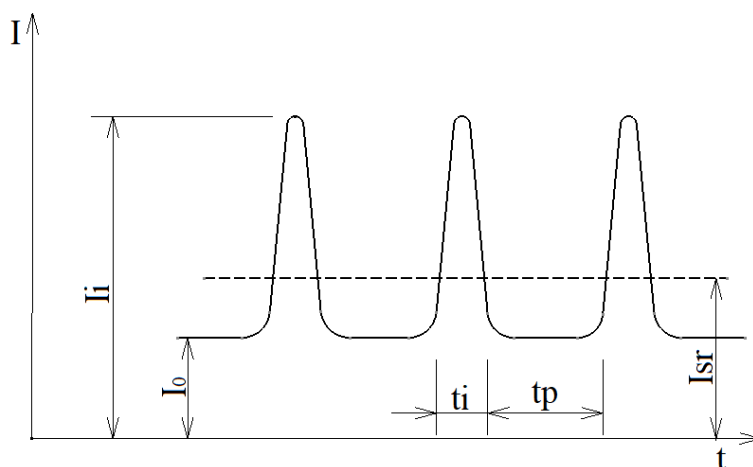
5.3.4 Технологија МАГ/МИГ заваривања пулсирајућим луком

Када струја надмаши критичну вредност, транспорт течног метала одвијаће се у млазу, али се притом нарушава стабилност лука. Стабилност процеса се може одржати ако се оствари принудни пренос метала кроз лук, што се при МАГ заваривању постиже помоћу пулсирајуће струје. Течан метал на врху електродне жице изложен је деловању разних сила, од којих су најважније:

- Силе површинског напона,
- Електромагнетене силе,
- Силе земљине теже,
- Хидродинамичке силе и др.

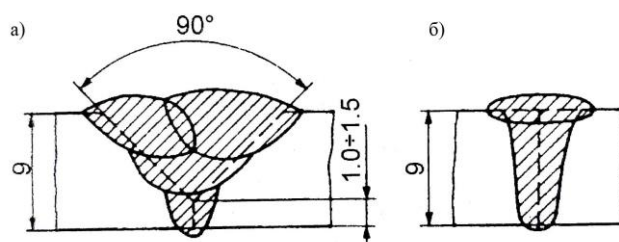
Повећање густине струје у луку, изнад одређене границе, доводи до промене начина преноса капи метала кроз лук. Код заваривања танких лимова јачина струје се ограничава да би се смањио унос топлоте и добио правилан шав. За заваривање танких конструкционих елемената, мора се користити електродна жица веома малог пречника. Код шавова изведених веома танким жицама тешко је постићи висок квалитет, јер велика густина струје и нестабилан лук изазивају прштање и грешке у шавовима. Једино решење овог проблема био би да се повећа густина струје, али само у тренутку када метална капљица прелази у заваривачку купку. Ову могућност пружају савремени извори за МИГ и МАГ заваривање који дају пулсирајућу струју (сл. 5.18).

Заваривање пулсирајућом струјом заснива се на напајању лука променљивом јачином струје на два различита нивоа I_0 и I_i према слици 5.18. Основна компонента струје I_0 мања је од критичне, али је довољна за стапање страница жлеба и врха електродне жице. Додатна импулсна струја, јачине веће од критичне ($I_i > I_{kr}$), омогућава да се оствари млазни пренос капљица кроз лук [4].



Слика 5.18 Струјна карактеристика процеса МАГ/МИГ заваривања импулсним луком:
 I_i - импулсна струја, I_0 - основна струја, t_i - време трајања импулса, t_p - време трајања основне струје [4]

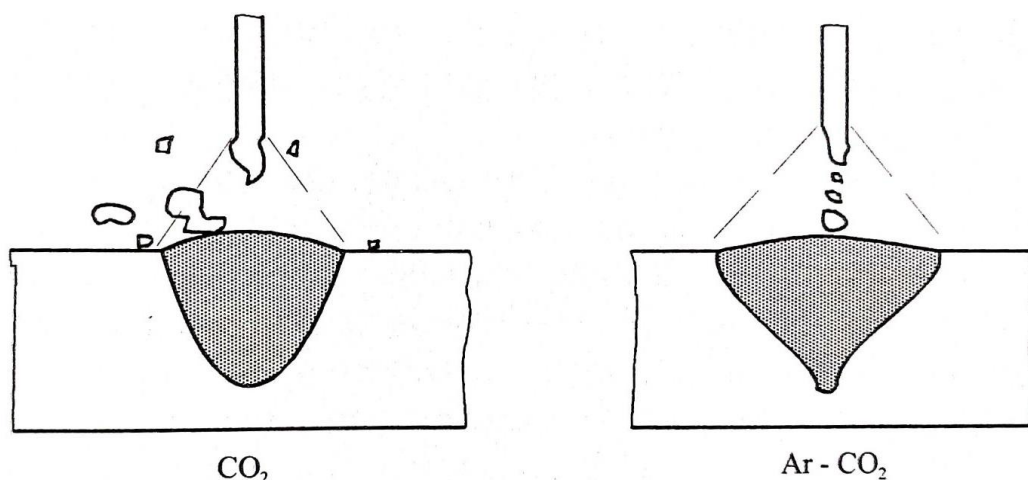
Количина топлоте одведена у завариване делове импулсним луком за 20-30% мања је него обичним луком. Мања количина топлоте предата основном металу смањује ширину ЗУТ-а, умањује заваривачке деформације и напоне, а повећава степен искоришћења топлоте.



Слика 5.19 Облик пресека шави изведеног МИГ варијантама на нерђајућем челику дебљине 9 мм: а) обичним луком, б) пулсирајућим луком [4]

Ако се густина основне струје повећа изнад критичне вредности, додатна импулсна струја изазива већу концентрацију топлотне енергије у уској зони лука и повећава кинетичку енергију капљица транспортованих кроз лук. То повећава дубину уваривања и омогућава да се дебели пресеци заварују без закошавања страница (сл. 5.19б). Као заштитни гас најбољи је аргон или мешавина богата аргоном са додатком CO_2 или O_2 , док чист CO_2 треба избегавати.

Заваривање у заштити гасова топљивом електродном жицом, поступцима МИГ/МАГ, треба истаћи да међу њима велике разлике, јер су извори струје и поларитет исти, а у додатним жицама разлике су незнатне. Који ће се заштитни гас користити условљено је металуршким факторима и потребом да се контролише прштање и облик шави (сл. 5.20). Чист аргон се користи при заваривању нежелезних метала (легури алуминијума, бакра и његових легура) и легура никла, мешавина Ar-CO_2 за угљеничне и нисколегирани челике ($\text{Ar-5\% CO}_2$ за тање пресеке и $\text{Ar-20\% CO}_2$ за дебље пресеке), а аргон са додатком 1÷5% O_2 за нерђајуће челике [4].



Слика 5.20 Утицај заштитног гаса на пренос метала, прштање и пенетрацију [4]

6. Примена МАГ/МИГ заваривања

Као што је напред детаљно описано наведени методи заваривања (МАГ/МИГ) налазе широку примену у индустријским условима при заваривању угљеничних челика, нисколегираних челика, конструкционих челика повишене јачине, панцирних челика, као и обојених метала и њихових легура.

У овој тачки рада даће се краћа технологија заваривања једне класе челика повишене јачине (Weldox 700-S690QL). Реч је о условно заварљивом челику, па се технологија заваривања мора брижљиво одабрати. По правилу најпре се спроводе моделска испитивања да би се утврдила најповољнија технологија заваривања, која се затим "преноси" на реалне спојеве заварених конструкција [16].

6.1 Избор технологије заваривања челика класе Weldox 700

1. Додатни материјал

Коренски пролаз: MIG 18/8/6 Si – Електроде Јесенице;

Покривни пролаз: MIG 75 – Електроде Јесенице;

2. Термичка обрада

- Предгревање: $T_{\text{pmin}} = 18-25^{\circ}\text{C}$ (до $T_{\text{pmax}} = 100^{\circ}\text{C}$);
- Међуслојна (међупролазна) температура: $T_{\text{interpass}} = 200-225^{\circ}\text{C}$ (max);
- Накнадно отпуштање извести до max 200°C (само за еквивалентну дебљину већу од 30 mm);
- Време прогревања: 2-5 min/mm дебљине зида (споро загревање и хлађење);

Спојеве после заваривања/загревања прекрити изолационим материјалом у циљу смањења брзине хлађења.

3. Комбиновано заваривање у заштити гасова

Табела 3.1 МИГ заваривање (коренски пролаз) – оријентациони параметри

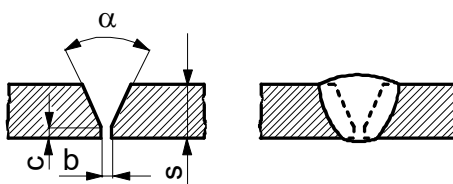
Основни материјал	Weldox 700 - дебљина 5 mm
Додатни материјал	MIG 18/8/6 Si – Електроде Јесенице - пречник пуне електродне жице $\varnothing 1.0\text{ mm}$
Струја заваривања	$I \approx 180-200\text{ A}$ (E+)
Радни напон	$U \approx 23-24\text{ V}$
Брзина заваривања	$v_z \approx 50\text{ cm/min}$
Погонска енергија заваривања	$\approx 4000\text{ J/cm}$
Број пролаза	$n = 1$
Дубина уваривања	$\approx 1.0\text{ mm}$
Заштитини гас	$\approx 100\% \text{ Ar}$
Проток заштитног гаса	$(Q_{\text{gasa}} \approx 15-20\text{ l/min})$

Табела 3.2 МАГ заваривање (покривни завар) – оријентациони параметри

Основни материјал	Weldox 700 - дебљина 5 mm
Додатни материјал	MIG 75 – Електроде Јесенице - пречник пуне електродне жице $\varnothing 1.2\text{ mm}$
Струја заваривања	$I \approx 240-250\text{ A (E+)}$
Радни напон	$U \approx 25\text{ V}$
Брзина заваривања	$v_z \approx 35\text{ cm/min}$
Погонска енергија заваривања	$\approx 9000\text{ J/cm}$
Број покривних пролаза	$n = 1$
Дубина уваривања	$\approx 1.5\text{ mm}$
Заштитини гас	M21 - 82% Ar + 18% CO ₂
Проток заштитног гаса	$(q_{\text{gasa}} \approx 12-16\text{ l/min})$

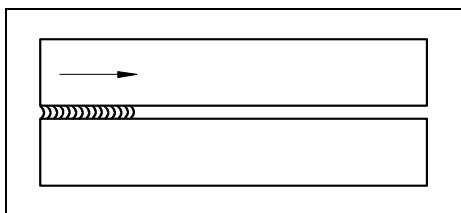
4. Важне напомене

1. Заваривати у V-жлебу са зазором/затупљењем од $b=c= 1.0-1.5\text{ mm}$ и $\alpha= 50^\circ$;

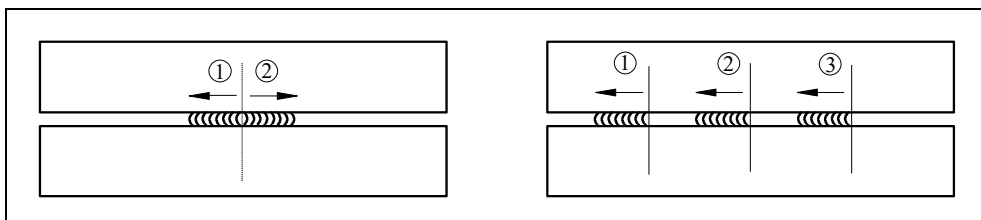


2. Најпре треба пажљиво извести припојне шавове истим поступком, као и коренски пролаз (МАГ-ом) дужине 10-20 mm;
3. После наношења припоја исте треба с лица незнатно пребрусити – обити обавезно стакласту троску;
4. Водити рачуна да се у припојима не појаве грешке типа прслина;
5. Ако се контролом уоче прслине у припојима, у том случају утврдити узрок њиховог настајања и потпуно их пребрусити;
6. По правилу ова класа челика дебљине зида од 5 mm при заваривању МАГ поступком се не предгрева, али радна температура не сме бити нижа од ($T_{\text{pmin}} = 18-25^\circ\text{C}$);
7. Странице жлеба треба да буду потпуно суве и чисте;
8. У току самог заваривања треба одржавати и контролисати препоручену међуслојну (interpass) температуру;
9. Забрањује се успостављање ("паљење") лука на основном материјалу - ван споја, осим при извођењу припојних и почетних завара;
10. Вишепролазно заваривање извести тако да се почетак и завршетак гусенице у горњем пролазу/слоју не поклопи са почетком и крајем гусенице у доњем слоју/пролазу;
11. Коренски завар или слој, пре полагања наредног, треба детаљно и пажљиво очистити од троске и оксидисаног метала; ако се запазе веће неравнине треба га пребрусити;

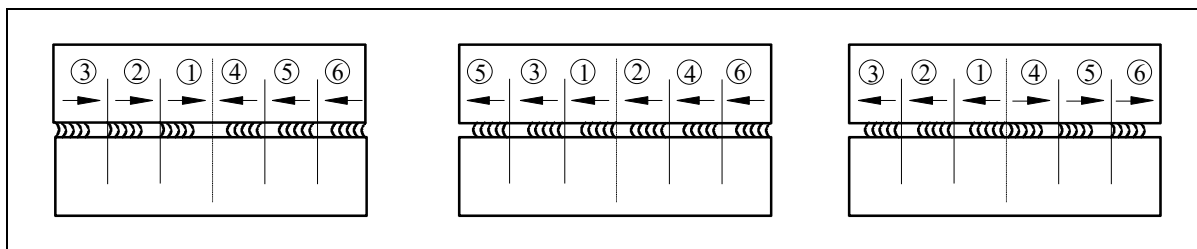
12. После наношења коренског зава, обити стакласту троску и нанети покривни завар;
13. Надвишење лица шава треба да буде $\approx 1-1.2 \text{ mm}$; прелаз мора бити постепен и благ према основном материјалу;
14. Оптимална брзина заваривања утврђује се пробним заваривањем, у циљу остваривања траженог уноса топлоте, дубине уваривања, надвишења и међупролазне (*interpass*) температуре (како при извођењу коренског, тако и при наношењу покривног зава);
15. Кратки шавови дужине до 300 mm изводе се непрекидно од почетка до краја споја;



16. Средњи шавови, дужине 300 до 1000 mm израђују од средине према крајевима, или у деловима 100 до 350 mm ;



17. Дугачки шавови, дужине веће од 1000 mm израђују се у деловима по 100 до 350 mm повратно-степенастом методом чије су варијанте приказане на следећој слици:



18. Заварени спојеви изложени променљивом оптерећењу имају знатно мању динамичку издржљивост него основни материјал. То је последица структурне нехомогености и геометријског облика; тај је утицај више изражен код челика повишене и велике јачине него код нискоугљеничних челика;
19. Сви дефекти и ефекти зареза, као нпр. заједи, непровар, унутрашње грешке, укључци троске, ваздушни мехурови, микропрслине доводе до знатног пада заморне издржљивости;
20. Коефицијент дејства зареза виши је за спојеве које карактерише прекидан ток линија сила, те се стога увек за динамички оптерећене делове препоручује механичка обрада споја-надвишење шава (само у договору са конструктором и технологом);
21. У овом случају то значи да се механички мора обрадити лице изведеног сучеоног споја ради отклањања надвишења (само у договору са конструктором и технологом);
22. Овај вид механичке обраде неопходан је за делове који преносе затежуће силе, као и

- за делове изложене савијању (само у договору са конструктором и технологом);
23. Завршна механичка обрада изводи се помоћу брусница са еластичним ваљком на коме је намотан брусни папир (само у договору са конструктором и технологом);
24. Треба имати у виду да су додатне мере при заваривању независне од основних параметара заваривања;

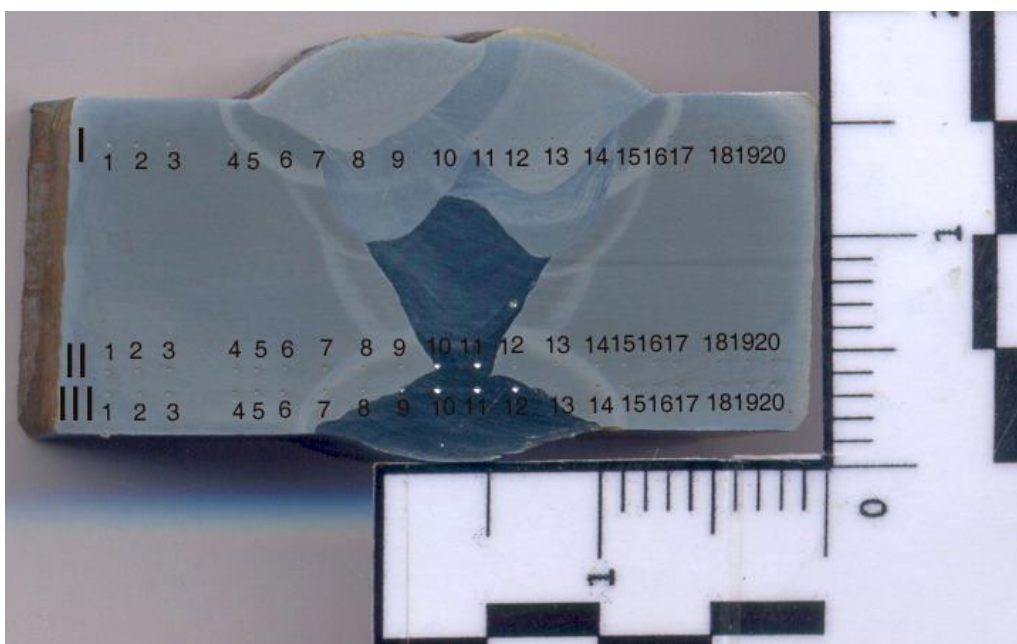
На квалитет завареног споја делују и следећи *веома утицајни фактори*:

- Квалификација заваривача и персонала стручног надзора; заваривање обавезно изводе *атестирани заваривачи* уз сталну контролу и надзор специјалиста и технолога заваривања;
- Опремљеност радионице осталим неопходним условима (изолирано радно место без варирања напона у електричној мрежи, као и промаје, вибрација, буке, прашине, ниских температура, превелике влажности,);
- Опремљеност радионице одговарајућом заваривачком опремом: потребан број апарата за заваривање - РЕЛ (мин. 2 инвертора) и МАГ/МИГ (мин. 2 апарата новије генерације), опрема за гасно-пламено заваривање (мин. 1 гарнитура), потребна пећ за сушење електрода, уређаји за мерење температуре – стално и повремено (термопарови и термокреде), остала помоћна опрема (заштитне маске и кациге, заштитна одела и кецеље, помоћни машински и ручни алати, челичне четке и чекићи, ...);
- Квалитет и стање додатног материјала (чисте и незамашћене жице);
- Стање, врста и квалитет заштитног гаса;
- Прецизна контрола облика и димензија жлебова и спојева;
- Доследна примена прописане технологије заваривања;
- Коначну технологију заваривања усвојити тек после пробних заваривања на узорцима-моделима.

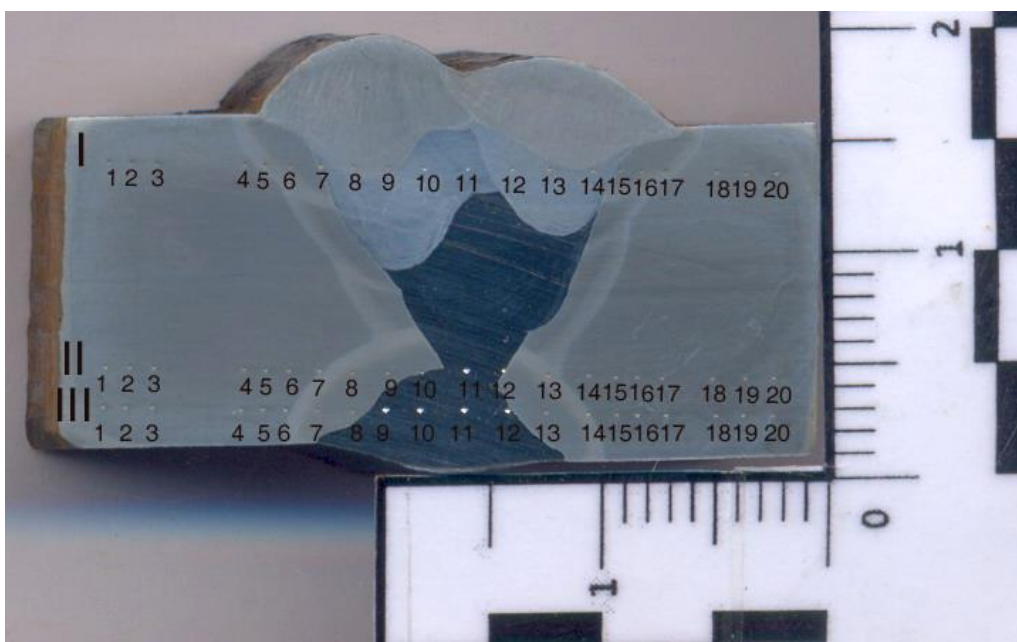
За ову врсту одговорних спојева обавезна је контрола: претходна, текућа и завршна. У претходну контролу спадају провера основног и додатног материјала, оцена стања заваривачке опреме, увид у оспособљеност заваривача и провера свих жлебова и спојева пре заваривања. У (процесну) текућу контролу треба сврстати следеће: проверити да ли се правилно употребљавају предвиђене електродне жице по врсти и пречнику, да ли је правилно одабран напон и поларитет струје, да ли се поштује редослед полагања појединих завара и одсецака. Завршна контрола обухвата: визуелну контролу (и са лупом), магнетни флуks, ултразвучну дефектоскопију, а ако технички услови то захтевају применити и радиографију (γ -графија) [16].

6.1.1 Моделска испитивања сучеоних спојева

Напред прописана технологија је проверавана на сучеоним спојевима већег пресека. Најпре се МИГ-ом наносе коренски пролази, а потом МАГ-ом завари испуне и покривни ззавари, уз предгревање пре заваривања на температури око 175°C. Из тако заварених плоча припремани су металографски избрусци/шлифови на којима је мерена тврдоћа и читавана/процењивана микроструктура појединих зона споја. На сликама 6.1 и 6.2 дати су макрографски снимци заварених спојева са измереним вредностима тврдоће појединих зона сучеоног споја у три карактеристична правца.

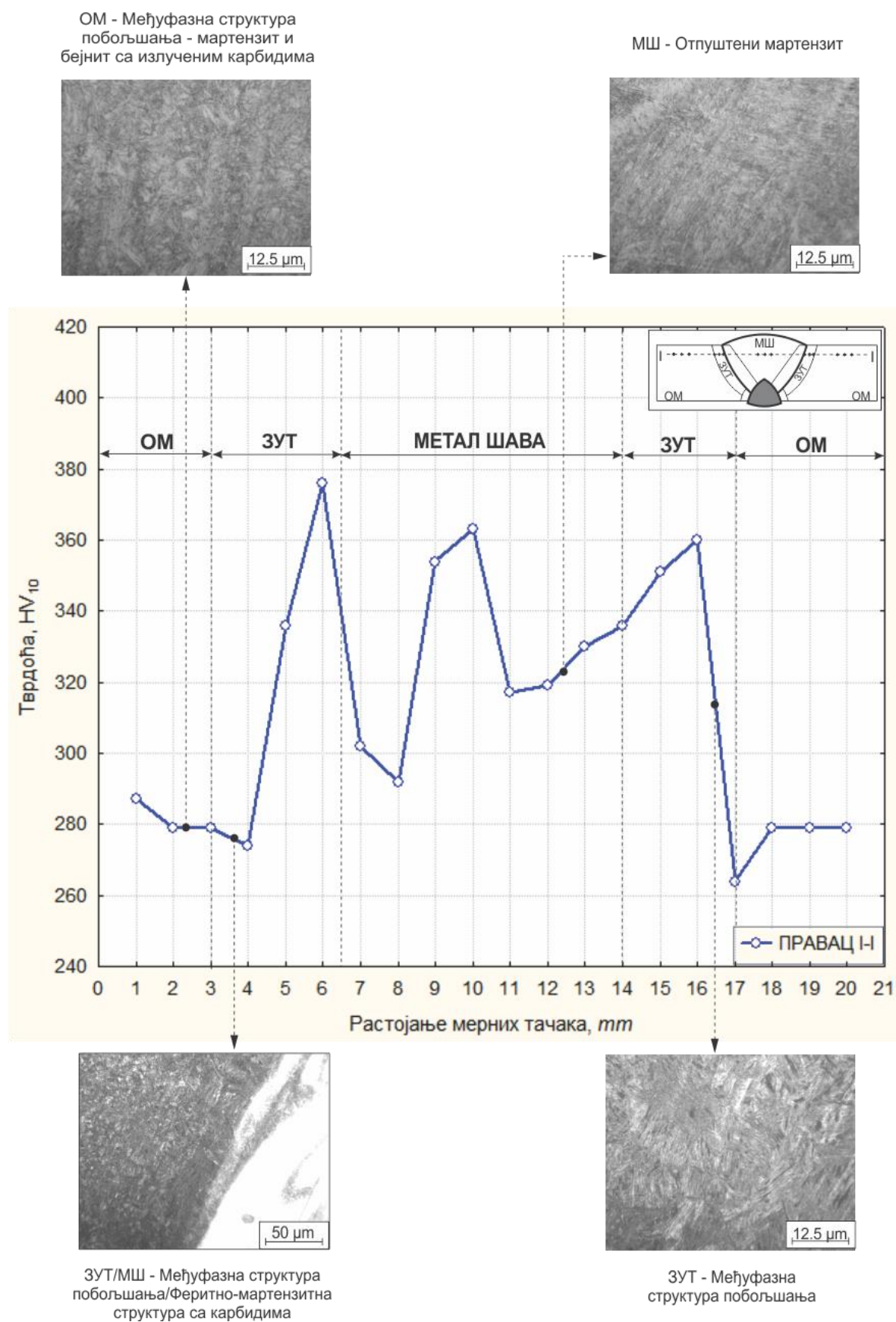


Слика 6.1 Макрографски узорак 3 – плоча 2: мерење тврдоће у 3 правца [16]

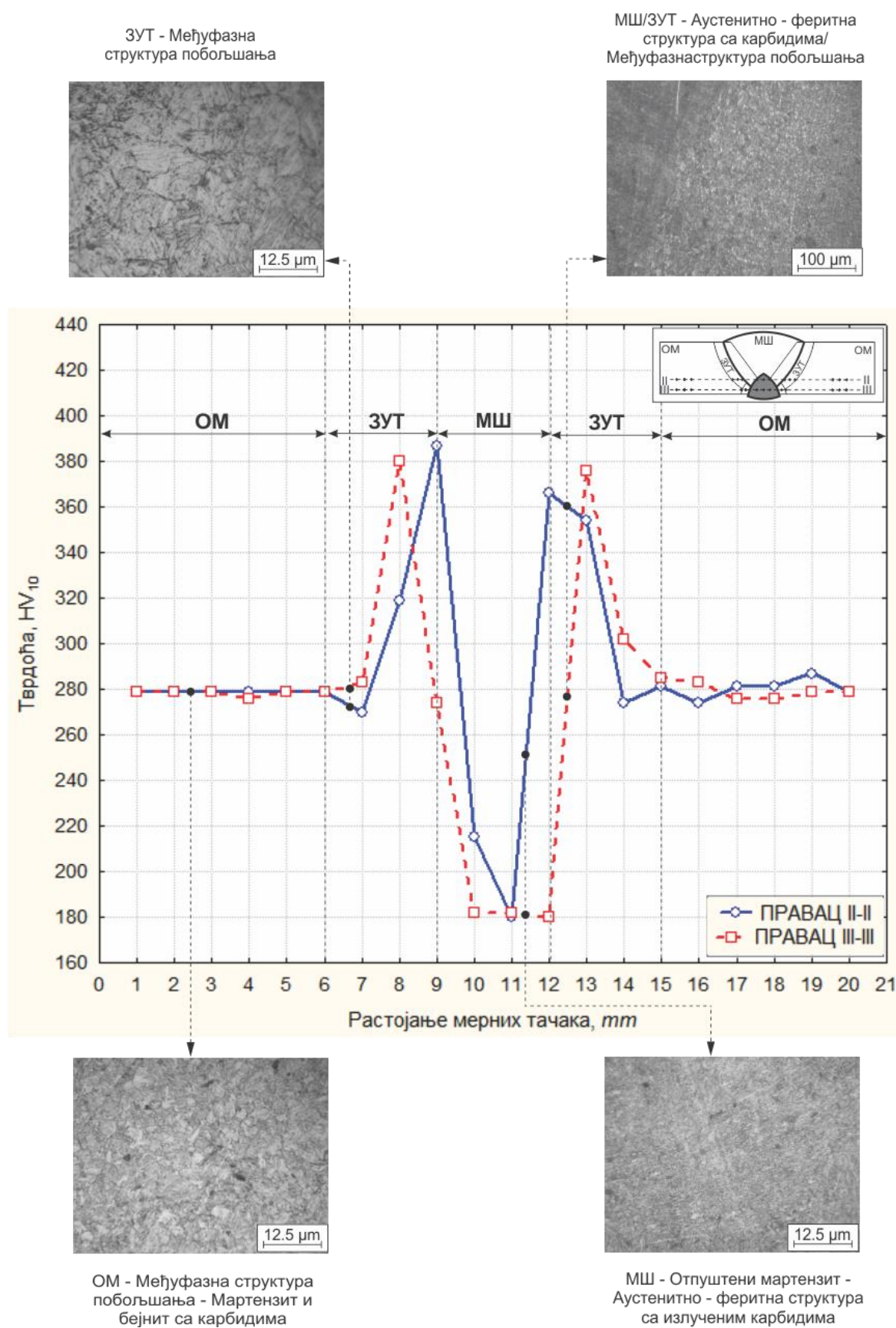


Слика 6.2 Макрографски узорак 4 – плоча 2: мерење тврдоће у 3 правца [16]

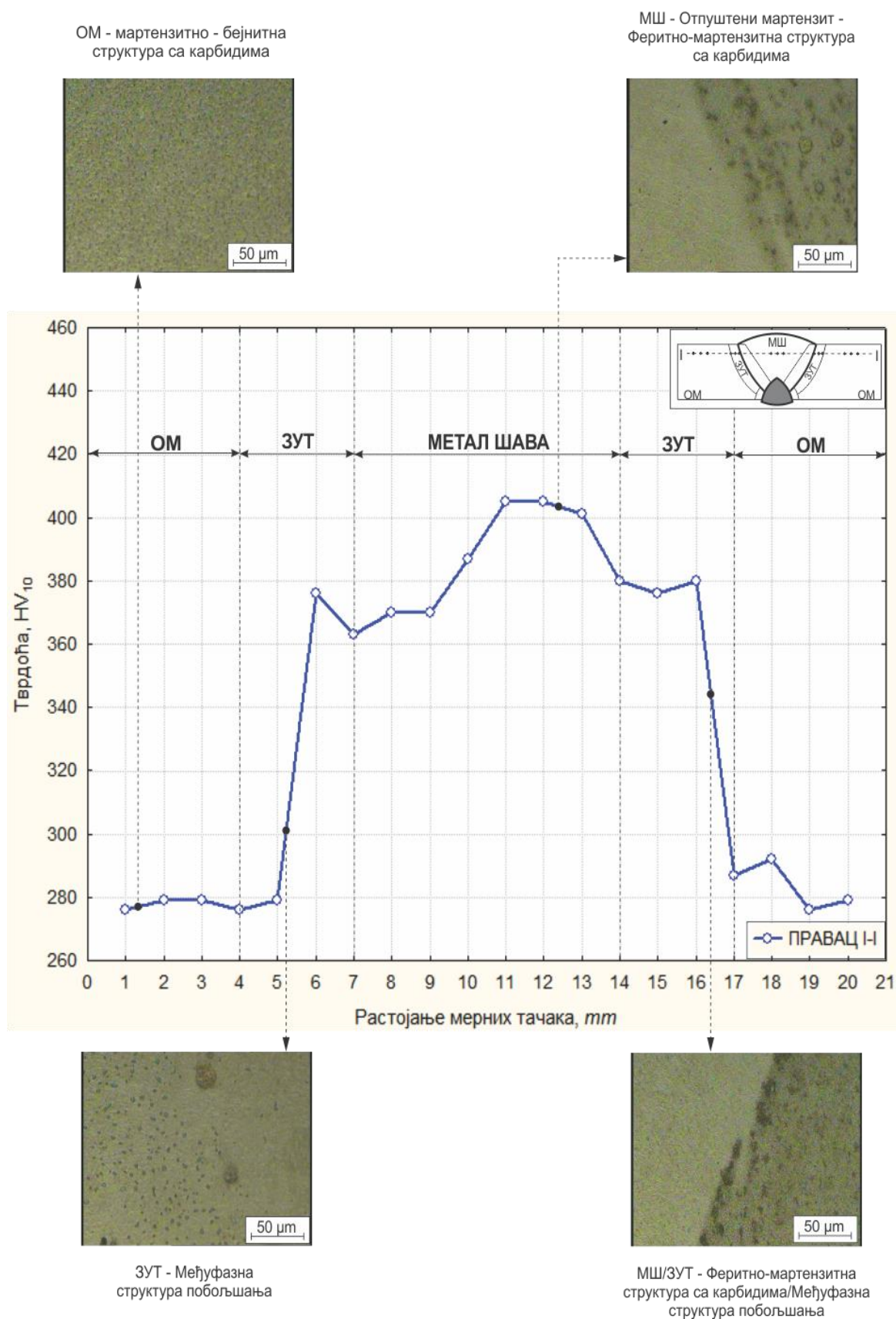
На сликама 6.3 до 6.6 дати су дијаграмски прикази расподеле тврдоће и микроструктуре карактеристичних зона завареног споја. Ако се анализирају резултати у најкритичној зони завареног споја – ЗУТ-у, може се закључити да су добијени условно повољни резултати у погледу тврдоће и микроструктуре. Резултати указују да је смањена опасност од настанка кртих фаза велике тврдоће и да је отклоњена опасност од настанка хладних прелина, ако се делови пре заваривања предгревају и користе суве и чисте жице (критеријум $HV_{\max} = 450$).



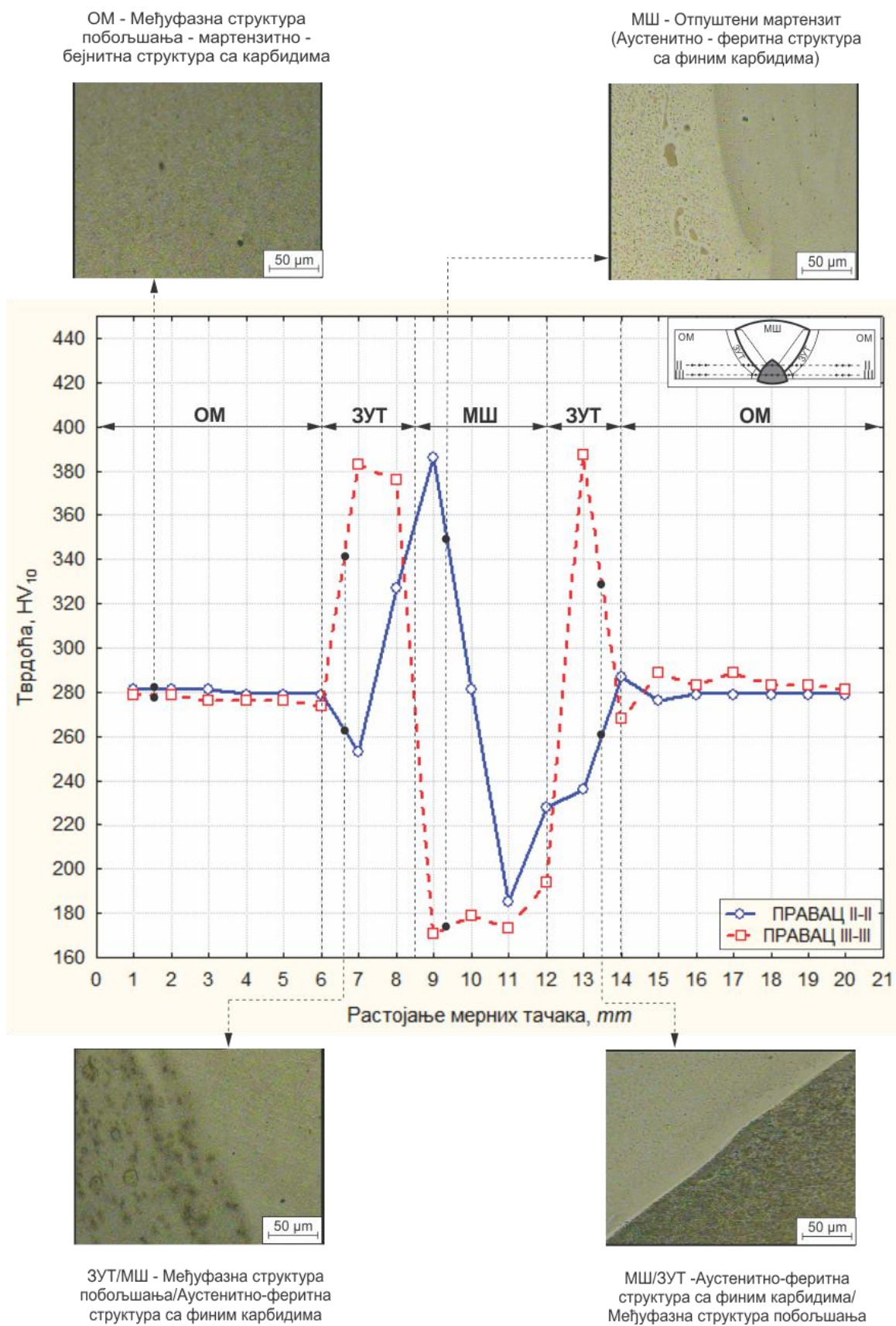
Слика 6.3 Узорак 3 – плоча 2: дијаграм расподеле тврдоће и микроструктура карактеристичних зона - правац I-I [16]



Слика 6.4 Узорак 3 – плоча 2: дијаграм расподеле тврдоће и микроструктура карактеристичних зона - правци II – II и III – III [16]



Слика 6.5 Узорак 4 – плоча 2: дијаграм расподеле тврдоће и микроструктура карактеристичних зона - правац I-I [16]

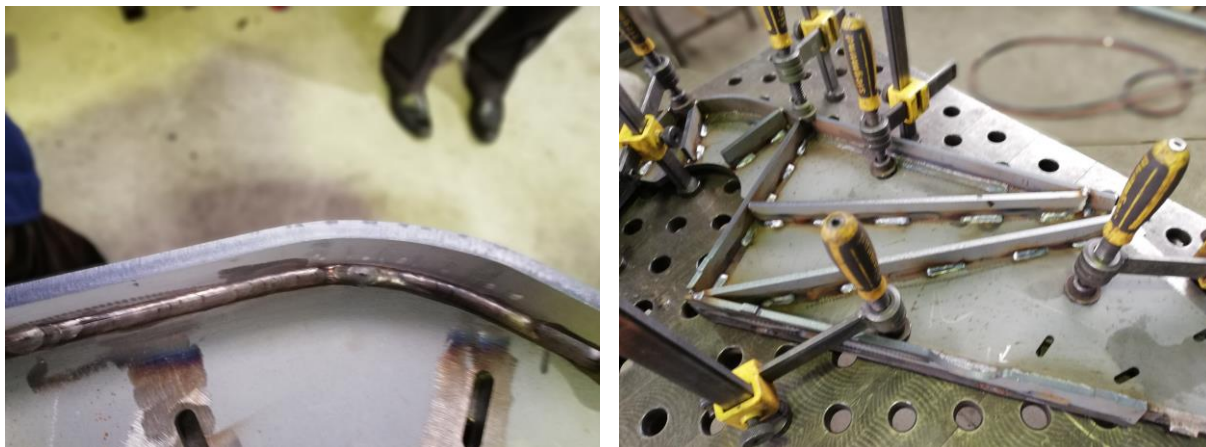


Слика 6.6 Узорак 4 – плоча 2: дијаграм расподеле тврдоће и микроструктура карактеристичних зона - правци II – II и III – III [16]

6.1.2 Примери примене одабране технологије на реалним склоповима

После изведених моделских испитивања најповољнија технологија заваривања је примењена и при изради реалних веома одговорних склопова. После експлоатације у врло ригорозним условима нису се појавиле видљиве грешке и заварене конструкције одабраном технологијом су показале високу поузданост.

На сликама 6.7 до 6.11 дати су фотографски прикази израде само неких одговорних подсклопова намењених за уградњу у веома сложене и одговорне склопове који трпе висока динамичка оптерећења.



Слика 6.7 Наношење коренских завара на одговорним подсклоповима од челика Weldom 700 [16]



Слика 6.8 Израда одговорног склопа од челика Weldom 700 [16]



Слика 6.9 Израда одговорног склопа од челика Weldom 700 [16]



Слика 6.10 Израда одговорног склопа од челика Weldom 700 [16]



Слика 6.11 Израда одговорног склопа од челика Weldom 700 [16]

7. Закључак

Поступци МИГ/МАГ заваривања су најзаступљенији од свих метода заваривања у заштити гасова - инертних односно активних. Захваљујући високој продуктивности и могућношћу аутоматизације и роботизације све више су у примени. Нема индустријске гране где они нису нашли широку примену.

У првом делу овог рада опширније су описане карактеристике МИГ/МАГ заваривања. При заваривању у заштити гаса користи се једносмерна струја обрнутог поларитета, што значи да се радни предмет везује за минус пол извора струје. Тиме се остварује већа стабилност електричног лука.

Даље у је раду детаљно описује заваривачка опрема за МИГ/МАГ заваривање. У принципу реч је о скоро истој опреми за оба метода заваривања, с тим што се мењају боце са заштитним гасовима и користе различити додатни материјали. Посебно треба споменути уређај за додавање жице чија је улога константно довођење електродне жице на место споја.

У четвртој тачки детаљно се разматрају додатни и потрошни материјал при заваривању наведеним начинима заваривања. Реч је о пуним и у новије време пуњеним електродним жицама за заваривање челика, али и обојених метала и њихових легура.

У петој тачки нешто детаљније се говори о технолошким параметрима и технологијама МИГ/МАГ заваривања. На квалитет оствареног споја од пресудног су значаја правилно одређени и у раду одржавани параметри заваривања, Они зависе од низа утицајних променљивих, као што су: врста споја, врста и пречник електродне жице, облик жлеба, дебљина и врста основног материјала, положај заваривања, као и посебни захтеви везани за специфичне услове експлоатације заварених конструкција. У најутицајније параметре заваривања, који у великој мери утичу на квалитет изведеног споја, спадају: јачина струје заваривања, напон електричног лука, врста и пречник електродне жице, брзина заваривања, врста заштитног гаса и његова потрошња, поларитет жичане електроде, величина додатног индуктивитета, дужина слободног краја жичане електроде, удаљеност млазнице заштитног гаса од радног комада, положај пиштоља за заваривање у односу на радни комад, смер заваривања и др.

У шестој тачки овог рада дато је упутство за заваривање једног челика повишене јачине који налази све већу примену при изради одговорних заварених конструкција. Укратко су приказана моделска испитивања која су послужила за одређивање полазне технологије заваривања која се успешно показала и при примени реалних заварених конструкција.

8. Литература

1. Јовановић, М., Лазић, В.: *Практикум РЕЛ и МИГ/МАГ заваривања*, помоћни универзитетски уџбеник, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2008.
2. Јовановић, М., Лазић, В.: *Технологија ливења и заваривања*, универзитетски уџбеник, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2015.
3. Јовановић, М., Адамовић, Д., Лазић, В.: *Технологија заваривања-приручник*, Крагујевац, 1996.
4. Јовановић, М., Адамовић, Д., Лазић, В., Ратковић, Н.: *МИГ/МАГ заваривање - приручник*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2006.
5. Милотић, М.: *Приручник за завариваче*, Добој, 2008.
6. Интернет страница: <https://hrcak.srce.hr/file/139584> - приступљено ----- приступљено јун 2020.
7. Интернет страница: <https://www.formaplast.rs/index.php/%D0%B3%D0%B0%D0%BB%D0%B5%D1%8%D0%B8%D1%98%D0%B0%8%D0%B2%D0%B0%D1%80%D0%B8%D0%BB%D0%B0%D1%87%D0%BA%D0%B8%D1%80%D0%B0%D0%B4%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D0%BF%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%83%D0%BF%D1%86%D0%B8%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D0%B3,%D0%BC%D0%B8%D0%B3,%D0%BC%D0%B0%D0%B3/detail/61-mig-mag-varilac#> приступљено јуна 2020.
8. Интернет страница: <http://afrodita.rcub.bg.ac.rs/~rzoran/ZAVAELEZGP.pdf> приступљено јуна 2020.
9. Интернет страница: <https://var.rs/sve-o-zavarivanju/migmag-zavarivanje-co2-zavarivanje/> приступљено јула 2020.
10. Интернет страница: <https://m.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable MIGMAWWires-SuperArc-SuperArcLA-90/c4200.pdf> приступљено јула 2020.
11. Интернет страница: <http://afrodita.rcub.bg.ac.rs/~rzoran/ZAVAELEKT.pdf> приступљено јула 2020.
12. Пргомелја, Н.: *Технологија обраде без резања*, Београд.
13. Интернет страница: <https://www.scribd.com/doc/78263349/Osnovi-Zavarivanja-Lemljenja-I-Lepljenja> приступљено августа 2020.
14. Интернет страница : <https://www.scribd.com/doc/296795402/TEHNOLOGIJA-ZAVARIVANJA-korigovano> приступљено августа 2020.
15. Интернет страница : <http://www.alatistherm.co.rs/pdf.zavarivanje/ParametriZavarivanja.pdf> приступљено августа 2020.
16. Арсић, Д.: *Оцена заварљивости и избор најповољније технологије заваривања челика повишене јачине класе S690QL*, мастер рад, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2013.