

Факултет инжењерских наука

Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Наука о заваривању

Број индекса: 328/2015

Ивана Н. Илић

**ИЗБОР МЕТОДЕ И ТЕХНОЛОГИЈЕ
ЗАВАРИВАЊА ПРИ ИЗРАДИ КАШИКЕ
БАГЕРА**

Мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. др Вукић Лазић – ментор
2. _____
3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

Садржај овог мастер рада треба да обухвати следеће најважније циљеве за које кандидат мора да буде оспособљен:

- 1) да се упозна и обучи да самостално одабере метод или комбинује више метода заваривања за конкретан случај – багер утоваривача,
- 2) да одабере најповољнију технологију заваривања (додатни материјал и најважније технолошке параметре, редослед заваривања, по потреби термичку обраду и др.) багера утоваривача,
- 3) да на моделима утврди квалитет заварених спојева најважнијим методама испитивања са разарањем и без разарања и
- 4) да тако одабрану најповољнију технологију заваривања примени при изradi конкретне заварене конструкције - багера утоваривача.

Препоручена литература:

- [1] М. Јовановић, В. Лазић: *Технологија ливења и заваривања*, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац 2015.
- [2] М. Јовановић, Д. Адамовић, В. Лазић: *Технологија заваривања-приручник*, друго издање, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2011.
- [3] М. Мутавцић: *Репаратурно наваривање делова машина и уређаја грађевинске механизације*, докторска дисертација, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2015.
- [4] М. Јовановић, Д. Адамовић, В. Лазић, Н. Ратковић: *Машински материјали*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2003.

У Крагујевцу, 16. 06. 2017. године

Ментор:

Др Вукић Лазић, ред. проф.

РЕЗИМЕ

У овом раду биће детаљно описан процес израде утоварне кашике багера. У теоријском делу рада утврђена је методологија за оцену заварљивости челика S355, оцењена је заварљивост разматраног челика и изабрани су параметри заваривања за MAG поступак. На крају је предложена и најповољнија технологија заваривања. Оптимална технологија је изабрана на основу експерименталних резултата. Експериментални део рада односи се на одређивање механичких карактеристика и анализа понашања делова на собној температури. Верификација изабране технологије извршена је одређеном контролом изведених заварених спојева, на посебно ригорозним тестовима испитивања заварених конструкција. Одабран је MAG поступак заваривања. Испитивани модели поред зоне завареног споја садрже и зону геометријског дисконтинуитета.

Кључне речи: *Кашика багера, заварљивост, угљенични челик S355, додатни материјал, микроструктура, контрола.*

ABSTRACT

This paper will describe in detail the process of making loader buckets. In the theoretical part of the paper, a methodology for the evaluation of the weldability of the steel S355 was determined, the weldability of the considered steel was evaluated, and the welding parameters for the MAG procedure. In the end, the best welding technology is proposed. Optimal technology has been selected based on experimental results. The experimental part deals with the determination of mechanical characteristics and analysis of the behavior of the components at room temperature. The verification of the selected technology was performed by a certain control of derived welded joints, on particularly rigorous testing of welded structures. MAG is the process of welding. The tested models along the welded joint zone also contain a geometric discontinuity zone.

Key words: *Bucket excavator, weldability, carbon steel S355, additional material, microstructure, control.*

САДРЖАЈ:

1. УВОД	1
2. ИСТОРИЈАТ ФИРМЕ	3
3. ОСНОВНИ ПОЈМОВИ О ЗАВАРИВАЊУ	4
4. ОЦЕНА ЗАВАРЉИВОСТИ ОСНОВНОГ МАТЕРИЈАЛА.....	13
4.1 Појам заварљивости.....	13
4.2 Методе за испитивање заварљивости	14
4.2.1 Рачунске методе за оцену заварљивости	15
4.2.2 Експерименталне - практичне методе.....	18
4.3 Оцена заварљивости угљеничних челика.....	19
5. ПРЕГЛЕД НАЈВАЖНИЈИХ МЕТОДА ЗАВАРИВАЊА	21
5.1 Гасно заваривање	21
5.2 Ручно - електролучно заваривање (REL).....	25
5.2.1 Прорачун технолошких параметара REL заваривања.....	25
5.3 MIG/MAG заваривање.....	30
5.3.1 Прорачун технолошких параметара MIG заваривања.....	31
5.3.2 Прорачун технолошких параметара MAG заваривања	35
5.4 TIG заваривање	39
6. ИЗБОР ДОДАТНОГ МАТЕРИЈАЛА И ЗАШТИТНОГ ГАСА.....	43
7. КАШИКА БАГЕРА	45
7.1 Основни материјал кашике багера и њених делова.....	45
7.2 Алат за склапање кашике багера	50
8. ИЗБОР ТЕХНОЛОГИЈЕ ЗАВАРИВАЊА КАШИКЕ БАГЕРА	54
8.1 План активности заваривања кашике багера	54
8.1.1 План процеса заваривања кашике багера	56
8.2 Процес заваривања кашике багера.....	57
8.3 Заваривање кашике багера на манипулатору	59
9. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСПИТИВАЊА ЗАВАРЕНИХ СПОЈЕВА.....	61
9.1 Испитивање ударне жилавости.....	62
9.1.1 Уводне напомене.....	62
9.1.2 Експериментална испитивања	63
9.2 Испитивање затезањем	71
9.2.1 Уводне напомене.....	71
9.2.2 Експериментална испитивања	72
9.3 Испитивање савијањем.....	79

9.3.1 Уводне напомене.....	79
9.3.2 Експериментална испитивања	79
9.4 Мерење тврдоће и испитивање макроструктуре.....	83
9.4.1 Уводне напомене.....	83
9.4.1.1 Мерење тврдоће	83
9.4.2 Испитивање макроструктуре	83
10. ЗАКЉУЧАК	87
11. ЛИТЕРАТУРА.....	89

ПРЕДГОВОР

У привредно развијеним земљама све више се придаје значај истраживању, развоју и примени савремених производних технологија, у овом случају технологији заваривања. Присутна је тежња за израдом што лакијих носећих конструкција којима се постижу различите предности, као што су: уштеде материјала и времена у производњи, смањење утrophка енергије у експлоатацији код тешко покретних конструкција, типа железничких и шинских возила, дизалица, бродова и тсл., смањење тежине конструкција, боља антикорозивна својства, мање загађивање околине, бољи квалитет, сигурност и поузданост производа и др.

Циљ кандидата је да кроз овај рад, теоријско-експерименталног типа, истражи проблематику и дефинише технолошко-металуришку заварљивост, прикаже избор оптималних параметара заваривања челика S355J2G3, као и да покуша да објави резултате добијене испитивањем изведених заварених спојева.

Овом приликом желим да се захвалим ментору проф. др Вукићу Лазићу на одвојеном времену и свестраној и несебичној помоћи пруженој при изради овог мастер рада. Такође, се захваљујем и осталим колегама и сарадницима Факултета инжењерских наука на несебичној помоћи при извођењу експерименталних испитивања.

Посебно се захваљујем менаџменту фирме "Wacker Neuson CE" на великој помоћи и спремности да ми уопште дају могућност да у њиховим погонима спроведем део ових обимних експерименталних испитивања.

1. УВОД

Технологија заваривања, или наука о вештини заваривања најмлађа је грана производне машинске технологије. 1802. године у SAD конструисан је први горионик са водоником и кисеоником, док је век касније (1901. год.) у Француској израђен први горионик са окси - ацетиленским пламеном. Седамдесетих година XIX века се експериментисало и са заваривањем помоћу електричног лука, 1862. са угљеном електродом, па 1891. са голом електродном жицом, да би у првој декади XX века, 1908. Швеђанин Кјелберг пронашао обложену электроду. У самом почетку запажено је да голе електроде дају заварени спој рђавих особина због тога што растопљен метал апсорбује гасове из ваздуха. На основу тога се може рећи да се заштита растопа од спољне атмосфере у принципу може остварити на два начина:

1. Применом топителја (преко облоге електроде или у облику праха) и
2. Потискивањем ваздуха из зоне заваривања (довођењем аргона, хелијума, угљен-диоксида итд.).

На основу тих сазнања постоје следећи начини заваривања: гасно, ручно-електролучно (REL, 1908.), под прахом (EPP, 1928.), под троском (EPT, 1953.), као и методи заваривања у заштити гаса (MIG/MAG, TIG у раздобљу од 1940. до 1950. године), којима се може извести спајање метала топљењем. Поред наведених метода заваривања, велику примену имају и термомеханички поступци од којих су најважнији електроотпорски начини заваривања у које спадају: тачкасто, шавно, пројекционо, као и сучеоно заваривање збијањем или варничењем. Последњих година се увелико развијају тзв. физички методи заваривања, где припадају следеће методе: електронским снопом, ласерским зрацима, ултразвучним осцилацијама, дифузијом, трењем, експлозијом итд. Погодним избором метода (поступка) и технолошких параметара заваривања, укључујући по потреби и термичку обраду, могу се неизбежне промене свести на најмању могућу меру.

Нагли развој технологије заваривања настао је крајем прошлог и почетком овог века када је почела примена горивих гасова и електричног лука као снажних топлотних извора. Од тада се ова технологија непрекидно развија. Иако се већина људи води тиме да успех заваривачких радова зависи искључиво од вештине заваривача, у стварности се технологија заваривања заснива на томе да је морају познавати инжењери и технолози, а у извесној мери и заваривачи. Данас, заваривање и заварене конструкције заузимају све важније место у савременој индустрији [1].

Најважнији захтеви који се морају испунити за успешно изведену конструкцију су функционалност и сигурност у условима експлоатације. Због тога се мора узети у обзир опасност од кртог лома, која у великој мери зависи од квалитета заварених спојева.

У завареним спојевима може доћи до концентрације напона, чиме се ствара опасност од лома конструкције која је условљена од материјала у околини подручја концентрације напона [2].

С обзиром на такву ситуацију јасно је да локалне особине завареног споја и количина присутних грешака представљају два основна фактора за поузданост конструкције. Самим тим је веома битно да је остварена добра заварљивост основног материјала, како би се добили спојеви повољних особина. Такође треба знати различите околности у којима могу настати грешке, и зато из тих разлога треба обратити пажњу при самом избору основног материјала (најчешће челика).

Развој нових технологија и материјала се све више унапређује у погледу побољшања функционалних особина машина, уређаја и конструкција, уз снижење трошкова производње, смањење тежине, а уз повећање продуктивности, рентабилности и економичности. Данас су за израду заварених конструкција више у примени легуре на бази гвожђа и угљеника (углавном челици) и обојених метала, него чисти метали. Наравно, данас се за одговорне заварене носеће конструкције највише примењују челици, а с обзиром на цену и квалитет, вероватно ће тако бити и у будућности. У зависности од намене конструкције, могу се захтевати и различита својства, која се углавном постижу правилним избором основног материјала и технологије заваривања.

Задатак овог мастер рада јесте правилан избор методе и технологије заваривања кашике багера. Током самог процеса израде кашике, прошло се кроз неколико фаза конципирања, разраде конструкције, моделирања делова и склопова и израде техничке документације у програму NX10. Постоји више типова кашика багера које имају различите намене, па тако нпр. постоје кашике за утовар и истовар дробљеног агрегата, постоје кашике за копање земље, као и кашике за друге различите намене. У конкретном примеру реч је о кашикама за утовар и истовар песка и камена (минералних агрегата).

Кашика багера за утовар израђена је у фирми "Wacker Neuson Крагујевац", у којој сам похађала стручну праксу. Један од захтева за израду ове кашике био је да се примене што је више могуће стандардни елементи, стандардни материјали који се највише користе у фабрици и да се конструкција делова и подсклопова прилагоди условима машинске обраде која се примењује у оквиру фирме.

Приликом израде кашике багера, примењено је знање стечено током школовања, као и знање стечено у оквиру фирме кроз ову стручну праксу. Као што сам напред споменула, овај мастер рад написан је захваљујући подршци и сарадњи са ментором, као и са менаџментом фирме "Wacker Neuson Крагујевац".

2. ИСТОРИЈАТ ФИРМЕ

Будући да ми је фирма "Wacker Neuson CE" омогућила стручну праксу, дала све потребне услове за израду овог рада и вероватно прими у радни однос, у обавези сам да мимо уобичајене праксе, у знак захвалности наведем бар неколико реченица о историјату фирме.

"Wacker Neuson CE" је мултинационална компанија, која развија, производи и продаје опрему и делове за грађевинске машине [3].

Историјат компаније се везује за 1848. годину када је Јохан Кристијан Вакер основао ковачку радионицу у Дрездену. Компанија је 1930. године пријавила свој први патент – електрични набијач земљишта. Сада компанија поседује преко 400 патената и корисних унапређења. Од 2005. године, у сарадњи са компанијом "Weidemann GmbH" допуњен је асортиман групе са производима компактних грађевинских машина и машина за пољопривреду.

Данас има више од 40 филијала, више од 140 продајних и сервисних центара и преко 12.000 продајних и сервисних партнера широм света. Група има преко 3.500 запослених. Седиште компаније је у Минхену.

"Wacker Neuson" је водећа компанија у свету у области производње грађевинских машина и уређаја. Професионалним корисницима из области грађевине, хортикултуре и пољопривреде, као и индустријским предузећима, предузећима за рециклажу и локалним самоуправама нуди преко 300 производних група као и услуге изнајмљивања, замене и поправке делова.

Компанија "Wacker Neuson Крагујевац д.о.о." део је интернационалне групе "Wacker Neuson CE" са централом у Минхену (Немачка), која се бави производњом грађевинских машина као и целокупне машинске опреме која је потребна у грађевинској индустрији. "Wacker Neuson Крагујевац д.о.о." бави се производњом кључних компоненти, пре свега заварених конструкција за грађевинске машине [3].

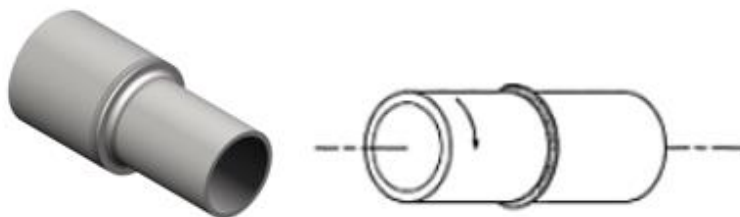
Компанија "Wacker Neuson" је у Крагујевцу основана 2007. године и тада је бројала неких 20 радника. Како су пролазиле године, фирма је ширила своје капацитете, како производне тако и у људству, тако да данас фирма има око 300 запослених.

У производним погонима компаније у Крагујевцу 80% производног процеса чини заваривање, а остало су операције сечења материјала као и машинске обраде. У оквиру компаније развијено је одељење за пројектовање прибора за заваривање и израду прототипова.

3. ОСНОВНИ ПОЈМОВИ О ЗАВАРИВАЊУ

Заваривање је процес израде нераздвојивог споја успостављањем међуатомских веза између делова који се заварују, при коме се појединачно или комбиновано користи топлотна и механичка енергија, а по потреби и додатни метаријал. Поступци заваривања, који се најчешће користе у пракси, засновани су на локалном загревању материјала изнад температуре топљења, када заварени спој настаје очвршћавањем (нпр. електролучно заваривање), или на локалном загревању материјала до температуре топљења, када заварени спој настаје уз додатно деловање притиска (нпр. електроотпорско заваривање). Заваривањем је могуће спајање метала са металом, неметала са неметалом и метала са неметалом, али се у практичном смислу подразумева спајање метала са металом [1, 4].

Да би између атома граничних површина два метала почеле деловати привлачне силе потребно је приближити атоме на размак мањи од параметра кристалне решетке. Ако се то оствари по целој додирној површини два метала нестаће граница између њих и добиће се мање или више савршен шав - спој. На слици 3.1 приказани су примери завареног споја цеви.



Слика 3.1 Две цеви спојене поступком заваривања [5, 6]

Предности заваривања су [1]:

- упрошћавање конструкције, могућност примене нових, економски оправданих концепата конструкције,
- замењује технологије ливења и ковања (одливке и отковке), уз одређене економске предности,
- олакшана могућност обликовања конструкције, нпр. могућност решења конструкције као плочасте, решеткасте, кутијасте, коморне, љускасте,
- смањење масе конструкције погодним избором и рационалном применом материјала, избором погодног завареног споја (сучеони, угаони, преклопни), начина заваривања и нарочито дозвољеног оптерећења завареног споја,
- повећање продуктивности остварено механизацијом и аутоматизацијом поступка заваривања,
- снижавање производних трошкова (краће време израде – нпр. по дужном метру, нижи трошкови, мањи број радника и др.) и
- применљивост и могућност брзе реализације конструктивних пројеката и освајања производа.

Недостаци заваривања су [1]:

- заварени спој се образује на топло у уском појасу завариваних делова – локално загревање,
- долази до промене структуре и механичких особина завареног споја,
- при бржем хлађењу шавови челика, са повишеним садржајем угљеника, јавља се опасност од закаљивања (настанак кртих фаза) у зони утицаја топлоте и основном материјалу,
- услед неравномерног загревања и хлађења настаје опасност од појаве унутрашњих напона и деформација,
- квалитет шавови и његова способност односно моћ ношења и функционална поузданост је безусловно зависна од сакривених унутрашњих грешака у шавовима,
- опасности од електричне струје, електричног лука, гасног пламена, видљивог и невидљивог зрачења,
- скупа текућа, процесна и накнадна термичка обрада при изради одговорних конструкција од закаљивих метала и легура,
- скупа текућа или накнадна контрола,
- скуп стручни кадар, односно потреба за високообразованим стручњацима за заваривање, материјале, термодинамику, електрику, као и високообучених заваривача.

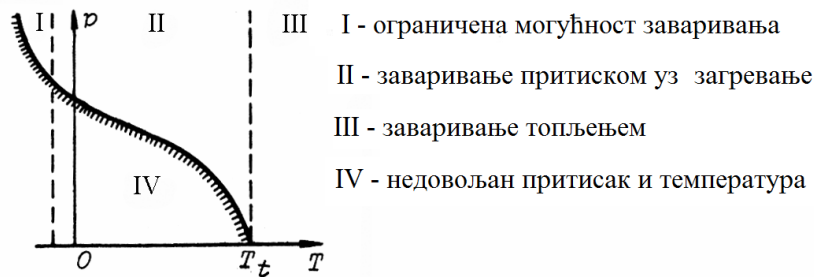
Суштина заваривања метала је образовање металуршког споја, тј. споја створеног дејством међуатомских привлачних сила, које су узрок повезивања површине метала, то значи сила које одржавају веома ефикасно узајамне положаје и растојања атома који образују кристалне решетке унутар дела. Истовремено обезбеђују стални облик металних предмета. Спајање заваривањем може се остварити само истовременим деловањем више фактора [1]:

- међусобним приближавањем делова (слика 3.2а),
- довођењем потребне количине енергије, нпр. притиска (слика 3.2б) и
- дифузијом и прекристализацијом (слика 3.2в).



Слика 3.2 Фазе образовања споја притиском [1]

Услови за образовање завареног споја могу се приказати и помоћу дијаграма притисак - температура (слика 3.3). За сваки метал се могу конструисати овакви дијаграми и одредити граничне вредности и подручја притиска и температуре потребних за остварење споја.

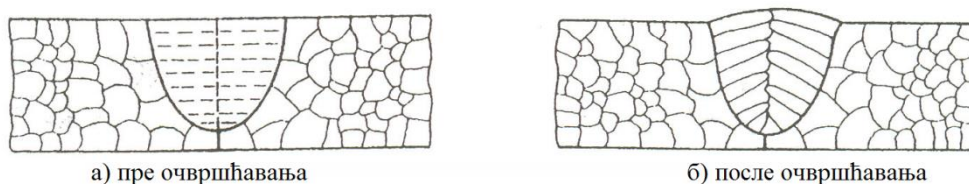


Слика 3.3 Приказ граничних параметара заваривања [1]

Према појавама које условљавају образовање завареног споја разликују се [1]:

- заваривање топљењем и
- заваривање притиском.

Заваривање топљењем је процес нераздвојивог спајања завариваних делова при температурама на месту спајања вишим од температуре топљења, уз примену додатног материјала или без њега (слика 3.4а). За овај поступак су неопходни снажни извори топлоте за локално топљење метала. На тај начин се образује метални растоп - заваривачко купатило, чијом кристализацијом настаје шав. Заваривање притиском је процес спајања, применом дејства силе, статичког или динамичког карактера (слика 3.4б) [1].



Слика 3.4 Заваривање топљењем [1]

У пракси ови процеси спајања нису увек јасно разграничени. Ако се код појединих метода допуњују – спајање спада у поступке термомеханичког заваривања. Исто тако, у процесе сродне заваривању убрајају се: термичко резање, жлебљење, наваривање, метализација, а такође и лемљење и лепљење [1].

У поступке заваривања *притиском* спадају: хладно заваривање, заваривање трењем, заваривање ултразвуком, заваривање експлозијом и др. [1].

У поступке заваривање *топљењем* спадају: гасно заваривање (заваривање пламеном или окси - ацетиленско заваривање), електричним луком обложеном електродом (или ручно - електролучно заваривање - REL, понекад се у литератури означава и као Е - заваривање), аутоматско заваривање под прахом (ЕРР), електричним луком у заштитном гасу (MIG/MAG, TIG), електролучно под троском (ЕРТ), термитно (алуминотермијско) заваривање, плазмено заваривање, заваривање електронским снопом, ласерско заваривање и др. [1].

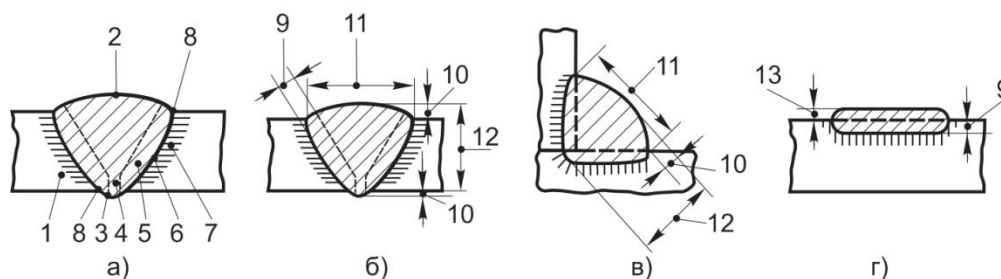
Термомеханичко заваривање остварује се превођењем зоне спајања у стање пластичности и затим увођење силе притиска. Сила притиска може бити ударна (ковачко заваривање), или се уводи постепено: заваривање електричним отпором, плазмено заваривање притиском, термитно заваривање притиском, индукционо заваривање притиском [1].

Хладно заваривање је метода код које се чврст спој остварује само деловањем силе притиска. Притисак којим се делује на метале веће пластичности, нпр. алуминијум, бакар и сл. доводи до спајања као резултат локалног спонтаног загревања и дифузионих процеса[1].

3.1 Појмови о заваривању

Појмови који се сусрећу код заваривања су: основни материјал, жлеб, завар, шав, додатни материјал, заварени спој, заварљивост и ЗУТ (зона утицаја топлоте). *Основни материјал* је материјал који се заварује. *Додатни материјал* је материјал који пре заваривања не припада деловима који се спајају, него се додаје при процесу заваривања, топи се заједно са основним материјалом и попуњава простор на месту споја. *Заварљивост* је погодност материјала за заваривање.

Заварени спој је целина остварена заваривањем, која обухвата додирне делове завареног основног материјала. На слици 3.5 приказан је изглед завареног споја са свим његовим елементима [1].



Слика 3.5 Основни елементи завареног споја: 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 шав, 13-дебљина навара [4]

Шав (или вар) је очврсли растопљени материјал, који је настао приликом топљења основног и додатног материјала, при заваривању у једном или више пролаза (слика 3.6а). У неким случајевима нпр. при заваривању танких лимова, шав се образује само стапањем и очвршћавањем ивица основног материјала (слика 3.6б) [1].

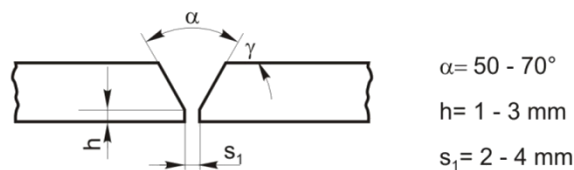
8

Разне врсте шавова представљају се на цртежима са ознакама које су, по облику сличне шаву који се изводи. У табели 3.1 дати су основни и допунски знаци за означавање неких шавова на цртежима.

Табела 3.1 Упроишћено приказивање шавова [9]

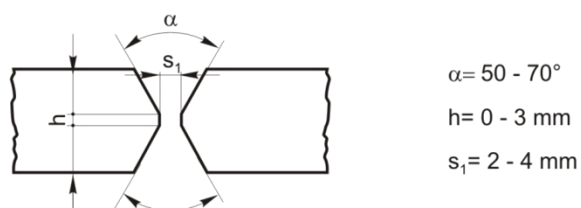
Назив	Симбол	Припрема	Изведба	Назив	Симбол	Припрема	Изведба
Зарубљни шав				Двоструки U - шав			
I - шав				1/2 V - шав			
V - шав				K - шав			
Стрми бочни шав				1/2 Y - шав			
X - шав				Плитки K - шав			
Y - шав				J - шав			
Двоструки X - шав				Двоструки J - шав			
U - шав							

- *Зона утицаја топлоте* - ЗУТ је онај део основног материјала који належе на метал заваре, који је под утицајем топлоте за време израде завареног споја. Ширина ЗУТ-а, за дати материјал, зависи од укупне количине унете топлотне енергије и њене конструкције. ЗУТ се може поделити на више подручја. У сваком од њих, микроструктура је зависна од достигнуте максималне температуре термичког циклуса и од брзине хлађења. Особине ЗУТ-а зависе од основног материјала (дебљина, хемијски састав, термофизичке особине и др.), поступка заваривања, додатног материјала (ако га има), и процесних параметара заваривања (нпр. напона лука, струје заваривања, брзине заваривања, температуре предгревања и брзине хлађења појединих тачака ЗУТ-а) [1].
- *Завар* је очврсли растопљени материјал настао приликом топљења основног и додатног материјала само у једном пролазу.
- *Жлеб* је простор између делова припремљених за заваривање. У нормама се одређује начин израде жлеба према врсти споја: сучеони и угаони [1].
 - V-жлеб, облика и димензија као на слици 3.9, препоручује се за челичне лимове дебљине до 16 mm.



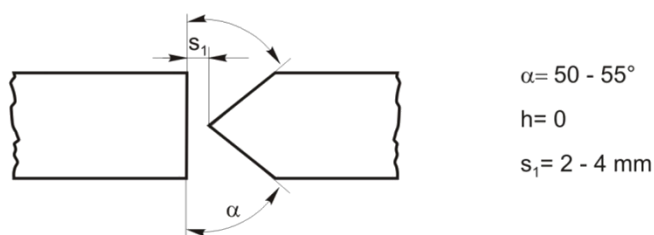
Слика 3.9 Изглед и димензије V – жлеба [1]

- X-жлеб (слика 3.10) облика и димензија, примењује се обично за лимове дебљине 15-40 mm, чиме се постиже боље уваривање, уштеда у материјалу и мања угаона деформација, него што је то случај код V-жлеба.



Слика 3.10 Изглед и димензије X – жлеба [1]

- K-жлеб (слика 3.11), обично се користи за извођење угаоних и Т-спојева, од материјала дебљих од 15 mm те се постиже потпуно уваривање и смањују угаоне деформације. Примењује се обично за материјале дебље од 15 mm.



Слика 3.11 Изглед и димензије K – жлеба [1]

Заварљивост је комплексна технолошка карактеристика материјала којом се углавном изражава утицај начина заваривања на заварени спој и његово понашање за време и после заваривања у топлотном и деформационом смислу. Израчунава се помоћу једначине која је приказана изразом 3.1. С обзиром на комплексност појма заварљивости, посебно се разматрају [1]:

- металуршка заварљивост,
- технолошка заварљивост и
- конструкциона заварљивост.

$$\vec{Z} = \vec{M} + \vec{K} + \vec{T} \quad (3.1)$$

Металуршка заварљивост у смислу погодности материјала за заваривање, технолошка у смислу могућности заваривања одређеним поступком и конструкциона заварљивост у смислу поузданости изведеног споја па и подсклопова, склопова и целе конструкције [2].

Предгревање подразумева загревање подручја заваривања изнад температуре околине, на прописану температуру T_p , пре почетка заваривања, и одржавање те температуре за време заваривања. Предгревање је примарно уношење топлоте у завар, а касније се извором енергије заваривања (нпр. електричним луком) секундарно уноси топлота у завар. Коначни ефекти су резултат примарног и секундарног уношења топлоте. Предгревањем се спречава настанак хладних прелина [10].

Термички циклус заваривања: Процес заваривања метала топљењем одвија се у условима брзих температурних промена, од собне до температуре топљења па и испаравања метала. У овом широком температурном интервалу одвијају се различити физички и хемијски процеси [10]:

- загревање основног и додатног материјала,
- топљење основног и додатног материјала,
- кристализација растопљеног материјала и
- структурне и запреминске промене основног и додатног материјала.

За време заваривања термички циклус има значајан утицај на механичке особине завареног споја. Тврдоћа и живаост завареног споја су посебно под утицајем фактора:

- дебљине материјала,
- облика споја и
- уношење топлоте за време заваривања и температуре предгревања.

Термички циклус карактеришу три основне величине: брзина хлађења до максималне температуре, максимална температура и брзина хлађења.

Деформациони (напонски) циклус заваривања: У току заваривања долази до неравномерног загревања или хлађења заварених металних делова, што доводи до прелазних и променљивих напрезања која могу проузроковати деформацију завареног споја. Деформациони циклус заваривања последица је деловања термичког циклуса у зони завареног споја, а због ширења долази до појаве напона. Ширење деформационог циклуса није хомогено, тако да у металу постоје микро подручја са различитим деформационим циклусима. У свакој тачки завареног споја деформациони циклус је другачији. Последице овог циклуса се мењају и огледају кроз појаву општих деформација, заосталих напона, настанка грешака и хладних прелина. У завареном споју се могу појавити пукотине као последица превелике локалне концентрације напона [10].

Структурне трансформације при заваривању: Структурне трансформације при заваривању имају одлучујући утицај на механичке особине материјала шави и ЗУТ-а. Јављају се због термичког деформационог циклуса у завареном споју. Према Сеферијану, структурне трансформације при заваривању зависе од [10]:

- хемијског састава материјала,
- величине аустенитног зрна из којег се образују секундарне структуре и
- брзине хлађења аустенита.

Приликом заваривања, основни материјал са полиморфном трансформацијом, какав је челик, има следеће зоне:

- растопљена и делимично растопљена зона, настају у области између ликвидус и солидус линије (изнад 1400°C) и одликује се усмереним кристалним зрнима, у правцу најбржег одвођења топлоте,
- зона предгревања – настаје у температурном интервалу од 1100°C до 1400°C , у области крупно зрнастог аустенита и има нехомогену расподелу угљеника,
- зона нормализације – фино зрнаста структура, настаје у интервалу од око 850°C до 1100°C , у области уситњавања аустенитног зрна под условима који одговарају истоименој термичкој обради,
- зона рекристализације, настаје испод 850°C у области полазне феритно-перлитне структуре и одликује се феритом крупнијег зрна и перлитом ситнијег зрна,
- основни материјал – феритно перлитна микроструктура.

4. ОЦЕНА ЗАВАРЉИВОСТИ ОСНОВНОГ МАТЕРИЈАЛА

Комплексан процес спајања материјала, најчешће метала, који обухвата и обједињује више чинилаца у циљу добијања завареног споја жељених карактеристика је процес заваривања. Када је реч о проблемима који се јављају при заваривању, највећи је између осталих и заварљивост материјала. Како је и сама заварљивост врло комплексан појам то ће у наредном делу рада овој проблематици бити посвећено више пажње, с посебним освртом на заварљивост челика S355J2G3.

4.1 Појам заварљивости

Комплексна технолошка карактеристика материјала којом се углавном изражава утицај процеса заваривања на заварени спој и његово понашање у топлотном и деформационом смислу у току и после заваривања, назива се **заварљивост**. Може се рећи да појам заварљивости одређује релативну способност материјала да ствара заварене спојеве одабраном технологијом заваривања, а да изведени спојеви удовољавају свему што се од њих тражи у радним условима. Као што је већ поменуто, посебно се разматрају следећи појмови заварљивости: *металуршка, конструкциона и технолошка заварљивост*.

Металуршка заварљивост обухвата све металуршке промене у материјалу настале дејством топлоте унете при заваривању. Све те промене утичу на ову врсту заварљивости. Из тих разлога, ова заварљивост зависи од низа фактора: хемијског састава, структуре, начина производње материјала, садржаја гасова и неметалних укључака итд. У току процеса заваривања може доћи до недопуштеног погоршања, односно снижења механичких и технолошких својстава споја, нарочито у зони око шавова. Самим тим код материјала лоше заварљивости могу настати прслине, знатне промене хемијског састава, тврде и крте структурне компоненте и сл. Металуршки су заварљиви сви хомогени метални материјали који образују чврсте растворе и нееутектичке или еутектичке смеше, односно сви материјали који поседују металуршку заварљивост могу се успешно заварити, ако се одабере одговарајући метод, поступак и технологија заваривања [1].

Конструкциона заварљивост у смислу поузданости изведеног споја па и подсклопова, склопова и целе конструкције, показује утицај низа параметара на пројектовање заварене конструкције, нпр. дебљине, врсте, броја и распореда шавова, које конструктор поставља пројектним захтевом за дати случај, све према врсти оптерећења и другим радним условима [1].

Технолошка заварљивост у смислу могућности заваривања одређеним поступком обухвата технолошке параметре који утичу на особине заварених спојева, нпр. додатни материјал, метод и поступак заваривања, погонску енергију (унос топлоте), брзину хлађења итд. Односи се на понашање неких материјала у току заваривања или наваривања, они се оцењују као „добро заварљиви“ када је шав чист и хомоген, тј. када се основни и додатни материјал стапају у хомогену легуру, а при томе се топе без

тешкоћа, без великог прштања (бризгања) и појаве прслина, гасних мехурова и других грешака. Нечистоће на страницама жлеба и околини: прљавштине, масти и уља, погоршавају заварљивост па их је потребно одстранити из зоне топљења, у оквиру припреме за заваривање [1].

Глобалну оцену појединачно објашњених компонената заварљивости представља **општа заварљивост**. Заварљивост је комплексна особина конструкционог дела која зависи од утицајних фактора као што су :

- особина материјала – хемијски састав, начин производње, термичка обрада;
- конструкције – дебљине, комплексност завареног споја и
- технологије заваривања – доведена количина топлоте, садржај водоника, врста додатног материјала, итд.

Способност за заваривање неког материјала одређују његове особине и промене особина које настају у процесу заваривања. Основни проблеми заварљивости метала и легура своде се на њихова својства која се траже после заваривања. Коначна својства за дати материјал зависе од процеса и појава који настају у основним зонама завареног споја:

- у шаву, где се основни материјал потпуно топи и меша са додатним а затим очвршћава,
- у прелазој зони – зони стапања – зони полуистопљеног материјала и
- у зони утицаја топлоте (ЗУТ-у), где материјал трпи промене услед загревања и хлађења у чврстом агрегатном стању.

Као најважнији критеријум за оцену заварљивости јесте непрекидност тј. метални континуитет завареног споја. Заварени спој може бити нарушен појавом прслина одређене величине и распореда. Заварљивост је задовољавајућа ако после израде конструкционог дела особине шавова и зоне под утицајем топлоте задовољавају конструкционе захтеве и степен сигурности конструкционог дела [10].

4.2 Методе за испитивање заварљивости

При оцени заварљивости треба увек узети у обзир узајамну везу између конструкције техничког система (крутост конструкције, димензије саставних елемената, врсту и облик споја и др.), својства материјала (њихова заварљивост) и технологије (могућност извођења одређеног поступка спајања). Због међузависности ових фактора није увек могуће оценити заварљивост само једном врстом практичних проба [11].

Најважнији критеријум за оцену заварљивости је хомогеност споја (механички континуитет - континуум), која може бити нарушена грешкама у облику: заједа, неметалних укључака, пора, гасних мехурова, непровара и прслина.

Поред хомогености битан је и критеријум механичких својстава споја (својства отпорности, тврдоћа, ударна жилавост и др.), при чему се ударна жилавост узима као најпоузданији показатељ, који прецизно реагује на сваку промену енергетских параметара.

У пракси су уобичајена два приступа за оцену заварљивости: *тестирање материјала* и *потврда примењене технологије*. Тестирањем материјала проверава се да ли основни материјал одговара за пројектовану конструкцију, а потврда примењене технологије добија се испитивањем пробних узорака. На овај начин одређују се нивои заварљивости (добра, условна или лоша заварљивост), и доноси оцена о погодности и могућностима спајања испитиваних материјала одабраном технологијом. Заварљивост метала је у директној вези са могућим грешкама у завареним спојевима. Ове грешке смањују еластичност и жилавост, а повећавају склоност ка кртости и појави лома [11].

Полазна основа за процену заварљивости је испитивање основног материјала. На основу добијених резултата одређују се и евентуалне мере за побољшање заварљивости. Због специфичних услова формирања завареног споја, неизбежних грешака у завару и зони утицаја топлоте, нема метала који поседује идеалну заварљивост. Најчешће грешке су: *непровар*, *порозност*, *заједи*, *укључци трске* и *прслине*. У пракси се не може никад постићи идеална заварљивост, јер се ниједном заваривачком технологијом не може добити спој потпуно истих физичко - хемијских својстава материјала у завару, зони утицаја топлоте и основном материјалу. Зато се критеријуми за оцену заварљивости свode на процену потребних вредности усвојених показатеља заварљивости. Полазна основа је испитивање заварљивости основног материјала, затим избор додатог материјала и најзад њихова међусобна заварљивост [11].

Методe за оцену заварљивости могу бити [1]:

- рачунске и
- експерименталне.

Подаци потребни за успешну оцену заварљивости наведеним методама су:

- хемијски састав основног материјала,
- дебљина, тип и крутост споја и
- начин заваривања.

4.2.1 Рачунске методе за оцену заварљивости

Рачунске методе за оцену заварљивости челика односе се углавном на израчунавање одређених параметара на основу чијих вредности се процењује максимална очекивана тврдоћа у зони утицаја топлоте, критична брзина хлађења, очекивана структура споја и др. На основу ових параметара доноси се одлука да ли се заваривање изводи без предгревања или са предгревањем, односно одређује се

технологија извођења процеса. Постоје више рачунских метода а неке од њих су: *одређивање хемијски еквивалентног угљеника (CE), прорачун параметара предгревања по Сеферијану, BWRА метода*, као и коришћење *Шефлеровог дијаграма, КН-дијаграма и параметарских једначина* [11].

Метода хемијски еквивалентног угљеника (CE), заснива се на хемијском саставу челика и дебљини радних предмета према формулама различитих аутора. На склоност челика ка појави прслина утиче и брзина хлађења, па се за оцену заварљивости мора узети у обзир и дебљина материјала спајаних елемената. Ова метода даје само грубу процену па се углавном користи за оцену заварљивости нелегираних - угљеничних челика. За закаљиве угљеничне челике CE се израчунава помоћу израза [11]:

$$CE = C + \frac{Si}{4} + \frac{Mn}{4}, \% \quad (4.1)$$

Из израза 4.1 се запажа да повећање садржаја угљеника утиче на погоршање заварљивости четири пута више од пратећих елемената Si и Mn. За угљеничне челике са додацима мангана и осталим елементима Cr и Mo, који повећавају склоност ка закаљивању, а погоршавају заварљивост, користи се израз:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4}, \% \quad (4.2)$$

У формулама за CE хемијски симболи појединих елемената означавају њихове процентуалне садржаје у челику. У пракси се ипак највише користи следећи израз:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15}, \% \quad (4.3)$$

Проучавањем утицаја CE на тврдоћу у ЗУТ-у установљена је корелациона веза:

$$HV_{max} = 1200 CE - 200 \text{ и}$$

$$HV_{min} = 1200 CE - 260.$$

Она важи у границама $0.2\% < CE < 0.6\%$, јер за веће вредности CE веза више није линеарна. Уз велика упрошћења, занемаривањем низа других утицајних фактора, може се прихватити да је челик заварљив ако коначна тврдоћа у ЗУТ-у није већа од 350 HV, јер се сматра да се до ове вредности не формира мартензитна структура. Ова гранична тврдоћа одговара вредности $CE = 0.45\%$, па се усваја да су челици са $CE < 0.45\%$ заварљиви без примене посебних мера. Челици са $CE > 0.45\%$ су незаварљиви или условно заварљиви уз примену посебних мера (предгревање, жарење и сл.).

За постизање захтеваних карактеристика завареног споја, неопходно је правилно утврђивање услова заваривања. Један од тих услова, можда и основни, јесте предгревање. Предгревање подразумева постепено и равномерно загревање радних предмета пре заваривања на одређену температуру и одржавање те температуре у току заваривања, све до завршетка процеса. Предгревање може бити локално и потпуно. Потпуно се предгревају делови мањих димензија док се локално користи за веће делове и представља јефтинији начин загревања дела. Разлози за примену предгревања су:

- утицај на брзину хлађења у ЗУТ-у,
- утицај на дифузију водоника у шаву,
- смањење термичких напона при заваривању и
- смањење количине топлоте потребне за топљење метала високе топлотне проводљивости и др.

Температура предгревања (T_p) мора бити оптимална и једнака за све време заваривања. Не треба бити ни прениска, тада предгревање не би имало сврху али не треба бити ни превисока како не би дошло до деградације својстава материјала. Предгревање се користи у више случајева: када је хемијски еквивалент угљеника већи од 0.40%, када се заварује на ниским температурама (нижим од $+5^\circ\text{C}$), код материјала добре топлотне проводљивости (Cu, Al, Ag...) и код делова велике дебљине.

Метод Сеферијана, заснован је на увођењу укупног еквивалентног угљеника, где се поред хемијског састава челика узима у обзир дебљина завариваних елемената и брзина хлађења. Ова метода се најчешће користи за оцену заварљивости нисколегираних челика. Сеферијан је извео израз за укупни еквивалентни угљеник који гласи:

$$[C] = [C]_h + [C]_s \quad (4.4)$$

где су:

$$[C]_h = C + \frac{Mn+Cr}{9} + \frac{Ni}{18} + \frac{7Mo}{90}, \% \quad (4.5)$$

$[C]_h$ - хемијски еквивалентни угљеник,

$[C]_s$ - еквивалентни угљеник дебљине (s у mm),

Па се добија:

$$[C] = [C]_h \cdot (1 + 0.005 \cdot s), \% \quad (4.6)$$

За условно заварљиве челике Сеферијан је предложио емпиријски израз (4.7) за одређивање T_p , који је добијен као резултат испитивања расподеле тврдоће у зони испод навара различитих нисколегираних челика.

$$T_p = 350 \cdot (1 + 0.005 \cdot s), \% \quad (4.7)$$

Шефлеров дијаграм се користи за анализу међусобне заварљивости челика различитих физичко-хемијских својстава, као што су самозакаљиви нисколегирани челици. Структура метала заваара не зависи само од својстава основног и додатног материјала, већ и од степена њиховог мешања, јер су у питању хетерогени спојеви. Намењен је за избор додатних материјала да би се добили добри хетерогени спојеви, успешно се примењује и при добијању хомогених спојева легираних Cr-Mo и високолегираних Cr-Ni челика [11].

Дијаграми континуалног хлађења (КН-дијаграми), могу корисно послужити при разматрању заварљивости различитих конструкционих челика код којих се морају узети у обзир утицаји температурских циклуса на структуру и тврдоћу у зони утицаја топлоте.

4.2.2 Експерименталне - практичне методе

Практично одређивање заварљивости заснива се на проучавању појаве прслина у завареном споју у:

- току процеса заваривања,
- непосредно после тога или
- после одређеног временског периода (48 сати).

На технолошким пробама и испитивању механичких својстава заварених спојева, заснован је велики број експерименталних метода. Код највећег броја експерименталних метода, практичне пробе се изводе тако, што се испитивани спојеви излажу температурском циклусу (стварном или симулираном), локално или на целом испитиваном узорку. Степен насталих промена у споју одређује се познатим методама испитивања механичких својстава материјала (затезањем, савијањем, мерењем тврдоће, одређивањем ударне жилавости и др.). Резултати насталих промена процењују се упоређивањем резултата практичних проба пре и после дејства температурског циклуса. Због осетљивости на појаву прслина и опасности од појаве кртог лома код челика повишене јачине, врло често се практичним пробама одређују све врсте промена, а посебно се испитује појава прслина у металу завара или навара, зони утицаја топлоте, и основном материјалу, по систему „јавља се - не јавља се“ [11].

При оцењивању заварљивости челика, полази се од тога да заварени спој мора најпре да буде хомоген, тј. без присутних икаквих прслина, микропрслина, неметалних укључака, пора, непроварених места и тсл. Поред основног услова хомогености, заварени спој мора да поседује и одређене особине које се од њега очекују у процесу експлоатације. Грешке које се могу јавити у завареном споју се могу поделити у две групе:

- површинске (прслине, непровар, заједи) и
- просторне или запреминске (укључци троске, гасни мехурови и тсл.).

Присуство грешака у споју не значи увек и губитак радне способности заварене конструкције. У последње време се допушта присуство одређених врста грешака али на конструкцијама мање важности, чија евентуална хаварија услед експлоатације не може да доведе до великих материјалних губитака или људских жртава. Са друге стране, за конструкције високог степена одговорности заварени спој мора бити изведен без грешака. Грешке највише утиче на начине оштећења као што су крти лом и разарање услед замора. На ова оштећења највише утичу површинске грешке.

Најопасније су свакако прслине, јер изазивају високу концентрацију напона. За металне материјале, посебно челике, у оквиру заварљивости најбитније је одредити склоност материјала ка:

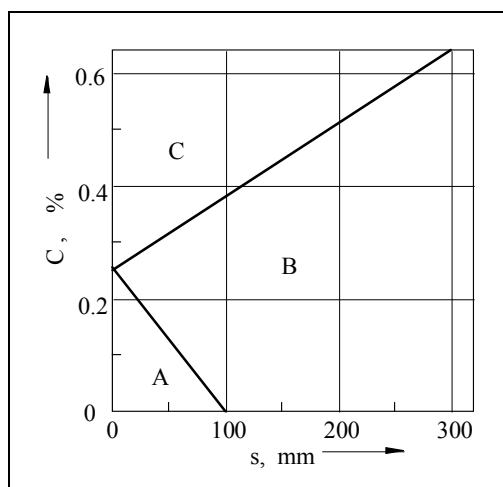
- појави хладних прслина,
- појави топлих прслина,
- појави ламеларних прслина и
- појави прслина жарења и кртом лому.

У пракси се најчешће јављају хладне прслине и издвајају се на првом месту као главна опасност за заварене конструкције, али не треба занемарити и друге типове прслина, јер и они такође могу довести до отказа завареног споја. Експерименталне методе испитивања заварљивости заснивају се на изучавању појаве прслина у завареном споју и то у току заваривања, непосредно после заваривања или у року од 48h после заваривања.

4.3 Оцена заварљивости угљеничних челика

Да би се применила оцена заварљивости потребно је познавање података као што су: хемијски састав основног и додатног материјала, облик, дебљина и врста споја, примењени поступак и начин извођења споја и др. Угљенични челици намењени су углавном за заварене конструкције које су оптерећене статичким оптерећењима. Сматра се да су добро заварљиви ако јачина споја одговара јачини основног материјала, и када нема прслина у зони споја, као ни великог пада пластичности у прелазној зони.

За грубу оцену заварљивости угљеничних челика, користи се дијаграм приказан на слици 4.1, где се на основу дебљине материјала и садржаја угљеника изводи класификација заварљивости на групе угљеничних челика (А, В, С) [11].



Слика 4.1 Дијаграм за оцену заварљивости нелегираних челика: А-заварљиви, В-заварљиви са предгревањем, С-заварљиви са предгревањем и накнадном термичком обрадом [11]

Угљенични челици који садрже $C \leq 0.25\%$, $Mn \leq 0.4\%$, $Si \leq 0.3\%$, и $P < 0.05\%$ и $S < 0.05\%$, сматрају се добро заварљивим. Процена заварљивости према хемијском саставу челика је оријентациона метода која се заснива на израчунавању тзв. хемијски еквивалентног угљеника (CE), који исказује познату чињеницу да се са повећањем садржаја угљеника погоршава заварљивост. За закаљиве угљеничне челике хемијског састава $Mn > 0.4\%$ и $Si > 0.3\%$ CE се израчунава помоћу израза:

$$CE = C + \frac{Si}{4} + \frac{Mn}{4}, \% \quad (4.8)$$

одакле произлази, да повећање садржаја угљеника утиче на погоршање заварљивости четири пута више од пратећих елемената Si и Mn.

За угљеничне челике који још имају додатке Cr и Mo испод граничног садржаја за легирајуће елементе $Cr < 0.30\%$ и $Mo < 0.08\%$, а при том повећавају склоност ка закаљивању и погоршавају заварљивост, користи се израз:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4}, \% \quad (4.9)$$

Сматра се, да су добро заварљиви угљенични челици, имају $CE < 0.45\%$ и дебљину $s \leq 25\text{ mm}$, односно $CE < 0.41\%$ за $s > 25\text{ mm}$. Челици који се по CE и s не уклапају у ове границе, сматрају се условно заварљивим [11].

5. ПРЕГЛЕД НАЈВАЖНИЈИХ МЕТОДА ЗАВАРИВАЊА

Заваривање се дефинише као процес израде нераздиојивог споја успостављањем међуатомских веза између делова који се заварују, при коме се појединачно или комбиновано користи топлотна и механичка енергија, а по потреби и додатни материјал.

Најчешћа примена заваривања је за израду носећих металних конструкција спајањем појединих делова – лимова и профила, за израду процесне опреме – посуда и цевовода под притиском, и за поправку поломљених или истрошених металних делова.

5.1 Гасно заваривање

Гасно заваривање (слика 5.1) је поступак спајања метала топљењем и очвршћавањем основног и (по потреби) додатног материјала помоћу пламена добијеног сагоревањем горивог гаса. Најчешће се користе гориви гасови на бази угљоводоника: метан (CH_4), ацетилен (C_2H_2) и пропан (C_3H_8), док се у неким областима заваривања и сродним поступцима користе и други гасови. Количина топлоте ослобођена сагоревањем, као и највиша температура пламена, зависе од врсте горивог гаса [4].

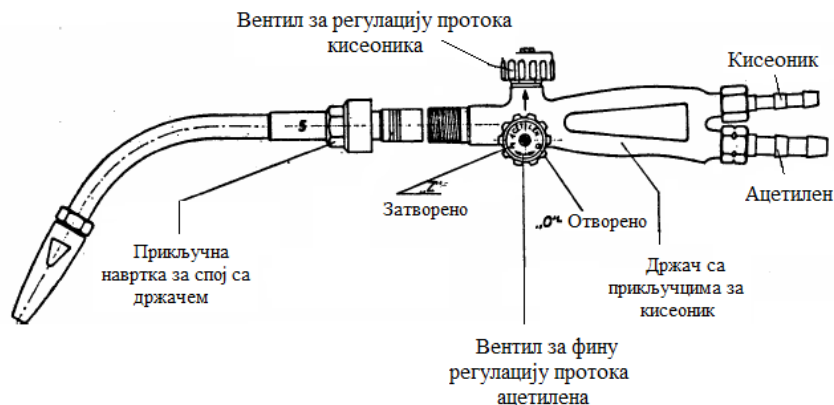
Овај поступак се често користи у пракси за заваривање материјала мањих дебљина због низа техно - економских предности. Добра страна поступка гасно - пламеног заваривања је могућност бољег проваривања корена и боље праћење кретања тока растопа при заваривању танких делова. Инвестициона улагања у опрему су мала уз велику покретљивост апаратуре, што омогућује заваривање и на терену где понекад нема других извора енергије [1].



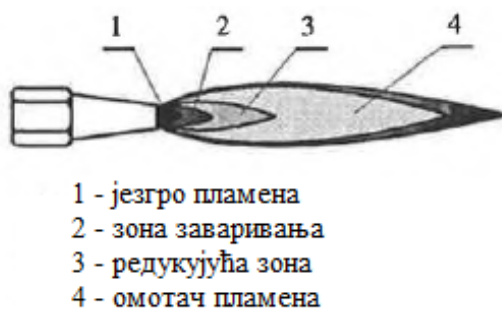
Слика 5.1 Поступак гасног заваривања [19]

Главни уређај за гасно заваривање је *горионик* (слика 5.2), на чијем се излазу пали гориви гас и сагорева у смеси са кисеоником, формирајући пламен (слика 5.3). Заваривање се остварује топљењем ивица основног и додатног материјала, или код танких лимова без додатног материјала [4].

При заваривању многих легура гвожђа и нежелезних метала (бабра, алуминијума) употребљавају се топитељи. Они имају улогу да заштите растопљени метал од оксидације да разложе већ образоване оксиде и обезбеде чисте површине метала на месту спајања и самим тим поспеше везивање додатног материјала са основним.



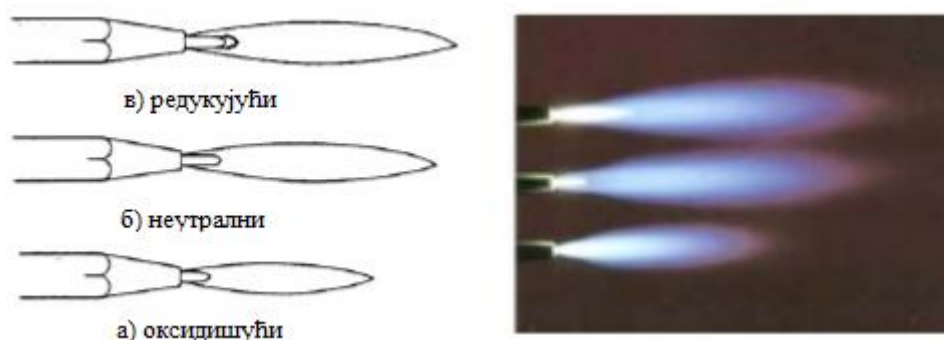
Слика 5.2 Горџоник са наставцима за сечење, заваривање и загревање помоћу гаса [20]



Слика 5.3 Пламен са основним компонентама [1]

За заваривање и сечење *гориви гас* је пре свега ацетилен C_2H_2 . Други гориви гасови, као што су водоник, нафтни гас, коксни гас, земни гас, метан, бензинске паре не користе се за заваривање челика због ниске температуре пламена и јаког оксидишућег дејства. Могу бити коришћени за предгревање, жарење или сечење, као и за заваривање неких нискотопљивих метала. Подразумева се да гориви гасови сагоревају у струји кисеоника, ако није наглашено другачије. Зависно од односа O_2/C_2H_2 разликују се: *неутрални*, *редукујући* и *оксидишући пламен*. Заваривачки пламен који се добија из приближно једнаких запремина ацетилена и кисеоника доведеног из боце зове се **неутрални пламен** (слика 5.4б). Он одговара односу $O_2/C_2H_2 = 1.0$ до 1.2 и примењује се за заваривање челика, бабра, олова, цинка и неких врста бронзи. Пламен овог односа углавном не погоршава особине основног материјала. **Редукујући пламен** (слика 5.4в) садржи вишак ацетилена ($O_2/C_2H_2 < 1$) који наугљенишава заваривачко купатило, шав је тврд, крт и често порозан. **Оксидишући пламен** (слика 5.4а) садржи вишак O_2 којим се оксидише растопљени метал заваривачког купатила (купке) и сагоревају неки његови састојци ($O_2/C_2H_2 > 1.2$).

Примењује се при заваривању месинга и неких врста бронзи. Код челика се не користи јер оксиди растворени у металу шава смањују његову једину, јачину и жилавост, тј. све корисне особине споја [1].



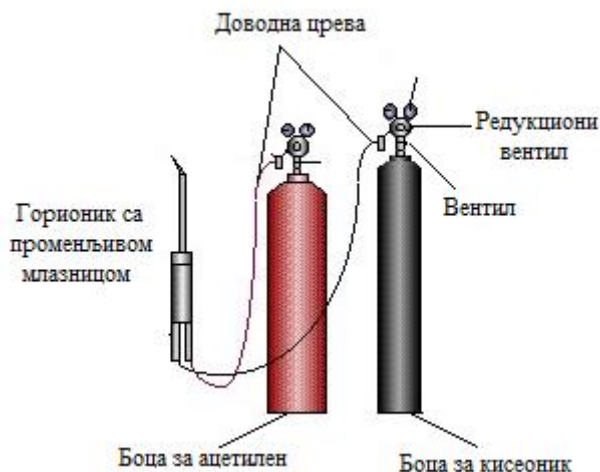
Слика 5.4 Врсте окси – ацетиленског пламена [1,21]

Према брзини истецања смеше $O_2 + C_2H_2$ из млазнице разликују се [1]:

- *меки пламен* чија је излазна брзина смеше мања од 100 m/s, пламен је нестабилан, а ипак се користи за заваривање високолегираних челика, метала са ниском температуром топљења и лемљење,
- *средњи пламен* чија је излазна брзина смеше 100÷120 m/s, најчешће се користи у свакодневној пракси заваривања гасним пламеном и
- *оштар пламен* одговара брзини смеше већој од 120 m/s, због великог динамичког притиска гасне смеше добија се узбуркан растоп што ствара грешке у шаву.

За заваривање челика употребљавају се разне врсте **додатних материјала** (жица) који се бирају зависно од врсте завариваног челика. Неопходно је да жице буду глатке и чисте, тј. без оксида, масти, боја и других нечистоћа. Треба их чувати и од влаге. У случају појаве корозије, потребно је да се жице пре употребе очисте брусним папиром [1].

Опремену за гасно заваривање (слика 5.5) чине боце за кисеоник и ацетилен, редуccionи вентили, доводна црева, горионик са променљивом млазницом и помоћни алат.



Слика 5.5 Опрема за гасно заваривање [22]

У зависности од врсте техничког гаса разликују се **боце** намењене за компримоване гасове растворене под притиском и течне гасове. Боце за компримоване гасове пуне се: кисеоником, азотом, ваздухом, аргоним, водоником, земним гасом. Боце за гасове растворене под притиском пуне се ацетиленом. Боце за течне гасове пуне се са: угљендиоксидом (CO_2), пропаном и бутаном.

Редукциони вентил јесте уређај који снижава проток гаса из боце на радни притисак и одржава га константним независно од количине, односно притиска у боци. Редукциони вентил за ацетилен израђује се од челика, а за кисеоник и друге техничке гасове од ковног месинга. Вентил је снабдевен са два манометра од којих један показује притисак који тренутно влада у боци, а други радни притисак. Без обзира да ли је редукциони вентил намењен за једну или другу боцу, сматра се исправним ако одржава стални радни притисак и при пуној и готово празној боци.

Гумена црева служе за довод гаса из боце до горионика. Да не би дошло до међусобне замене црева се боје *црвено* – за ацетилен и *плаво* – за кисеоник.

Горионик се састоји из пламеника и држача. Пламеници су променљиви делови горионика и бирају се према дебљини завариваног материјала. Према конструктивном извођењу разликују се горионици ниског притиска ($p_{\text{acetilena}} < 0.1 \text{ bara}$) и високог притиска ($p_{\text{acetilena}} > 0.2 \text{ bara}$).

Осигурачи се уграђују да спрече продирање кисеоника и повратног пламена из коморе за мешање у црево за ацетилен па и у боцу за ацетилен [1].

Топитељи су средства у облику праха или паста неопходних за заваривање ливеног гвожђа, бакра, месинга, бронзи, алуминијума и нерђајућих челика и других легура. У току заваривања могу се образовати тешко топљиви оксиди, што омета стапање додатног и основног материјала. Наношењем топитеља, на додатни или основни материјал, штити се течан материјал од оксидације у процесу заваривања. Осим тога, топитељи разлажу - разграђују раније створене оксиде и преводе их у нискотопљиву и лаку троску, која се не раствара у течном металу већ испливава на површину.

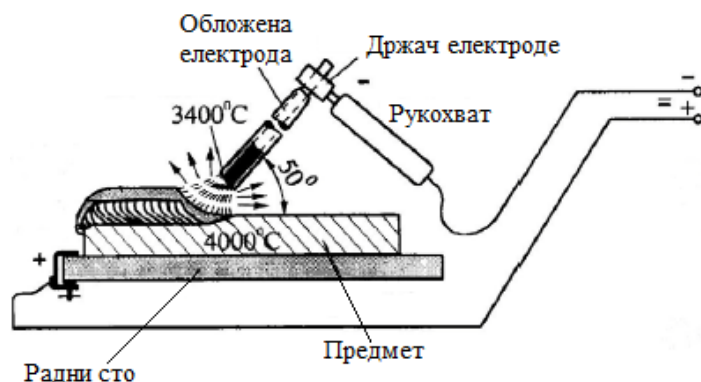
Према хемијском саставу, топитељи могу бити кисели или базични, а њихово дејство заснива се на чињеници да метали растварају сопствене оксиде, а оксиде других метала преводе у троску.

Разликују се три основне методе - технике гасног заваривања [1]:

- заваривање улево за метале дебљине испод 3 mm,
- заваривање удесно за метале дебљине преко 4 mm и
- заваривање на горе за метале свих дебљина.

5.2 Ручно - електролучно заваривање (REL)

Ручно-електролучно заваривање (слика 5.6) се сврстава у поступке заваривања топљењем које настаје дејством топлоте ослобођене у електричном луку. Заштита растопа од штетног деловања гасова из ваздуха остварује се помоћу облоге која садржи топитеље, а при топљењу образује троску и заштитне гасове. Заварују се угљенични, ниско и високолегирани челици, SL, легуре Ni, Cu, Al, дебљине 1 до 100 mm. Струја заваривања може бити једносмерна или наизменична, јачине 25-450 A, радног напона 15-40 V и брзине заваривања до 120 mm/min. Технологија REL заваривања се заснива на успостављању и одржавању лука између радног предмета и додатног материјала - електроде. Лук топи ивице основног материјала и врх електроде и образује купку течног метала заштићену од ваздуха слојем троске и гасовима.



Слика 5.6 Успостављање електричног лука код REL заваривања [23]

5.2.1 Прорачун технолошких параметара REL заваривања

Основни параметри REL заваривања су [1]:

- пречник електроде (језгра),
- јачина струје заваривања,
- радни напон,
- дужина лука и
- брзина заваривања.

Пречник електроде бира се на основу дебљине завариваног материјала, облика, димензија и положаја завареног споја. Обично се за корени завар узима електрода Ø3.25 mm, или мања а за остале заваре електрода већег пречника. За сучеони спој пречник електроде се бира из табеле 5.1. За извођење коренског завара код плоча дебљине веће од 10 mm треба усвојити электроду чији је пречник мањи за 1 mm од препоручене вредности.

Табела 5.1 Избор пречника електроде за сучеони спој

s, mm	2	3÷5	6÷8	9÷12	13÷15	16÷20	> 20
d, mm	2	3	3÷4	4÷5	5÷6	5÷6	5÷6

Електроде се деле [1]:

а) *Према степену легирања на:*

- нисколегиране,
- средњелегиране и
- високолегиране;

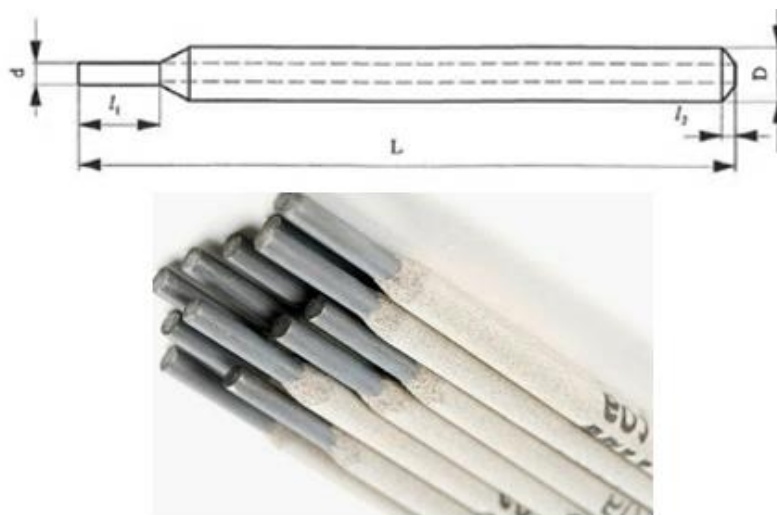
б) *Према дебљини облоге ($f = D/d$) на:*

- танкообложене ($f < 1.2$),
- средњеобложене ($1.2 \leq f < 1.4$) и
- дебелообложене ($f \geq 1.4$);

с) *Према намени:*

- за заваривање,
- за наваривање,
- за сечење и
- за жлебљење.

Данас се углавном примењују обложене електроде (слика 5.7) које се састоје од металног језгра и облоге. Основна улога облоге је да заштити растоп од спољне атмосфере, да стабилизује лук, да пречисти метал шав, да легира шав и да продужи његово време хлађења. Облога се топи у луку заједно са језгром и ствара заштитни гас CO₂ који потискује ваздух из зоне заваривања.



Слика 5.7 Обложена електрода код REL методе заваривања [1, 25]

Према металуршким карактеристикама облоге, електроде могу бити: киселе (оксид гвожђа), кисело - рутилне, базичне, целулозне, оксидне, рутилне - средња дебљина облоге, рутилне - дебела облога и друге. *Киселе облоге* садрже гвожђе - оксиде, манган - оксиде или силицијум - оксиде. Очврсла троска је у облику пчелињег саћа и лако се уклања. *Кисело-рутилне* су сличне претходним с тим што у облози садрже до 35% природног насталог оксида титан - рутила (TiO_2). *Базичне електроде* садрже у облози знатне количине калцијум - карбоната, јако су хигроскопне па се морају чувати на сувом или се пре употребе суше загревањем у пећи на температури од 350°C , задржавањем 2.5 h на тој температури и затим се хладе до 100°C и стављају у посуду константне температуре 100°C , из које се узимају за заваривање. *Целулозне* садрже у облози велике количине органских материја. Одликују се великом дубином уваривања [1].

Улога облоге електроде је да [1]:

- штити металну капљицу, купку и зону заваривања од кисеоника и азота из ваздуха (спољне атмосфере) где се најпре ствара заштитни гасни омотач око металне капљице на путу кроз лук,
- дезоксидише растоп, тј. редукује оксид гвожђа (FeO) из купке образујући оксиде других елемената који су нерастворљиви у гвожђу и прелазе у троску,
- легира метал шава хемијским елементима садржаним у облози,
- доприноси стабилизацији електричног лука (захваљујући једињењима K, Na, Ca и оксида Fe) и
- прекрива купку течном троском која као топлотни изолатор продужава време хлађења шава и штити га од ваздуха.

Јачина струје бира се у зависности од пречника електроде и типа облоге (киселе, базичне, рутилне), односно усваја се из препорука произвођача, у којима се дају

минималне и максималне вредности. За хоризонталан положај заваривања усвајају се максималне препоручене јачине струје, за вертикалне средње, а изнад главе минималне. Приближно се **јачина струје** може одредити помоћу израза [2]:

$$I = (20 \div 25) \cdot d \text{ за } d < 4 \text{ mm} \quad (5.1)$$

$$I = (35 \div 50) \cdot d \text{ за } d = 4.0 \text{ и } 5.0 \text{ mm} \quad (5.2)$$

$$I = (15 + 6 \cdot d) \cdot d \text{ за } d > 5 \text{ mm} \quad (5.3)$$

где су: I – јачина струје у А и

d – пречник електроде у mm.

Напон заваривања (радни напон) се може израчунати помоћу израза [2]:

$$U = 20 + 0.04 \cdot l, \text{ V или} \quad (5.4)$$

$$U = 12 + \frac{l \cdot d}{10} \cdot \frac{I}{A}, \text{ V} \quad (5.5)$$

где су: I – јачина струје у А,

$l = 3 \div 6$ – дужина лука у mm ($l \approx d$ – за рутилне и $l \approx d/2$ за базичне електроде),

$j = I/A$ – густина струје у A/mm² и

A – површина попречног пресека језгра електроде у mm².

Константа топљења се израчунава према изразу [2]:

$$D = \frac{m_d}{l \cdot d}, \frac{g}{A_{min}} \quad (5.6)$$

где је: m_d – део масе шава добијен топљењем електроде (језгро + облога) у g,

I – средња препоручена јачина струје заваривања у А,

t – време топљења у min.

Дужина лука мора бити константна како се не би угрозила његова стабилност као и заштита растопа. Да дужина лука не би расла при топљењу електроде заваривач мора да стално примиче электроду. За квалитет шава битно је да се одржава стална дужина лука и брзина заваривања. Да би дужина лука била иста, и како не би дошло до повећања, заваривач мора да примиче электроду оном брзином којом се она и топи.

Брзина заваривања дефинише степен истопљености страница, односно при великој брзини заваривања добија се уска гусеница и недовољно стапање ивица основног материјала што даље узрокује добијање порозних шавова јер се метално купатило брзо хлади па растворени гасови остају заробљени унутар споја (шава, ЗУТ-а). Са друге стране мала брзина заваривања доводи до предгревања материјала и преливања троске испред металног купатила, што може да створи укључке троске у

шаву. Такође долази до повећања сопствених напона и деформација, што даље погоршава механичке особине завареног споја. Брзина заваривања се израчунава према изразу [2]:

$$v_z = \frac{D \cdot I}{100 \cdot \rho \cdot A_n}, \frac{m}{h} \quad (5.7)$$

где је: D – константа топлёња у $g/A \cdot h$ ($D = 7 \div 12$ зависно од врсте електроде)

I – јачина струје заваривања у A ,

ρ – густина додатног материјала у g/cm^3 ,

A_n – површина попречног пресека завара у cm^2 .

Уколико је у питању вишеслојно заваривање, потребно је одредити укупан број пролаза, полазећи од површине попречног пресека жлеба и пресека одговарајућих завара. Ако се узме у обзир и надвишење шава потребан број пролаза за попуњавање жлеба (n) се може одредити помоћу израза:

$$n = \frac{A - A_1}{A_n} + 1 \quad (5.8)$$

где је: A – површина попречног пресека жлеба у mm^2 ,

$A_1 = (6 \div 8) \cdot d$ – површина пресека првог завара у mm^2 ,

$A_n = (8 \div 12) \cdot d$ – површина пресека осталих завара у mm^2 ,

d – пречник електроде (језгра) у mm .

Преко **линијске енергије заваривања** међусобно су повезани основни енергетски параметри електролучног заваривања (U, I, v_z):

$$q_l = \frac{U \cdot I}{v_z} \cdot \eta, \frac{J}{cm} \quad (5.9)$$

Линијска енергија заваривања мора бити константна дуж целог шава. q_l се још назива и погонском енергијом заваривања а η степеном искоришћења топлотне енергије. **Дубина уваривања** повезана је директно са линијском енергијом заваривања и одређује се по следећим изразима:

$$\delta = (0.3 \div 0.5) \cdot r_1, cm \quad (5.10)$$

$$r_1 = 0.00537 \cdot \sqrt{q_l}, cm \quad (5.11)$$

Опрема за REL поступак приказана је на слици 5.8.

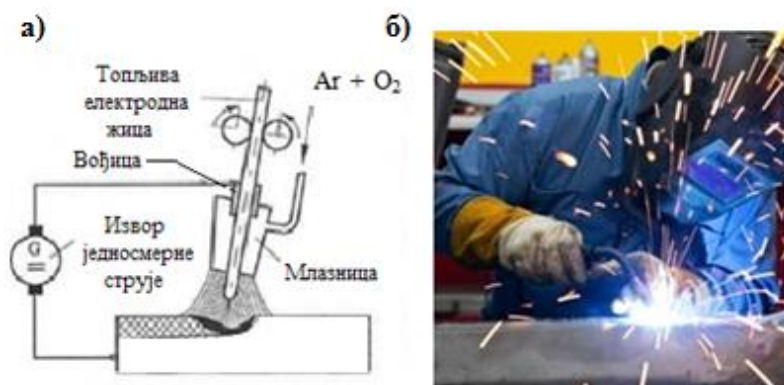


Слика 5.8 Опрема за REL поступак заваривања [24]

5.3 MIG/MAG заваривање

MIG поступак (слика 5.9а, 5.9б) заснива се на континуалном довођењу и топљењу додатног материјала у виду електродне жице у заштити инертних гасова, аргона и/или хелијума. Веома је сличан MAG поступку, с тим што се као што је већ наглашено, поред другог заштитног гаса, користи и другачији пиштољ. Скоро све врсте нерђајућих челика могу се успешно заваривати у заштити инертних гасова. MIG поступак се најчешће примењује за заваривање легираних челика и нежелезних метала дебљине до 20 mm, помоћу жице пречника 1÷2.5 mm [1].

Додавањем 3-5% кисеоника аргону, умањује се потребна јачина струје. Заваривање се изводи полуаутоматски или аутоматски једносмерном струјом обрнутог поларитета (жичана електрода везана је за + пол). Потребно је одржавати што краћи извучени – слободни део жичане електроде и одабрати оптималну брзину заваривања и потрошњу заштитних гасова ради спречавања продирања ваздуха у зону истопљеног метала [1].



Слика 5.9 MIG поступак заваривања [1, 26]

Основне карактеристике-**предности** MIG поступка заваривања су [1]:

- заваривање је могуће у свим положајима,
- јачина струје је у опсегу $I = 150 \div 500 \text{ A}$,
- напон заваривања $U = 20 \div 30 \text{ V}$,
- брзина заваривања $v_z = 6 \div 90 \text{ m/h}$,

- проток аргона: $Q = 20 \text{ l/min}$, струјање – ламинарно,
- спољна карактеристика извора: равна (пад 2 V на 100 A), $U \approx \text{const.}$ и
- струја заваривања: једносмерна обрнутог поларитета (E+).

Док су са друге стране **мане** поступка следеће [4]:

- 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) и
- тешкоће при заваривању на отвореном (струјање ваздуха).

Овим поступком се углавном заварују материјали дебљи од 3 mm у свим положајима. Употребљава се најчешће електродна жица пречника 1.6 mm, а за материјале дебље од 8 mm треба применити још и предгревање. Могу се применити пуне жице (на бази челика, Al, Cu – зависно од основног материјала) и пуњене жице (челичне фолије се пуне спрашеним металима и топитељима: рутилом TiO_2 и кречњаком CaCO_3 и сл.). Заштитни гасови (Ar, He) штите заварени спој од штетног утицаја околине [1].

5.3.1 Прорачун технолошких параметара MIG заваривања

Најбитнији параметри MIG поступка заваривања су радни напон и јачина струје, брзина додавања електродне жице и проток заштитног гаса, у овом случају аргона. Јачина струје и напона зависе од пречника жице и могу се израчунати према следећим изразима:

Јачина струје заваривања ($I_{1,2}$ и $I_{1,6}$) за пречнике жице $d = 1.2$ и $d = 1.6 \text{ mm}$ рачуна се према следећим изразима [2]:

$$I_{1,2} = 308 \cdot \log v_t - 17, \text{ A} \quad (5.12)$$

$$I_{1,2} = 378 \cdot \log v_t - 26, \text{ A} \quad (5.13)$$

Напон заваривања (радни напон) [2]:

$$U = 14 + 0.05 \cdot I, \text{ A} \quad (5.14)$$

Брзина топљења електродне жице ($v_t = 1.2 \div 25 \text{ m/min}$) зависи од брзине заваривања, површине жлеба али и од њеног пречника. Довођење жице мора бити континуално како би се метално купатило равномерно и непрестано снабдевало додатним материјалом. Рачуна се помоћу израза:

$$v_t = \frac{0.012732 \cdot A_z \cdot v_z}{d^2}, \text{ cm/min} \quad (5.15)$$

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

$$m_{1.2} = 0.64 + 0.11 \cdot M + 0.14 \cdot M^2, \frac{g}{s} \quad (5.16)$$

$$m_{1.6} = 0.64 + 0.55 \cdot M + 0.055 \cdot M^2, \frac{g}{s} \quad (5.17)$$

Брзина заваривања (v_z) се рачуна по изразу [2]:

$$v_z = \frac{m \cdot 6000}{A_z \cdot \rho}, \text{ cm/min} \quad (5.18)$$

где је: m – маса депонованог материјала у g/s,

A_z – површина завара у mm^2 и

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

Број пролаза (n) се може одредити на основу површине попречног пресека жлеба A и завара A_z :

$$n = \frac{A}{A_z}, \quad (5.19)$$

Маса завара (M) на дужини од 1 cm може се израчунати на основу усвојеног пресека завара, као маса која је потребна за попуњавање дела жлеба дужине $L = 1 \text{ cm}$:

$$M = \rho \cdot V = \rho \cdot A_z \cdot L, \text{ g} \quad (5.20)$$

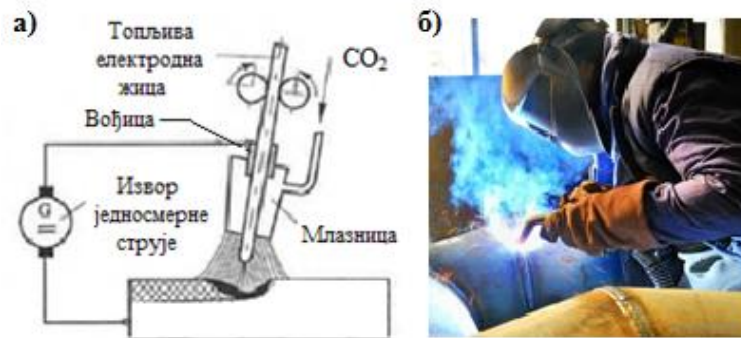
где је: $\rho = 7.86 \text{ g/cm}^3$ – густина електродне жице,

$V = A_z \cdot L$ – јединична запремина завара на дужини од 1 cm,

A_z – усвојена површина попречног пресека једног завара cm^2 ,

$L = 1 \text{ cm}$ – јединична дужина завара.

Код **MAG заваривања** (слика 5.10а и 5.10б), електродна жица пречника $0.8 \div 2.5 \text{ mm}$ уједно је и додатни материјал. На високој температури у луку, део гаса CO_2 разлаже се на CO и O_2 што значи да је CO_2 активан гас у току процеса заваривања. CO_2 поступак користи се за заваривање нискоугљеничних и нисколегираних челика дебљине $0.8 \div 30 \text{ mm}$. Лук се успоставља додиром врха електродне жице и основног материјала [2].



Слика 5.10 MAG поступак заваривања [1, 27]

Основне карактеристике MAG поступка заваривања су [1]:

- заваривање је могуће у свим положајима,
- параметри заваривања су: јачина струје $I = 40 \div 500$ А, напон лука $U = 16 \div 35$ V, брзина заваривања $v_z = 15 \div 60$ m/h,
- спољна карактеристика извора: равна (пад 2 V на 100 А) и
- струја заваривања: једносмерна обрнутог поларитета.

На квалитет завареног споја утичу дужина извученог (слободног) дела електродне жице, положај жичане електроде (пиштоља за заваривање) у одосу на раван споја, удаљеност млазнице за гас од површине радног комада, врста заштитног гаса и његова потрошња, поларитет жичане електроде, положај заваривања, променљиви индуктивитет и тсл. Прорачунски параметри заваривања служе као полаз за избор режима заваривања у заштити CO₂. У табелама 5.2 и 5.3 дате су препоруке за избор режима заваривања нискоугљеничних и нисколегираних конструкционих челика[1].

Табела 5.2 Режији полуаутоматског и аутоматског заваривања сучеоних спојева у заштитном гасу CO₂ [1]:

Дебљина материјала	Зазор	Број пролаза	Пречник електродне жице	Струја заваривања	Напон	Брзина заваривања	Проток гаса
mm	mm	/	mm	A	V	m/h	l/min
0.6 ÷ 1.0	0.5 ÷ 0.8	1	0.5 ÷ 0.8	50 ÷ 60	18 ÷ 20	20 ÷ 25	6 ÷ 7
1.2 ÷ 2.0	0.8 ÷ 1.0	1 ÷ 2	0.8 ÷ 1.0	70 ÷ 100	18 ÷ 20	18 ÷ 24	10 ÷ 12
3 ÷ 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

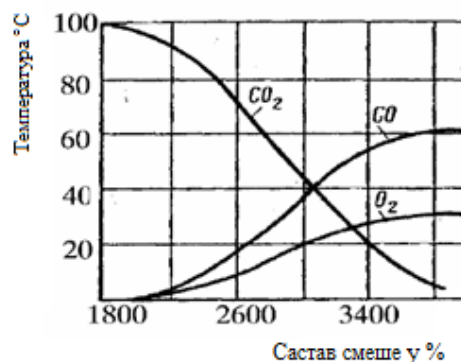
Табела 5.3 *Режими полуаутоматског и аутоматског заваривања угаоних спојева у заштитном гасу CO₂ [1]:*

Дебљина материјала	Пречник електродне жице	Категорија шави	Број пролаза	Струја заваривања	Напон	Брзина заваривања	Слободни део електроде	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	1	300 ÷ 350	30 ÷ 32	24 ÷ 26	20 ÷ 24	18 ÷ 20
11 ÷ 13	2.0	11 ÷ 13	1	300 ÷ 350	30 ÷ 32	24 ÷ 26	20 ÷ 24	18 ÷ 20
13 ÷ 15	2.0	13 ÷ 15	1	300 ÷ 350	30 ÷ 32	24 ÷ 26	20 ÷ 24	18 ÷ 20

Примена активних гасова захтева посебну пажњу како не би дошло до појаве оксидације. До оксидације долази када се CO₂ користи као заштитни гас, јер се тада одиграва следећа хемијска реакција [1]:



Смер ове реакције зависи првенствено од температуре, па се тако на вишим температурама одвија разлагање гасова, а на нижим температурама спајање гасова. Због тога састав гасне смеше зависи од температуре (слика 5.11). Оксидација ће бити далеко најизраженија у средишњем делу електричног лука, где је температура највиша, а најмање изражена на површини металне купке, где је температура знатно нижа.



Слика 5.11 *Састав гасне смеше код MAG поступка [4]*

5.3.2 Прорачун технолошких параметара MAG заваривања

Уколико се извођење сучеоних и угаоних спојева врши у хоризонталном положају, параметри MAG заваривања могу се приближно израчунати на основу полазних података као што су пречник електродне жице, врста споја и облик шав. Пречник електродне жице бира се на основу дебљине материјала. Дате су препоруке за сучеони спој (табела 5.4) односно за дебљине шав код угаоних спојева (табела 5.5).

Табела 5.4 Избор пречника електродне жице – сучеони спој

s, mm	< 2	2 - 20	10 - 30
d, mm	0.8	1.2	1.6

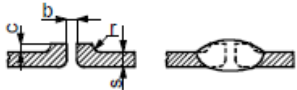
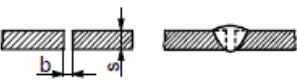
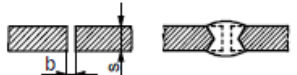
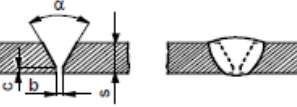
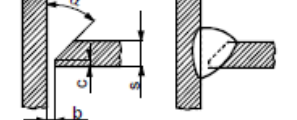
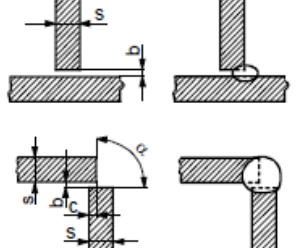
Табела 5.5 Избор пречника електродне жице – угаони спој

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

У зависности од дебљине делова и врсте споја, бирају се облик и димензије жлеба према подацима датим у табели 5.6. Треба знати да код дебљих пресека жлебови треба да имају мањи размак, мање затупљење као и мањи угао отвора жлеба него за остале поступке заваривања топљењем. Сама припрема странице жлеба може се извести на више начина, било да је то механичка, термичка или комбинована припрема. Тако се нпр. механичким поступцима странице закошавају скидањем струготине (тестерисање, рендисање, брушење и тсл.). Такође је могуће и термичко закошење страница гасним сечењем у смеши ацетилена и кисеоника или резање плазмом.

Веома је важно напоменути да се странице пре закошења морају добро очистити и одмастити, а по потреби и предгрејати гасним пламеном на $100 \div 150^{\circ}\text{C}$ (око 10 min) у циљу отклањања влаге.

Табела 5.6 Припрема страница за заваривање у заштити активног гаса (CO_2) [1]

Врста шав	Попречни пресек жлеба 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	-	-
		$2 \div 3$	-	≤ 0.8	-	-
		$3 \div 6$	-	≤ 1	-	-
Двострани I - шав		$6 \div 12$	-	$1 \div 3$	-	-
V - шав		$5 \div 50$	-	≤ 2	$1.5 \div 2.5$	-
$\frac{1}{2}$ V - шав		$3 \div 16$	-	≤ 2	$1.5 \div 2.5$	-
Угаони шав		> 1	-	≤ 2	-	-
		$1 \div 4$	90	≤ 2	≤ 2	-
		> 4	$60 \div 90$	≤ 2	≤ 2	-

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 [2]:

$$I_{1.2} = 308 \cdot \log v_t - 17, A \quad (5.22)$$

$$I_{1.6} = 378 \cdot \log v_t + 26, A \quad (5.23)$$

Напон заваривања (радни напон) [2]:

$$U = 14 + 0,05 \cdot I, V \quad (5.24)$$

Брзина заваривања (v_z) се рачуна по изразу [2]:

$$v_z = \frac{m \cdot 6000}{A_z \cdot \rho}, \text{ cm/min} \quad (5.25)$$

где је: m – маса депонованог материјала у g/s,

A_z – површина завара у mm^2 и

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

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

$$v_t = \frac{0.012732 \cdot A_z \cdot v_z}{d^2}, \text{ cm/min} \quad (5.26)$$

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

$$m_{1.2} = 0.64 + 0.11 \cdot M + 0.14 \cdot M^2, \frac{\text{g}}{\text{s}} \quad (5.27)$$

$$m_{1.6} = 0.64 + 0.55 \cdot M + 0.055 \cdot M^2, \frac{\text{g}}{\text{s}} \quad (5.28)$$

Број пролаза (n) се може одредити на два начина:

- према подацима за различите дебљине лима (таб.5.7):

Табела 5.7 Избор броја пролаза у зависности од дебљине ОМ

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

- или на основу површине попречног пресека жлеба А и зава А_z:

$$n = \frac{A}{A_z} \quad (5.29)$$

где је: $A_z = 0.0625 \div 0.64$ cm² зависно од пречника жице, врсте жлеба и тсл.

Маса зава (М) на дужини од 1 cm може се израчунати на основу усвојеног пресека зава, као маса која је потребна за попуњавање дела жлеба дужине $L = 1$ cm:

$$M = \rho \cdot V = \rho \cdot A_z \cdot L, \text{ g} \quad (5.30)$$

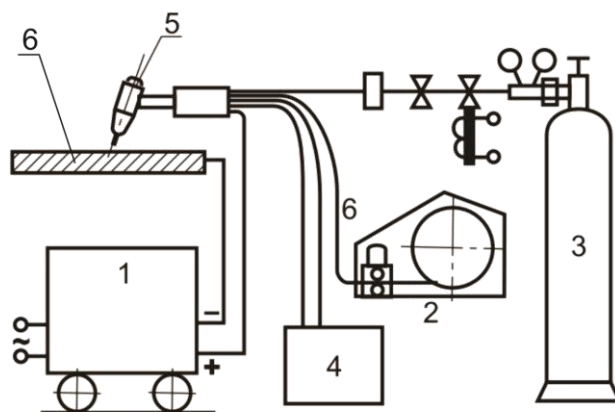
где је: $\rho = 7.86$ g/cm³ – густина електродне жице,

$V = A_z \cdot L$ – јединична запремина зава на дужини од 1 cm,

A_z – усвојена површина попречног пресека једног зава cm²,

$L = 1$ cm – јединична дужина зава.

Шематски приказ опреме за MIG/MAG заваривање приказан је на слици 5.12. Сам апарат (слика 5.13) састоји се од компоненти као што су: извор струје, уређај за довод жице, електрични каблови и горионик, командни систем за заштитне гасове, расхладни систем, општи командни систем и боца са заштитним гасом.



Слика 5.12 Шематски приказ уређаја за MIG/MAG заваривање: 1- извор напајања једносмерне струје, 2- механизам за довођење жице, 3- боца за заштитни гас, 4- расхладни систем, 5- заваривачки пиштољ, 6- радни предмет [4]

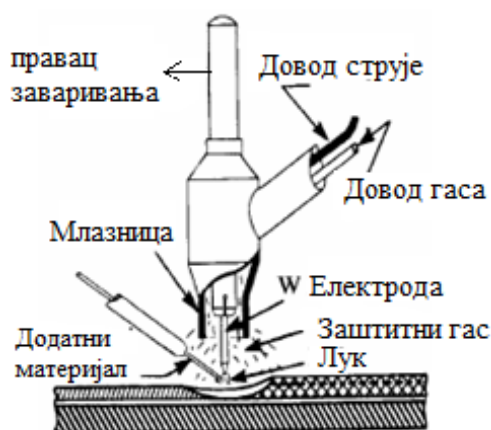


Слика 5.13 Апарат за MIG/MAG заваривање [28]

Треба напоменути да између ових поступака нема велике разлике јер су извори струје и поларитет исти а у додатним жицама разлике су незнатне. Који ће се заштитни гас употребити условљено је металуршким факторима и потребом да се контролише прштање и облик шави. Зато се чист Ar користи при заваривању нежелезних метала и легура никла. Мешавина $Ar - CO_2$ се користи за угљеничне и нисколегиране челике, док се аргон са додатком $1 \div 5\% O_2$ користи за нерђајуће челике. За заваривање угљеничних челика кратко спојеним преносом, односно при заваривању струјом веће јачине, користи се угљен-диоксид. Свим поступцима заваривања у заштити гаса сметају ваздушна струјања (ветар, промаја), јер се може одувати заштитни гас и настати порозност и оксидни укључци у металу шави. Такође је неопходно ламинарно а не турбулентно струјање заштитног гаса [4].

5.4 TIG заваривање

TIG заваривање или електролучно заваривање нетопљивом електродом у заштити гаса је поступак спајања материјала топљењем и очвршћавањем дела основног и додатног материјала, при чему се као заштита користи инертан гас. Није могуће користити активан гас јер би изазвао оксидацију врха електроде. На слици 5.14 приказан је шематски приказ, док је на слици 5.15 приказан апарат за TIG заваривање [4].



Слика 5.14 Шематски приказ TIG заваривања нетопљивом електродом [4]



Слика 5.15 Апарат за TIG поступак заваривања [29]

Применом овог поступка остварује се:

- потпуна заштита у металу шави, електроде и додатног материјала од ваздуха, што спречава оксидацију и друге штетне реакције,
- висока топлотна снага лука са већом брзином и производношћу заваривања,
- проста техника заваривања, па се зато врло лако могу обучити радници средње квалификације, посебно за полуаутоматско и аутоматско заваривање,
- могућност спајања разнородних метала, као и дебљих комада и
- добар спољни изглед шави и високе механичке особине и сл.

У недостатке TIG поступка убрајају се:

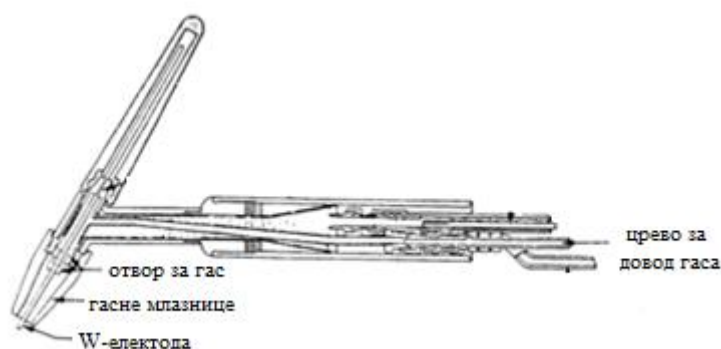
- релативно висока цена инертних гасова,
- потреба за темељним чишћењем површине делова при заваривању лаких легура,
- висока тачност монтаже.

Лимови дебљине мање од 6 mm могу се међусобно спајати овим поступком без додатног материјала, стапањем страница волфрамовом електродом, где је заварени спој – рубни шав. Волфрамска електрода се у нормалним радним условима не топи па се за формирање заваривачког купатила осим претопљеног материјала, посебно доводи и додатни материјал сличан основном. Тај материјал, у виду жице или шипке мањег пречника, топи се у електричном луку на ивици купке. Пошто се врх усијане волфрамске електроде лако оксидише (контаминира) кисеоником из ваздуха, неопходна је потпуна заштита волфрама и заваривачког купатила од гасова из ваздуха. Показало се да инертни гасови (аргон - Ar и хелијум - He) дају стабилан електрични лук и одличну заштиту волфрама и металне купке [4].

TIG заваривање могуће је изводити у свим положајима. У зависности од удела људског рада, разликују се следећи начини TIG заваривања:

- ручно,
- механизовано,
- аутоматско и
- роботизовано.

С обзиром на то да постоје различити начини заваривања, тако постоје и различите врсте горионика. Сам горионик приказан је на слици 5.16, који се састоји се из W- електроде, гасне млазнице, отвора за пропуштање гаса, вођице електроде, излазног црева за воду, црева за довод воде и црева за довод гаса.



Слика 5.16. Различите врсте горионика [31]

Нетопљива електрода за TIG заваривање израђује се од чистог волфрама, легуре волфрама и торијума и легуре волфрама и цирконијума. Електроде од чистог волфрама користе се за заваривање наизменичном струјом. Електроде легиране торијумом (0.5÷2% Th) могу се оптеретити јачом струјом и тиме се смањује опасност од делимичног топљења врха електроде.

Електроде легиране цирконијумом (до 0.4% Zr) налазе посебну примену при заваривању наизменичном струјом алуминијума, јер цирконијум помаже да се одржи стабилан облик врха електроде. При TIG заваривању најчешће је у примени једносмерна струја директног поларитета (E^-) чиме се оставује уже купатило, већа дубина уваривања и ужа зона утицаја топлоте. Једносмерна струја позитивне електроде (E^+) примењује се при заваривању танких лимова од алуминијум, магнезијума, титана и неких ватроотпорних метала, да би се остварио ефекат катодног чишћења. При TIG - заваривању струјом обрнутог поларитета (E^+), највећа количина топлоте ослобађа се на врху електроде [1].

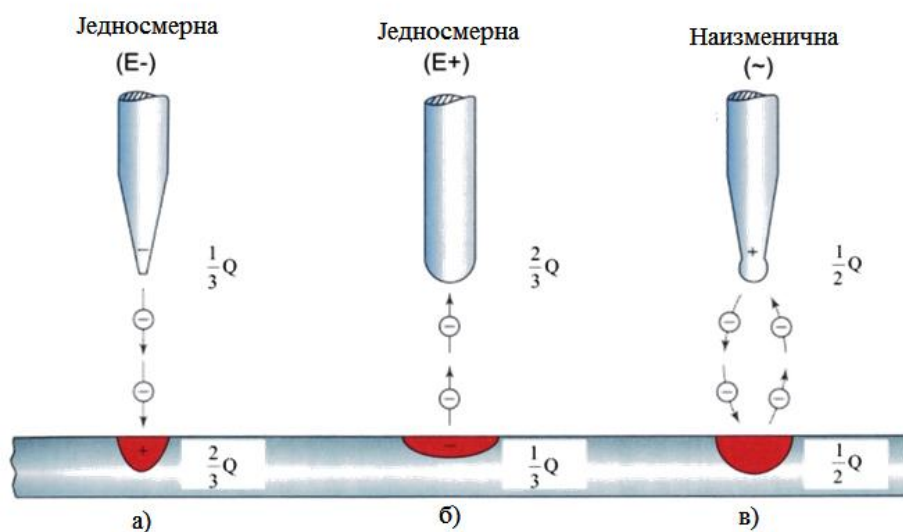
Као заштитни гас користи се аргон, хелијум или смеша аргона и хелијума. Проток гаса бира се у зависности од врсте и дебљине материјала који се заварује, од положаја заваривања и врсте споја. Количина заштитног гаса код TIG поступка креће се у опсегу од 6.5 до 30 l/min. Пошто аргон има нижи потенцијал јонизације од хелијума, лакше се у аргону успоставља лук и мањи је пад напона. С обзиром на то да је аргон тежи десет пута од хелијума, аргонска заштита знатно је делотворнија у хоризонталном положају него хелијумска. Такође, и за заваривање наизменичном струјом подобнији је аргон, јер се лакше успоставља лук кад је електрода на позитивном полуталасу наизменичне струје, која омогућава површинско катодно чишћење. Најзад, аргон је погоднији за ручно TIG заваривање, јер случајна промена дужине лука незнатно утиче на његову стабилност. Аргон се више користи код нас и у Европи, док се хелијум више користи у Америци јер је јефтинији будући да се тамо добија као примеса земног гаса. Хелијум се после пречишћавања директно може употребити као заштитни гас. Препоручује се за неке специфичне случајеве јер може одржавати лук веома мале дужине. На тај начин се добија дубок и танак завар, који најбоље одговара за полагање коренског пролаза при изради шавних цеви. Најпогоднији је за радове у надглавном положају, зато што је лакши од ваздуха и подиже се у зону заваривања. Мешавина Ar и He се најчешће примењује код алуминијума и његових легура. Постиже се дубље уваривање и омогућава рад са наизменичном струјом, којом се остварује тзв. катодно чишћење [1].

Овим поступком могуће је спајати лимове дебљине мање од 6 mm без додатног материјала, стапањем страница волфрамовом електродом, где је заварени спој – рубни шав [33].

Ефекат катодног чишћења

При заваривању TIG поступком најчешће је у примени једносмерна струја директног поларитета (E^-), чиме се остварује уже купка, већа дубина уваривања и ужа зона утицаја топлоте. Једносмерна струја негативне електроде примењује се за легиране челике, нерђајуће челике и др. Једносмерна струја позитивне електроде (E^+) примењује се за заваривање танких лимова од алуминијума, магнезијума и титана. Док се наизменична струја користи не само за заваривање алуминијума, већ и магнезијума и неких ватропостојаних материјала. Када је електрода на „-“ полу сматра се да се у основни материјал уноси 70% ($2/3 Q$) топлоте лука а 30% ($1/3 Q$) иде на волфрамову электроду (слика 5.17a). Када је електрода на „+“ полу, ствар је обрнута, 70% ($2/3 Q$)

топлоте иде у волфрамову электроду, а 30% ($\frac{1}{3} Q$) у основни материјал (слика 5.17б). Конкретно то значи да је уваривање, тј. пенетрација у материјалу већа када је електрода на „-“ полу. При заваривању на „+“ полу дешава се да се оксидни слој разбија и разбацује ван места заваривања. Ранија теорија је била да електрони чистог алуминијума ударају у оксидни слој и разбијају га. Нова теорија каже да јони гаса, који имају масу а тиме и знатну кинетичку енергију, ударају и разбијају оксидни слој. Зато се користи наизменична струја за заваривање алуминијума аргоном (слика 5.17в) где се 50% ($\frac{1}{2} Q$) топлоте одводи у ОМ, а 50% ($\frac{1}{2} Q$) иде на волфрамову электроду. У једној фази када је електрода на „+“ полу, јони гаса разбијају оксид а када је електрода на „-“ полу, следи растапање основног материјала и дубоко уваривање [1].



Слика 5.17. Утицај врсте струје и поларитета на расподелу топлоте при TIG -заваривању [33]

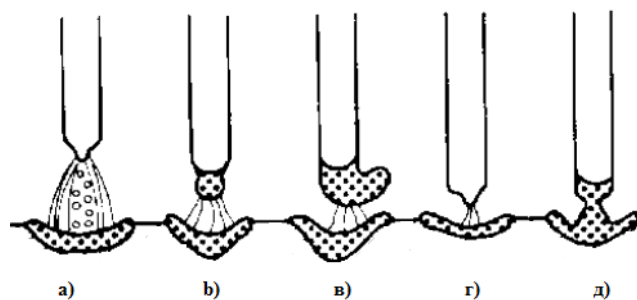
6. ИЗБОР ДОДАТНОГ МАТЕРИЈАЛА И ЗАШТИТНОГ ГАСА

Као потрошни материјал за MAG поступак користе се електродне жице које се израђују у пречницима од 0.2 mm до 2.4 mm, и испоручују се у котуровима. Због слабо оксидишућег дејства CO_2 и O_2 неопходно је да жице имају већи садржај Si и Mn (око 0.6% Si и 0.9% Mn) што спречава оксидацију метала шави, јер образовани оксиди SiO_2 и MnO испливавају на површину. У жицама се ограничава C до 1.2% ради спречавања порозности шави и услед оксидације угљеника [1].

Овим поступком се успешно заварују углавном материјали дебљи од 3 mm у свим положајима. Употребљава се најчешће електродна жица пречника 1.6 mm, а за материјале дебље од 8 mm треба применити још и предгревање. Електродне жице морају бити чисте - одмашћене, суве и бакарисане ради заштите од корозије. Такође морају бити уједначеног пречника и без механичких оштећења, јер се може пореметити брзина довођења жице. Иако пречник електродне жице зависи од више чинилаца, може се прихватити следећа препорука [1]:

- за лимове дебљине $s = 2 \text{ mm}$ узети жицу пречника $d = 8 \text{ mm}$,
- за лимове дебљине $s = 2\text{-}20 \text{ mm}$ узети жицу пречника $d = 1.2 \text{ mm}$ и
- за лимове дебљине $s = 10\text{-}30 \text{ mm}$ узети жицу пречника $d = 1.6 \text{ mm}$.

За електродне жице најмањег пречника, $d = 0.8\text{-}1.2 \text{ mm}$, пречник млазнице је обично 10-12 mm а растојање између млазнице и основног материјала 8-10 mm. За веће пречнике електродних жица растојање је 10-15 mm. При заваривању дебљих лимова коренски завари се изводе праволинијским кретањем електродне жице, док се за наредне пролазе примењује попречно кретање. Основни начини преноса додатног материјала (слика 6.1) су пренос у млазу, краткоспојени пренос и пренос у крупним капима [1].



Слика 6.1 Начини преноса додатног материјала: а) пренос у млазу, б) пренос крупним капима у дугом луку (в-формирање капи, г-ексцентрично потиснута кап), д) краткоспојени пренос [4]

- *Пренос у млазу*, који је могуће постићи струјом јачине веће од неке граничне вредности, и то првенствено у заштити Ar (или He), јер се у заштити CO_2 додатни материјал распрскава. Ова врста преноса погодна је за заваривање дебљих лимова, јер користи велике јачине струје;

- *Краткоспојени пренос*, који је могуће постићи применом најмањих јачина струје и најмањих пречника жице. Добијају се завари малог пресека који се веома брзо хладе што је погодно за спајање танких лимова;
- *Пренос у крупним капима*, јавља се првенствено при употреби CO_2 . Квалитет споја је лошији због недовољног уваривања.

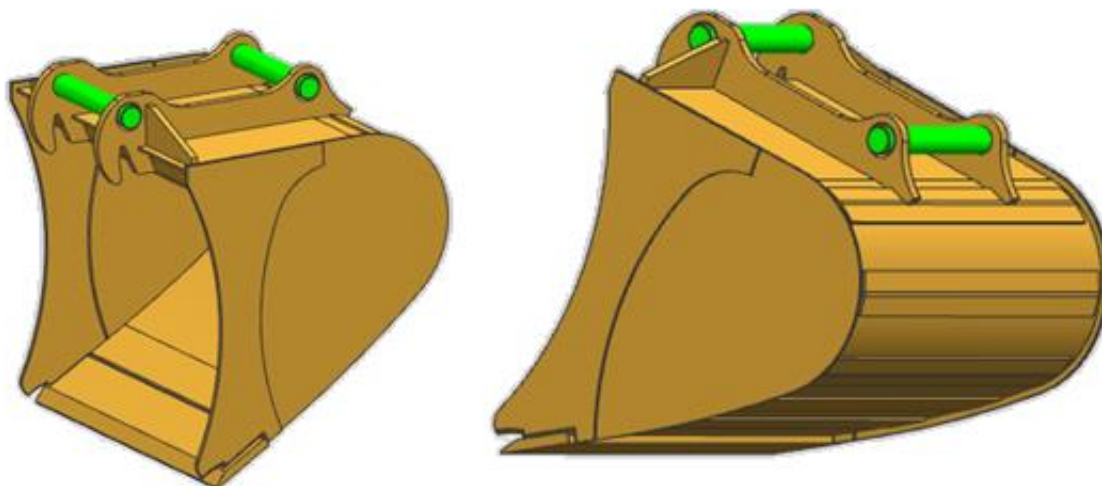
Највећи утицај на начин преноса додатног материјала имају параметри струје, заштитни гас, састав додатног материјала и слободна дужина електродне жице.

7. КАШИКА БАГЕРА

У току експлоатације грађевинске механизације, која се користи у грађевинарству и у другим привредним гранама, њени радни делови су изложени различитим узрочницима који доводе до њиховог оштећења. Процесима хабања највише су изложени радни делови који су у директном контакту са разним грађевинским материјалима [11].

Утоваривачи су грађевинске машине које се првенствено користе за утовар, транспорт и истовар различитих врста грађевинског материјала. Поред тога, користе се за скидање површинских слојева земље (хумуса) и грубо равнање терена [11].

У групу радних делова грађевинске механизације, који су за време експлоатације изложени абразивном хабању јаког интензитета између осталог може се сврстати и кашика багера. Као што је већ наглашено реч је о кашици за утовар, која је приказана на слици 7.1.



Слика 7.1. Изглед кашике багера

7.1 Основни материјал кашике багера и њених делова

Стенски материјали који се користе у грађевинарству имају велику тврдоћу и из тог разлога је неопходно да се за израду делова кашике (багера) примењују материјали велике жилавости и отпорности на хабање. Као што је већ поменуто, кашика багера изложена је ударном абразивном хабању па се због тога углавном израђује од угљеничних челика. На конкретном примеру коришћен је угљенични челик S355J2G3 (Č0563 тј. ST52-3N) који садржи 0.16% C, 1.36% Mn, 0.021% Si, 0.013% P, 0.005% S, 0.04% Al, 0.02% Cu, 0.02% Cr, 0.01% Ni, 0.004% Mo, 0.01% Ti, 0.005% V, 0.028% Nb, 0.007% N.

Хемијски састав и намена основног материјала приказани су у табели 7.1, док су упоредне ознаке и механичка својства у табели 7.2 [11].

Табела 7.1 Хемијски састав S355J2G3 [11]

Хемијски састав ОМ, %													
C	Mn	Si	P	S	Al	Cu	Cr	Ni	Mo	Ti	V	Nb	N
0,16	1,36	0,021	0,013	0,005	0,04	0,02	0,02	0,01	0,004	0,01	0,005	0,028	0,007

Табела 7.2 Упоредне ознаке и механичка својства S355J2G3 [11]

Стандард EN 10025			Механичка својства					
Ознака према	Ознака према	Ознака према	R _m , N/mm ²	R _{eH} , N/mm ²				
EN 10027-1 (EISS IC 10)	EN 10027-2	DIN 17100	Дебљина, mm 3 ÷ 100	За дебљине материјала, mm				
				< 16	16 ÷ 40	40 ÷ 63	63 ÷ 80	80 ÷ 100
S355J2G3	1.057	St 52-3N	490 ÷ 630	355	345	335	315	305
							325	315

Челици S355 се испоручују у квалитету JR, JO, J2 (J2G3, J2G4), K2 (K2G3, K2G4). Разлике у квалитету се односе на заварљивост и ударну жилавост [12].

S355J2G3 спада у конструкционе челике (слика 7.2) који се користе за израду челичних конструкција. Примену налазе у разним сегментима индустрије и грађевинарства: у индустрији машина, возила, конструкција, у бродоградњи, производњи индустријске опреме, у металопреради. Такође се користи за производњу хладноваљаних лимова и за производњу цеви. Најчешће служе за израду вратила, осовина, зупчаника, носача опруга, вијака, поклопаца, вентила, кућишта итд. С обзиром на механичка својства, конструкциони челици морају имати високу границу развлачења, довољну пластичну деформабилност, високу границу пузања и чврстоћу при повишеним температурама, задовољавајућу жилавост и динамичку издржљивост. Поред тога, конструкциони челици морају бити отпорни на трошење и корозију, обрадиви одвајањем честица (резање), заварљиви, склони хладном обликовању (савијање, штанцање, дубоко вучење) итд. Општи конструкциони челици деле се на:

- угљеничне челике за носеће конструкције и
- челике за машиноградњу.



Слика 7.2 Конструкциони челик – S355J2G3 [13,14]

Будући да код ове групе челика хемијски састав није загарантован, због веће присутности нечистоћа у односу на остале челике, општи конструкциони челици нису предвиђени за термичку обраду. Челици за носеће конструкције углавном се деле на основу вредности границе развлачења и ударне радње лома. Означавање конструкционих челика је уобичајено према норми EN 10027-1. Челици за носеће конструкције поседују границу развлачења од 190 до 370 N/mm² а издужења од 10 до 28%. Износ границе развлачења је виши уколико је виши садржај угљеника и удео перлита у микроструктури. Чврстоћа се може повисити додатком мангана и силицијума (манган мора бити < 1.65% јер повећава прокаљивост). Челици за носеће конструкције углавном се примењују у температурном подручју од -40°C до +50°C.

Опште је познато, да на заварљивост челика, највише утичу његов хемијски састав и дебљина. Повећан садржај угљеника и легирајућих елемената погоршава заварљивост челика и ливених гвожђа. Садржај угљеника у челику изнад 0.25% сврстава материјал у групу условно заварљивих челика. Заварљивост додатно погоршавају и легирајући елементи који иначе побољшавају нека друга својства челика [11].

Сви легирајући елементи утичу у већој или мањој мери на температуру прекристализације челика, а тиме и на величину области гама и алфа. За термичку обраду углавном је важан њихов утицај на област гама. У том смислу легирајући елементи могу се поделити на четири групе [15]:

- а) елементе који потпуно отварају област гама,
- б) елементе који проширују област гама,
- в) елементе који потпуно затварају област гама и
- г) елементе који сужавају област гама.

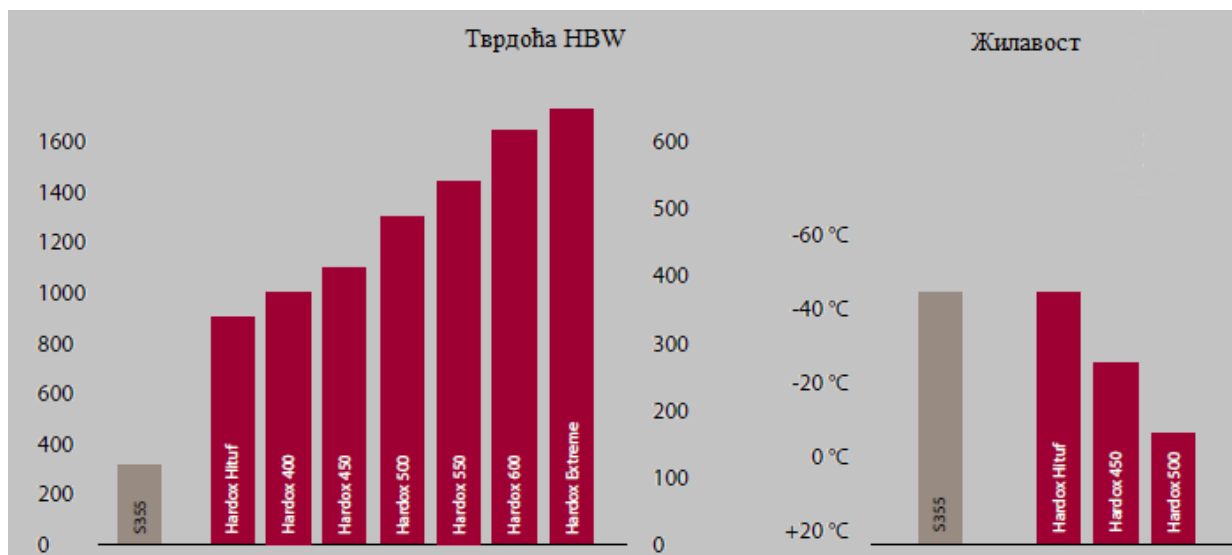
Поред угљеника и легирајућих елемената на погоршање заварљивости челика утичу и нечистоће (P и S), као и низ других фактора [11].

Угљенични челици не могу испунити све конструкционе захтеве, којима се често тражи не само високи напон течења већ такође и добра жилавост, одређена динамичка издржљивост, граница пузања или одређене особине на ниским или високим

температурама. Угљенични челици обичног квалитета сврставају се претежно према механичким особинама и користе се за слабије оптерећене делове машина, уређаја, возила, а челици трговачког квалитета (Š0000, Š0010) за шипке и решетке [15].

Hardox челици примењују се за опрему која се користи у руковању рудама, и која је изложена различитим врстама напрезања на хабање – клизању и ударном оптерећењу, често комбиновано са великом деформацијом. Hardox челици могу имати тврдоћу од 400 до 650 HBW и поднети сва ова напрезања, уз пет до десет пута дужи радни век од класичних челика исте намене [16].

Тврдоћа је оно што Hardox челику даје његову јединствену отпорност на хабање и структурну чврстоћу. Тврдоћа минимализује хабање пошто је „ивицама“ абразивног материјала тешко да се засеку у материјал. Hardox даје исту отпорност на хабање током читавог радног века плоче, с обзиром да тврдоћа остаје иста. Тврдоћа такође значи да поседује одличну отпорност на попуштање и истезање, својства која држе облик конструкције без деформисања. Жилавост је друга јака страна Hardox материјала. Док га тврдоћа чини отпорним на хабање и чврстим, жилавост је оно што Hardox челику омогућује да се савија, обликује и заварује без пуцања. Ако се Hardox хабајућа плоча оптерети изнад њене тачке попуштања и пластично деформише, она ће се одупрети пуцању, а ако се локална напрстина и појави, одупреће се ширењу. Вредности жилавости за Hardox, 450 и 500 су гарантоване минималне вредности које се односе на -40°C, -20°C и 0°C. У поређењу са стандардним челиком S355, Hardox поседује на пример три пута вишу отпорност на трајну деформацију (тврдоћа) и подједнаку отпорност на пуцање (жилавост). На слици 7.3 приказане су чврстоћа, тврдоћа и гарантована жилавост Hardox-а [17].



Слика 7.3 Чврстоћа, тврдоћа и гарантована жилавост Hardox-а [17]

Поређење неких тврдоћа Hardox класа приказано је у табели 7.3.

Табела 7.3 Веза између тврдоћа и затезне јачине за класе челика типа Hardox [17]

Brinell HBW 10 mm 29.4 kN	Vickers 98 N	Rockwell HRC	Напон, МПа	Одговарајућа класа челика
400	401	40	1245	Hardox 400
450	458	44.5	1412	Hardox 450
500	514	49	1580	Hardox 500
600	627	55	1940	Hardox 600
650	682	57.5	2130	-

Hardox хабајућа плоча је лака за машинску обраду. Бушење, упуштање, урезивање навоја, стругање и глодање се раде високобрзинским алатима за обраду челика. Поседује сјајну заварљивост за све врсте заварљивих челика. Равност и уске толеранције за дебљину чине аутоматско заваривање лаким и скраћују време састављања и спајања. Хомогена својства, строге толеранције за дебљину и глатке површине, чине Hardox погодним за просто савијање и ваљање [17].

Све већи захтеви економичности израде заварених челичних конструкција условљавају примену савремених квалитетних и специјалних челика. Захваљујући великој отпорности на хабање високој граници напона течења, од 290 до 1100 МПа, Hardox челици могу да задовоље захтеве пројектовања и економичности израде заварених челичних конструкција у машиноградњи, грађевинарству и процесној опреми [18].

Осовине су израђене од легираног челика Š4732 (45CrMo4), чији је хемијски састав приказан у табели 7.4. Сваки елемент којим се легира челик, мења његове особине зависно од тога у ком је облику присутан у структури, тј. да ли је потпуно или само делимично растворен у основној металној маси (у фериту или аустениту), да ли је везан са угљеником као карбид, са азотом као нитрид и сл.

Табела 7.4. Хемијски састава Cr - Мо челика у % [18]

Ознака челика	C	Si	Mn	Cr	Mo	P	S
Š4732	0.38-0.45	0.15-0.35	0.5-0.8	0.9-1.2	0.15-0.25	0.035	0.035

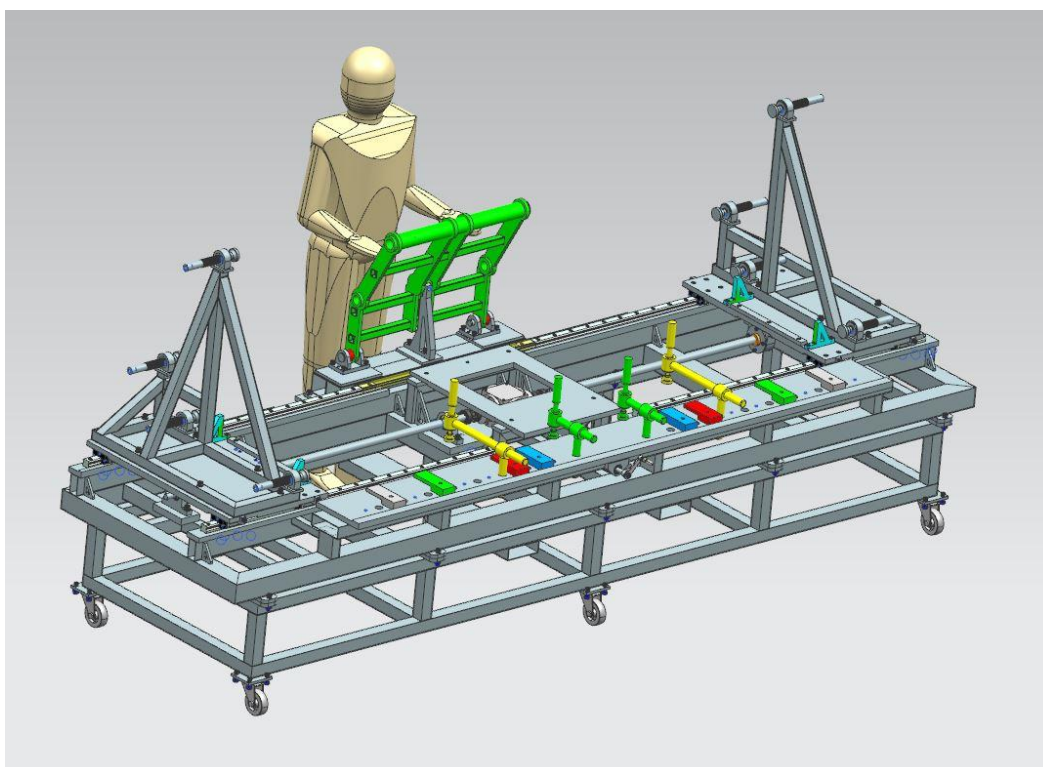
Повишен садржај хрома у угљеничним и нисколегираним челицима погоршава њихову заварљивост на рачун побољшања прокалаивости. Повећава ватроотпорност аустенитних челика у оксидационим условима али делује мање ефикасно, него нпр. молибден или ванадијум. При садржају хрома изнад 12% челик је веома отпоран према корозији. Даљим повећањем садржаја хрома расте јачина и отпорност челика према корозији, при Cr > 20% видно опада пластичност. Хром изазива повећање критичне температуре Ac1, што доводи до тога да брзина растварања карбида у аустениту буде

знатно мања од брзине растварања Fe_3C у угљеничним челицима. Са порастом садржаја хрома смањује се термичка проводност што захтева предострожност при загревању челика, нпр. при преради на топло, термичкој обради или заваривању.

Молибден се у конструкционим челицима налази у границама од 0.2 до 0.5%. Изазива уситњавање зрна и доводи до повећања жилавости (при високим температурама) и прокаљивости. Са повећањем садржаја Мо расте и јачина и напон течења, док издужење и контракција опадају при $\text{Mo} > 2.3\%$.

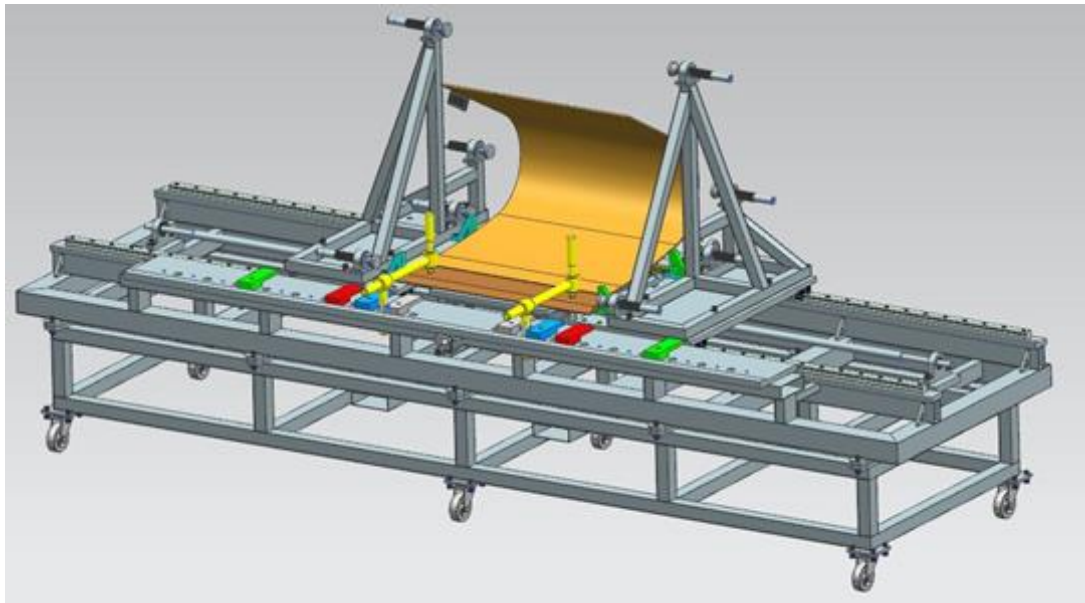
7.2 Алат за склапање кашике багера

Алат за склапање кашике треба пре свега да омогући тачно добијање геометрије склопова производа који се у њему склапају. Такође, врло је битно да прибор буде приступачан у смислу лаког постављања и позиционирања свих делова склопа, за више врста кашика. На слици 7.4 приказан је изглед алата за склапање кашике.



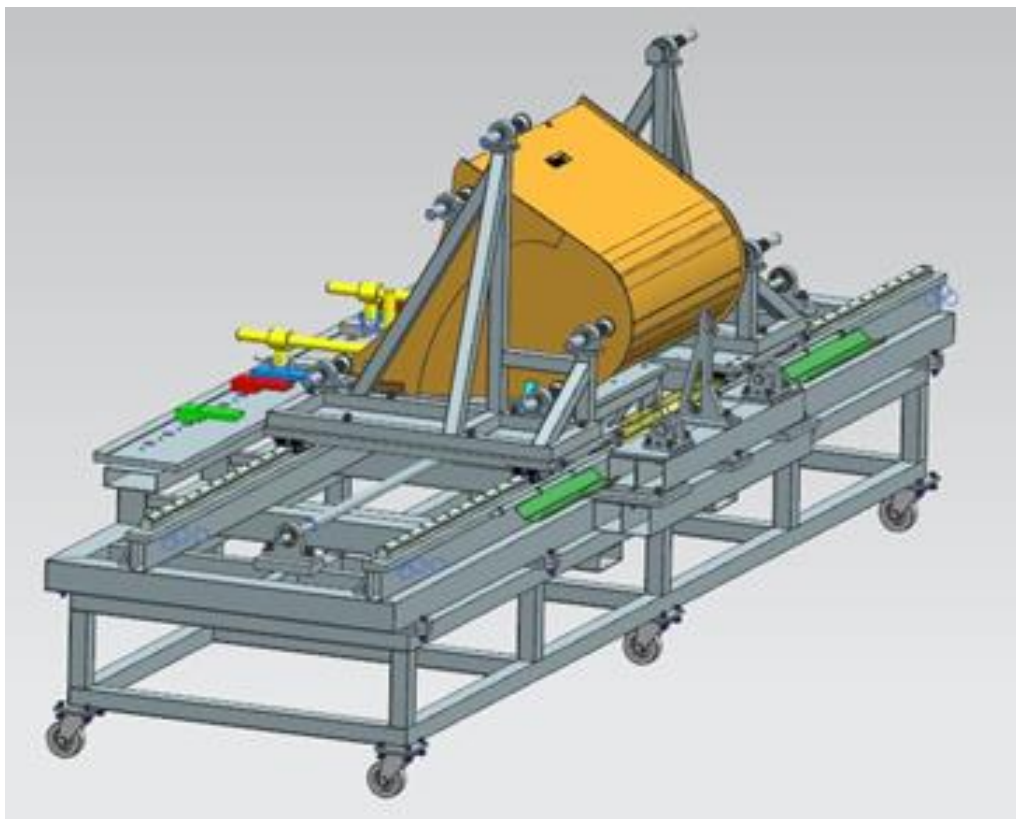
Слика 7.4 Изглед алата за склапање кашике

Склапање кашике врши се према већ унапред одређеним правилима. Прво је потребно позиционирати Hardox и базу лима, као што је приказано на слици 5.6.



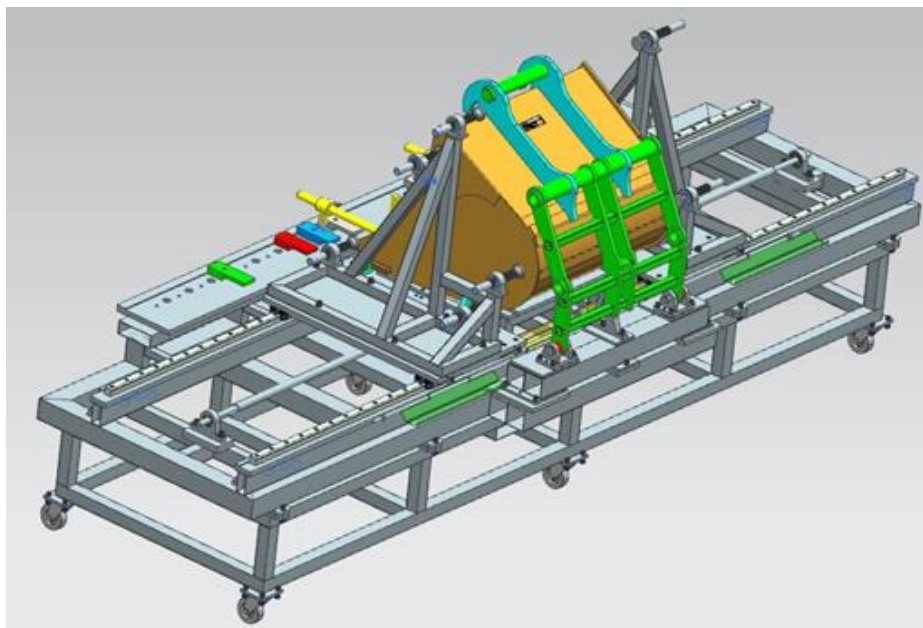
Слика 7.5 *Позиционирање Hardox-a и базе лима*

Затим се позиционирају бочне стране заједно са њиховим ојачањима (слика 7.6). Ван алата, на радном столу, потребно је спојити бочне стране са ојачањима и као такве их потом позиционирати у алат.



Слика 7.6 *Позиционирање бочних страна са њиховим ојачањима*

Након тога је потребно позиционирати ушице. Пре самог позиционирања на алату, ван алата, потребно је спојити ушице са њиховим ојачањем. Тако спојени делови, чине један подсклоп који се потом позиционира на алату, што је приказано на слици 7.7.



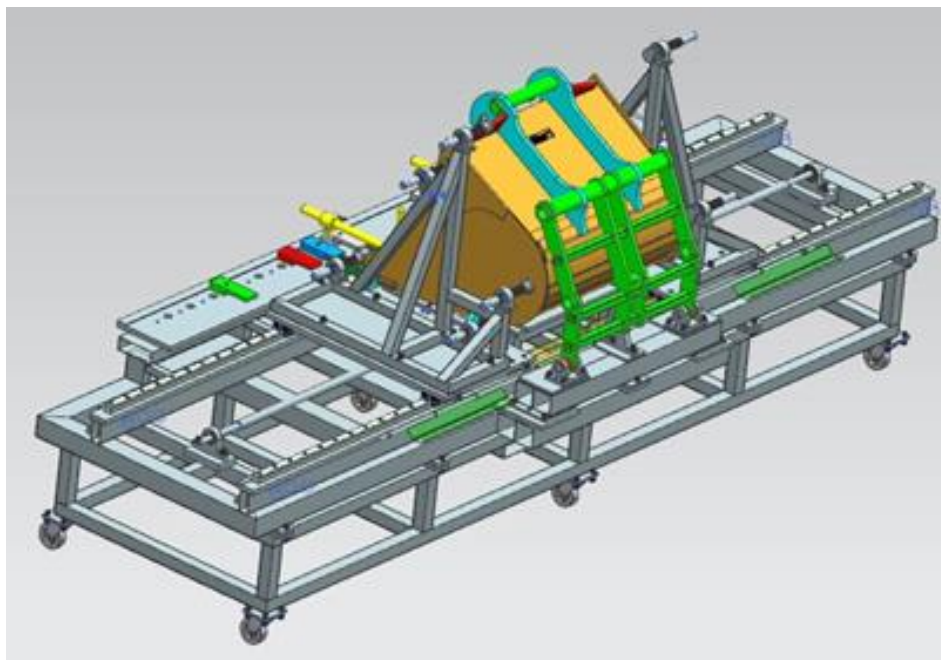
Слика 7.7. Позиционирање ушица са њиховим ојачањима

С обзиром на то да постоји више врста кашика, и да је алат намењен за склапање различитих модела, тако постоје и различите врсте позиционера за сваку или за више кашика. На слици 7.8 приказане су врсте позиционера за ушице.



Слика 7.8 Врсте позиционера за ушице

На самом крају потребно је позиционирати ојачања за ушице, као што је приказано на слици 7.9.



Слика 7.9 *Позиционирање ојачања за ушнице*

Када су сви делови производа постављени и правилно позиционирани у алату, приступа се приваривању. Дакле, алат за склапање кашике треба да буде функционалан у смислу лаког приступа свим битним тачкама – позицијама које треба приварити.

Када се ради о алату на коме се склапају два или више различита производа, у овом случају модела кашике, тежи се да прибор буде са што мање измењивим компонентама, уколико је то могуће. На тај начин се омогућава лакши рад и уштеда у времену припреме алата. Алат треба да буде стабилан, како би обезбедио безбедан и правилан рад. Дакле, алат треба да поседује и одређена ергономска својства поред карактеристика тачности.

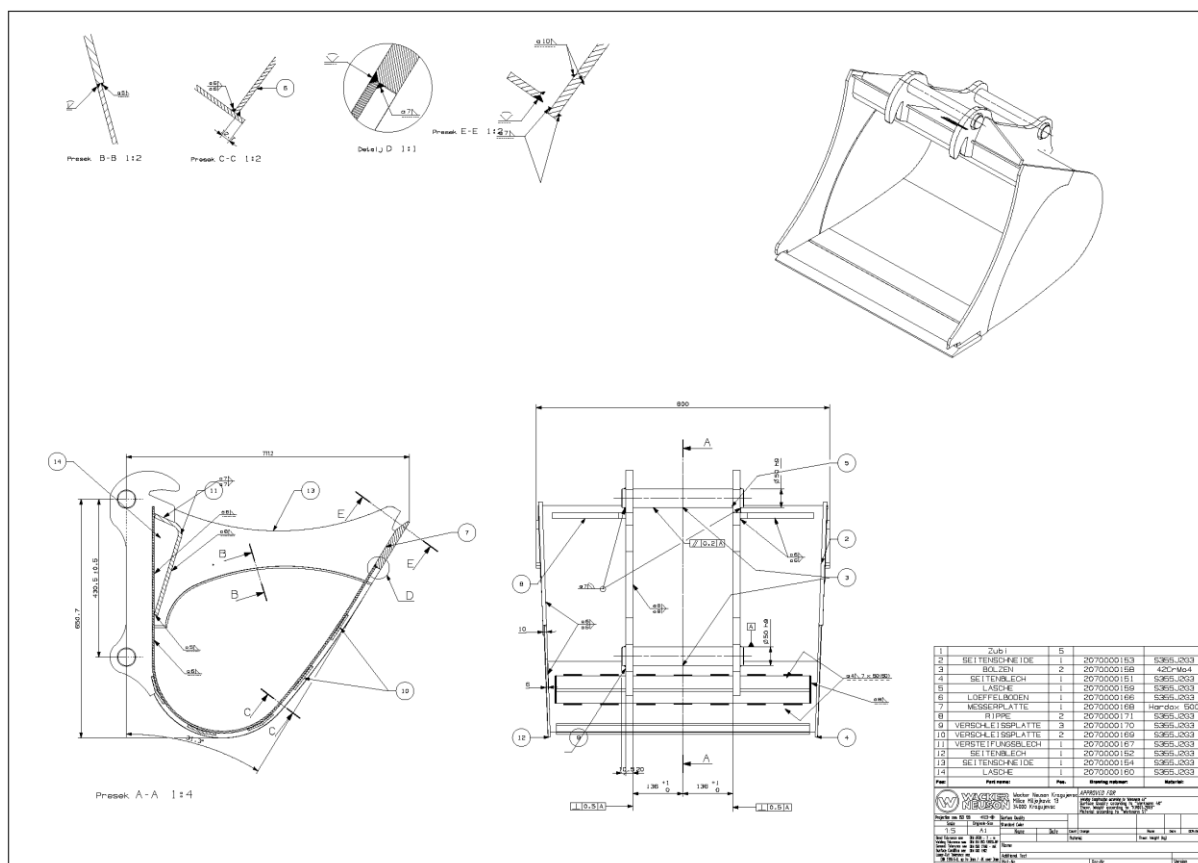
Концепција алата за склапање кашике

Концепција алата је дефинисана самим изгледом радног комада и условима за његову израду. Тако да то не оставља много простора за различите варијанте алата. Усвојена је концепција прибора која је имала најмањи број измењивих компоненти, а да при томе усвојена конструкција није била сувише компликована. То подразумева да је избегнута примена хидрауличних или пнеуматских елемената, већ су коришћене најједноставније механичке справе. То је уједно допринело уштеди у трошковима израде. Коришћен је велики број стандардних делова, као што су стеге, линеарне вођице, чивије итд.

Усвојена је концепција која није захтевала претерано прецизну обраду појединих делова, тако да се читав алат за склапање кашике може направити у алатници фирме.

8. ИЗБОР ТЕХНОЛОГИЈЕ ЗАВАРИВАЊА КАШИКЕ БАГЕРА

„Wacker Neuson Крагујевац“ је водећа компанија у свету у области производње грађевинских машина и уређаја, с тога има за циљ да буде препозната као поуздан партнер у индустрији грађевинских делова. Производи заварене конструкције високог квалитета. Најчешће се врши заваривање угљеничних челика. Од технологија се примењује МАГ поступак. На конкретном примеру, на слици 8.1, дата је техничка документација кашике, са свим позицијама и означеним врстама зава (варова).



Слика 8.1 Техничка документација склопног цртежа кашике багера

После пријема документације из компаније „Linz“, конструкциони биро разрађује и прилагођава документацију. Служба заваривања добија документацију са неопходним бројем зава и након тога започиње процедуру неопходну за прописивање технологије заваривања.

8.1 План активности заваривања кашике багера

У оквиру фирме постоји план активности који сваки запослени у конструкционом бироу (одељењу за пројектовање и израду прототипова) мора да поштује и примењује када приступи конструисању новог производа. План активности се састоји од следећих тачака:

- **Почетак пројекта** обухвата:
 1. Предлог за нови производ - даје се предлог за конструисање и израду новог производа.
 2. Обезбеђивање потребних 3Д модела.
 3. Анализа производа – даје се технолошко-економско образложење због чега треба приступити конструисању и изради новог производа. Предочава се предност новог прибора у односу на постојећа решења, његове предности и погодности које тај нови производ доноси.
- **Документација** обухвата:
 1. Калкулација трошкова и буџет – одељење за развој врши прорачун трошкова реализације израде новог производа, као и одређивање буџета за предвиђене трошкове.
 2. Дизајнирање 3Д модела – врши се моделирање у одговарајућем софтверском програму на основу кога могу да се одреде све карактеристике новог производа.
 3. Израда техничке документације – на основу 3Д модела врши се израда техничких цртежа за израду делова производа.
- **Материјали:**
 1. Набавка материјала – унутар фирме се обавља набавка материјала јер фирма поседује залихе материјала и опрему за обраду материјала (сечење, глодање, стругање, заваривање итд.). Сви стандардни елементи се поручују преко службе набавке којој се доставља списак потребних стандардних елемената (завртњаци, стеге, лежајеви итд.).
- **Израда делова и прототипа:**
 1. Обрада делова прибора – унутар фирме постоје машине за сечење лимова као што су ласер (3-15 mm) и плазма (15-50 mm), стругови, глодалице, стубне бушилице, CNC машине итд.
 2. Екстерне услуге – за елементе који се не могу обрадити унутар фирме користе се услуге екстерних фирми које раде обраду тих елемената.
 3. Формирање склопа производа-обрађени делови склопа се према документацији спајају и формира се склоп производа.
 4. Мерни протокол – врши се провера свих функционалних и битних мера производа, уколико добијен производ задовољава прописану геометрију, то значи да је он добар и да се може применити у серијској производњи.
- **Серијска производња:**

Почетак серијске производње – производ који задовољава све прописане критеријуме након детаљне провере, односи се у бокс за приваривање и покреће се серијска производња на њему. Првих неколико производа се детаљно проверава да би се утврдило да ли производ задовољава критеријуме и у серијској производњи.

- **Завршетак пројекта:**

Врши се коначна оцена добијеног производа као и поређење добијених параметара у односу на планиране (технички и економски параметри).

8.1.1 План процеса заваривања кашике багера

Планирање заваривања је модул где су наведени подаци везани за:

- Техничку документацију цртежа - на њој су представљени бројеви цртежа конструкције коју треба заваривати са свим припадајућим деловима и завареним склоповима, као и помоћни алати;
- Опште информације везане за:
 - основни материјал,
 - додатни материјал,
 - поступак заваривања,
 - заштитни гас,
 - квалификацију заваривача и оператера,
 - процедуру заваривања (WPQR, WPS),
 - положаје заваривања и
 - група заvara;
- предгревање,
- инспекцију заvara,
- план испитивања,
- редослед заваривања и
- радне пробе.

У оквиру општих информација наведен је примењиван *основни материјал*. Као што је већ наглашено у питању је угљенични челик S355J2G3.

Додатни материјал који се применио за заваривање је *жица G3Si1*. Пречник жице је Ø1 mm самим тим је и маса катура 15 kg.

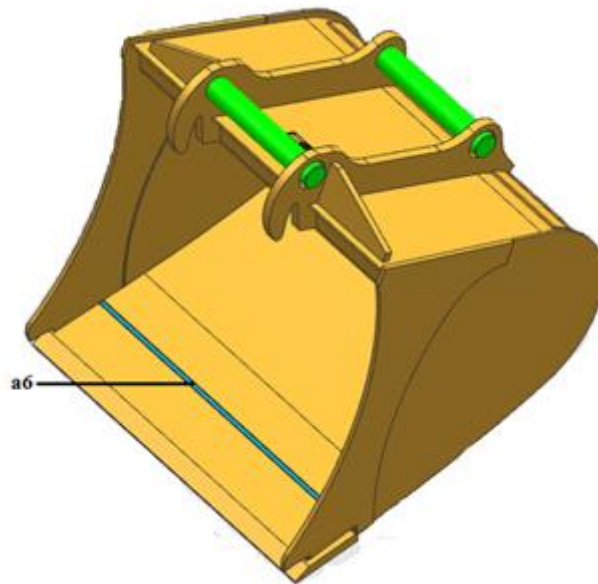


Слика 8.2. Додатни материјал- Жица за заваривање [34]

Примењивани поступак заваривања је 135 – MAG. Као заштитни гас употребила се комбинација аргона (82%) и угљеника (18%). Сви поступци заваривања су се изводили у хоризонталном положају заваривања. Инспекција заvara се врши најпре визуелно. Испитивање се врши на свим завареним спојевима, потом се врши површинско испитивање на могуће прслине течним пенетрантима. План испитивања подразумева испитивање заварених спојева визуелном методом тестирања и испитивање радних проба.

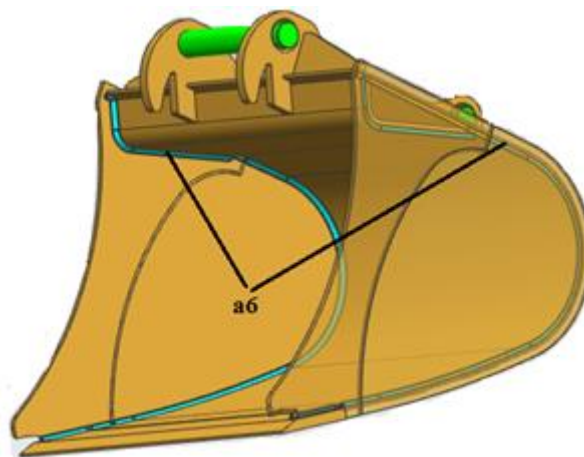
8.2 Процес заваривања кашике багера

Процес заваривања кашике мора се изводити веома прецизно и тачно, како би се избегле могуће грешке. На самом почетку потребно је заварити Hardox ојачање са основном базом лима, што је приказано на слици 8.3.



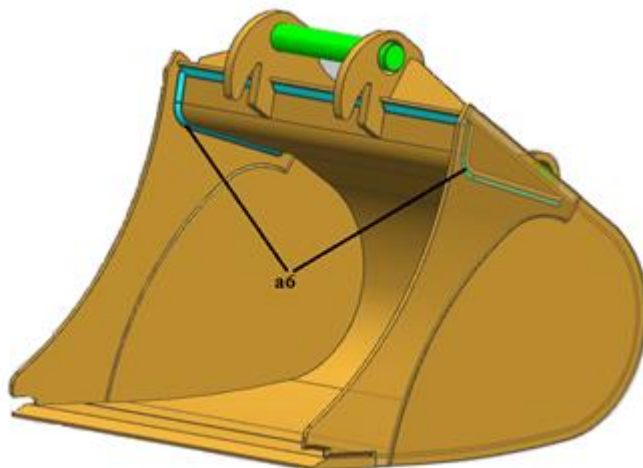
Слика 8.3 Заваривање Hardox-а и базе лима

Затим се заварују бочне странице заједно са њиховим ојачањима, као подсклоп, а тек након тога се врши њихово заваривање са (унутрашње стране) основном базом лима (слика 8.4).



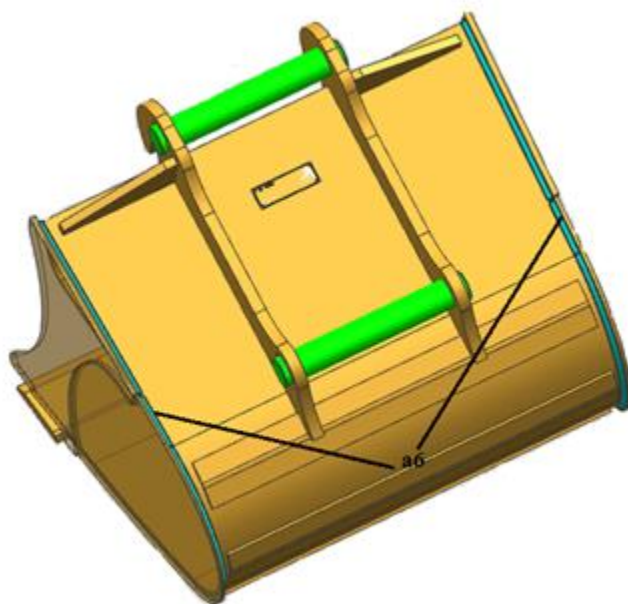
Слика 8.4 Заваривање бочних страница са унутрашње стране

Након тога следи заваривање унутрашњег ојачања, као што је приказано на слици 8.5.



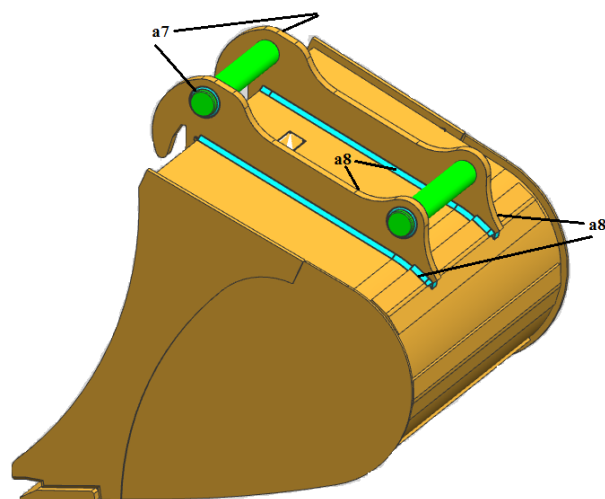
Слика 8.5 Заваривање унутрашњег ојачања

Следећи корак је заваривање бочних страница скроз у круг али сада са спољашње стране (слика 8.6).



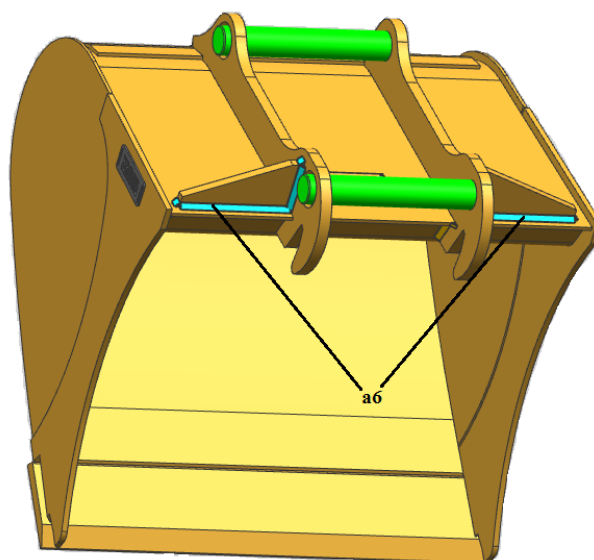
Слика 8.6 Заваривање бочних станица са спољашње стране

Сада, када је кашика полу склопљена, следи заваривање лаша. Лаше се праве као подсклоп и након тога се заварују за кашику, односно за основну базу лима (слика 8.7).



Слика 8.7 Заваривање лаша и основне базе лима

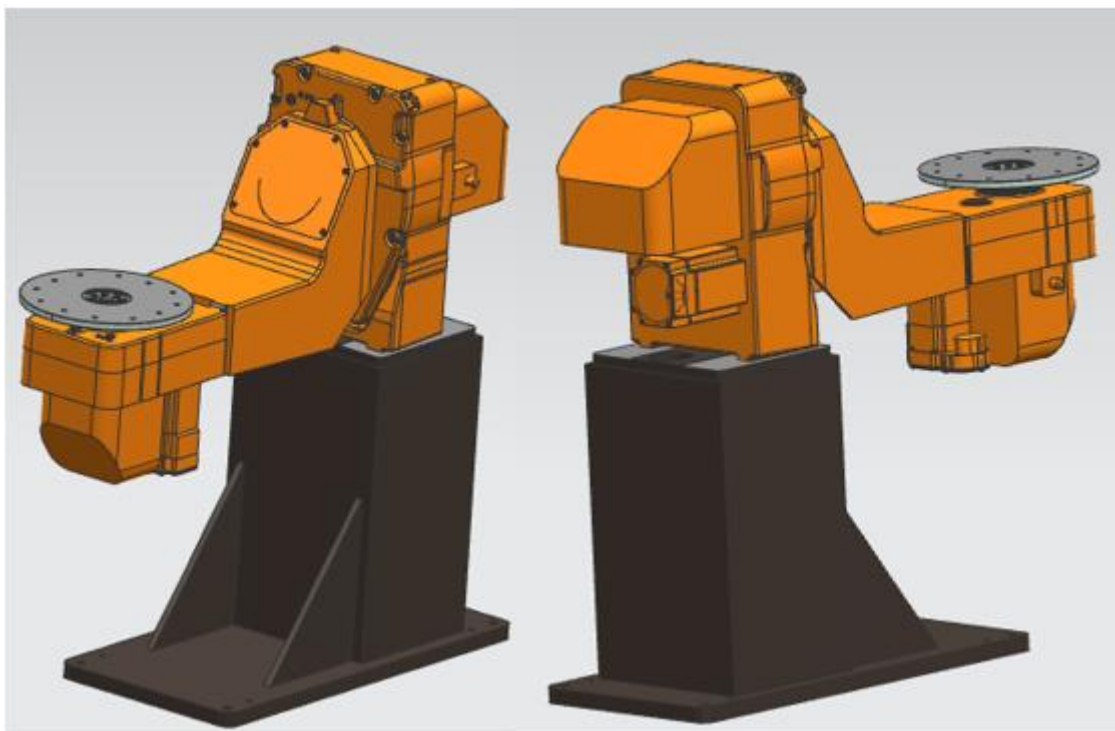
На самом крају се заварују ојачања поред лаша, као што је приказано сликом 8.8.



Слика 8.8 Заваривање ојачања

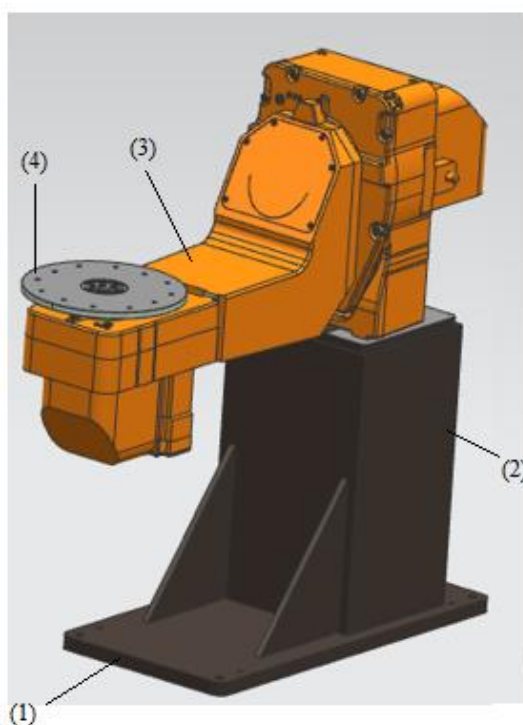
8.3 Заваривање кашике багера на манипулатору

У циљу ефикаснијег и правилнијег извођења, односно заваривања делова користи се манипулатор за заваривање (слика 8.9). Једна од најважнијих ствари када је реч о манипулаторима јесте, да они пре свега треба да обезбеде безбедно руковање производом који се заварује. Поред тога, треба да обезбеде ергономски положај заваривања, како би се раднику обезбедили нормални услови за рад. Манипулатори се често користе због лакше манипулације делова који су тешки. Самим тим, треба узети у обзир позиционирање дела у основни положај за заваривање.



Слика 8.9 Манипулатор за заваривање кашика

Саставни делови манипулатора су: постоље (1), кућиште манипулатора (2), рука манипулатора (3), радни сто за прихватање кашика (4) и мотори (MTD750 и MTD 250) и приказани су на слици 8.10.



Слика 8.10 Елементи манипулатора

9. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСПИТИВАЊА ЗАВАРЕНИХ СПОЈЕВА

Као што је већ раније поменуто, заварене конструкције у савременој индустрији заузимају веома важно место. Самим тим и развој нових материјала и технологија тежи ка побољшању особина машина, уређаја као и самих конструкција, уз смањење њихове тежине и цене а уз повећање квалитета и продужетка радног века. Данас постоји широк асортиман конструкционих материјала који се могу употребити за израду различитих врста конструкција и делова машина.

Експериментална испитивања у овом раду појединих зона заварених спојева извршена су на моделима који су припремљени истим поступцима заваривања од истих материјала и истом технологијом као и у реалним индустријским условима. Свака заварена конструкција састоји се од великог броја спојева како сучеоних тако и угаоних али као главни циљ поставља се тежња да метал шава, ЗУТ-а и основни материјал буду приближних механичких особина.

Најпре је изведено мерење најважнијих геометријских величина (дубина уваривања, дебљина шава, надвишење и тсл.), а затим су измерене вредности тврдоће појединих зона споја и прочитана микроструктура тих зона. Поред тврдоће и металграфије, урађени су и тестови затезања и мерења ударне жилавости.

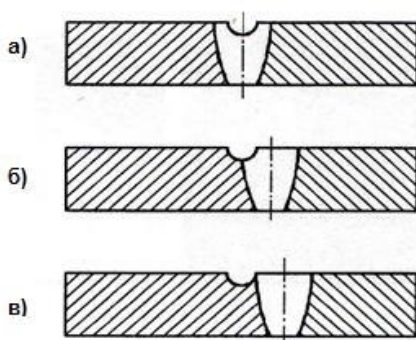
9.1 Испитивање ударне жилавости

9.1.1 Уводне напомене

Мера енергије коју је потребно утрошити да би се изазвао лом епрувете, односно разарање структуре материјала назива се жилавост. У случају када је ова енергија мања, материјал има већу кртост, а у случају када је енергија већа, материјал има већу жилавост. Повољна жилавост материјала може обезбедити конструкцију од настајања иницијалних прслина при чему те прслине могу бити већ присутне на микро нивоу или да настану услед замора у току експлоатације. Материјал веће жилавости ће се на бољи начин одупрети ширењу прслина, па је зато веома битно да зоне завареног споја буду што хомогеније. Хомогенизација зона завареног споја се може извести и накнадном термичком обрадом али се мора водити рачуна да притом не дође до пада особина материјала постигнутих сложеним термо - механичким поступцима прераде челика.

Циљ испитивања био је да се одреди отпорност материјала на дејство ударних динамичких сила. Испитивање је изведено на Шарпијевом клатну на коме се рачунају расположиви рад A_1 и неутрошени рад A_2 и затим се рачуна утрошени рад A_0 као разлика претходна два. Утрошени рад A_0 , за лом епрувете представља мерило жилавости и исказује се у Ј. Шарпијево клатно је уређај за мерење енергије коју испитивана епрувета апсорбује до свог лома, што представља меру жилавости материјала. Брзина клатна за испитивање ударне жилавости је од 5 до 5.5 m/s. Експериментална испитивања изведена су на собној температури. Позиционирање испитиваних епрувета на ослонцима машине изведено је помоћу одговарајућег шаблона. Употребљено Шарпијево клатно обезбеђује тачност регистрације и читавања енергије са релативном грешком мањом од 1%.

Испитују се сучеони спојеви дебљине преко дебљине преко 10 mm, при чему се одређује жилавост метала шави, зоне стапања и зоне утицаја топлоте.

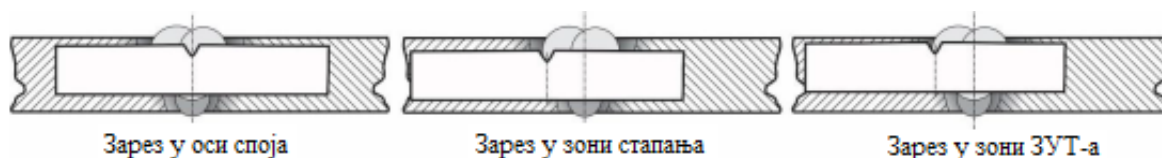


Слика 9.1. Испитивање ударне жилавости

9.1.2 Експериментална испитивања

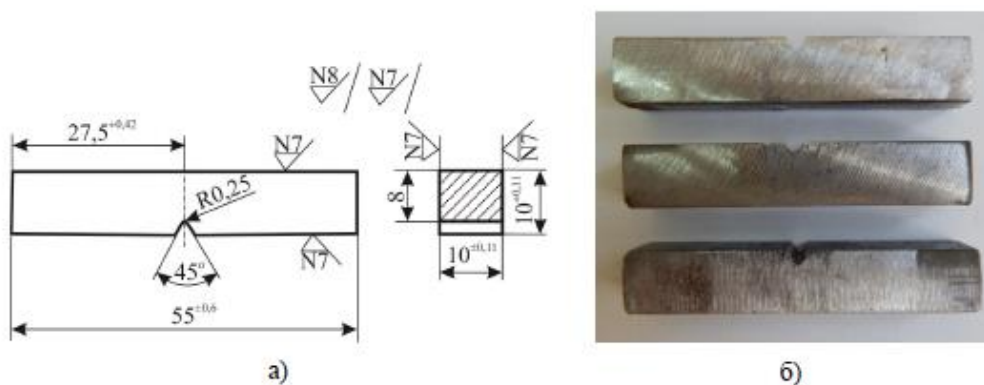
Поступак испитивања спроведен је на епруветама из основног материјала, као и на епруветама са завареним спојем који је изведен MAG поступком. Епрувете су испитиване на Шарпијевом клатну у акредитованој лабораторији, према стандарду SRPS C.A4.025 (55x10x10 mm).

Зарез-жлеб за испитивање ударне жилавости урезан је прво у оси завареног споја, затим у зони стапања и на крају у зони утицаја топлоте завареног споја који је изведен МАГ поступком. И то са стране лица, а затим и са стране корена овог споја. Карактеристичне зоне завареног споја који је изведен МАГ поступком су хемијским нагризањем 4%-тним раствором азотне киселине у алкохолу постале видљиве чиме је омогућено прецизно урезивање зареза за испитивање ударне жилавости. Положаји зареза код серија епрувета које садрже заварени спој приказани су на слици 9.2.



Слика 9.2 Положај жлеба на епруветама

Технички цртеж епрувете за испитивање ударне жилавости је приказан на слици 9.3. Резултати испитивања ударне жилавости основног материјала, метала шава, зоне стапања, ЗУТ-а, корена шава и лица шава приказани су у табелама 9.1 – 9.6.



Слика 9.3. Технички цртеж (а) и изглед (б) епрувета за одређивање ударне жилавости-ОМ



Слика 9.4 Изглед епрувета после лома-заварен спој-ОМ

Табела 9.1 Експериментални резултати испитивања ударне жилавости-ОМ

Број узорака	Температура, °C	Расположиви рад (A_1), J	Неутошени рад (A_2), J	Утошени рад (A_0), J	Средња вредност, J
1	20	300	120	180	179
2			122	178	
3			121	179	
4			118	182	
5			122	178	
6			122	178	



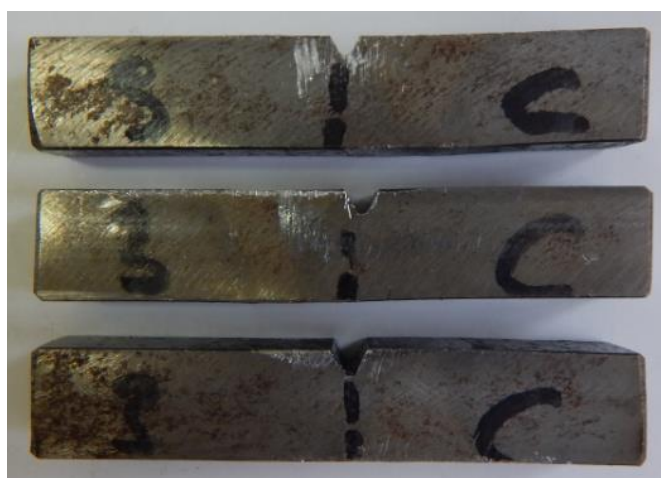
Слика 9.5 Изглед епрувета за одређивање ударне жилавости-МШ



Слика 9.6 Изглед епрувета после лома-заварен спој-МШ

Табела 9.2 Експериментални резултати испитивања ударне жилавости-МШ

Број узорака	Температура, °C	Расположиви рад (A_1), J	Неуtroшени рад (A_2), J	Утрошени рад (A_0), J	Средња вредност, J
1	20	300	154	146	151.33
2			142	158	
3			150	150	



Слика 9.7 Изглед епрувета за одређивање ударне жилавости-3C



Слика 9.8 Изглед епрувета после лома-заварен спој-ЗС

Табела 9.3 Експериментални резултати испитивања ударне жилавости-ЗС

Број узорака	Температура, °C	Расположиви рад (A_1), J	Неуtroшени рад (A_2), J	Утрошени рад (A_0), J	Средња вредност, J
1	20	300	132	168	167.33
2			116	184	
3			150	150	



Слика 9.9 Изглед епрувете за одређивање ударне жилавости-ЗУТ



Слика 9.10 Изглед епрувете после лома-заварен спој-ЗУТ

Табела 9.4 Експериментални резултати испитивања ударне жилавости-ЗУТ

Број узорака	Температура, °C	Расположиви рад (A_1), J	Неуtroшени рад (A_2), J	Утрошени рад (A_0), J	Средња вредност, J
1	20	300	148	152	152



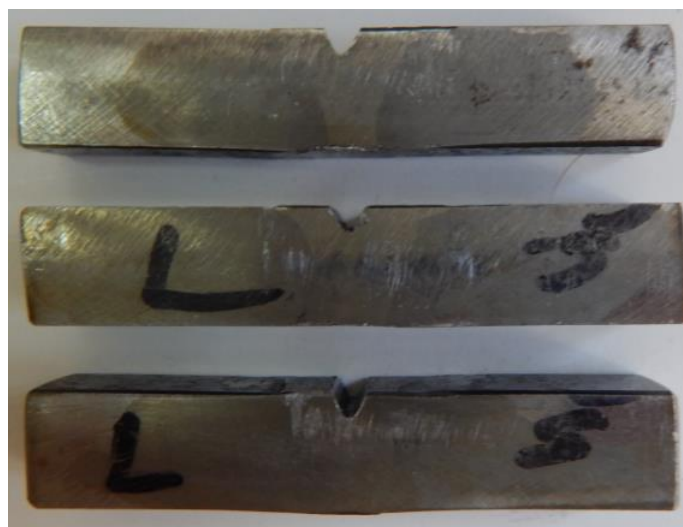
Слика 9.11 Изглед епрувете за одређивање ударне жилавости-КШ



Слика 9.12 Изглед епрувете после лома-заварен спој-КШ

Табела 9.5 Експериментални резултати испитивања ударне жилавости-КШ

Број узорака	Температура, °C	Расположиви рад (A_1), J	Неуtroшени рад (A_2), J	Утрошени рад (A_0), J	Средња вредност, J
1	20	300	180	120	110
2			210	90	
3			180	120	



Слика 9.13 Изглед епрувете за одређивање ударне жилавости-ЛШ

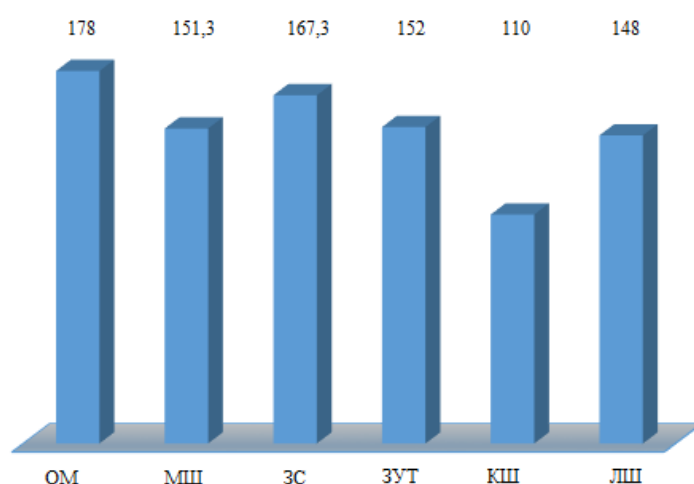


Слика 9.14 Изглед епрувете после лома-заварен спој-ЛШ

Табела 9.6 Експериментални резултати испитивања ударне жилавости-ЛШ

Број узорака	Температура, °C	Расположиви рад (A_1), J	Неутрошени рад (A_2), J	Утрошени рад (A_0), J	Средња вредност, J
1	20	300	136	164	148
2			160	140	
3			160	140	

Експериментално одређене вредности енергије лома имају мала међусобна одступања, зависности сила - време показују исти карактер па се добијени резултати могу узети као релевантни за даљу анализу.



Слика 9.15 Хистограмски приказ вредности ударне жилавости – ОМ и различите ЗС

На основу вредности енергије лома које су добијене за различите положаје зареза са стране лица завареног споја изведеног варијантом MAG поступка, може се закључити

да су највеће енергије лома добијене код епрувета добијених из основног материјала, нешто мање код епрувета код којих је зарез у зони стапања, ЗУТ-у и МШ. Док су најмање вредности енергије лома добијене код епрувета код којих је зарез био у корену шава.

Добијени резултати показују пад жилавости зоне завареног споја у односу на ОМ. Такав случај је неповољан из аспекта хомогености и сигурности завареног споја, јер се јављају зоне ниске ударне жилавости у којима може доћи до концентрације напона и појаве микропрелина које узрокују лом конструкције. Веома битан показатељ жилавости материјала је и однос удела жилавог и кртог лома. Што је удео жилавог лома мањи то је и кртост материјала већа, односно већа је могућност за појаву кртог лома и обрнуто. Што се тиче основног материјала, његове карактеристике жилавости су изузетно повољне на собној температури.

9.2 Испитивање затезањем

9.2.1 Уводне напомене

Спада у методе испитивања материјала са разарањем и њиме се одређује отпорност завареног споја на дејство спољашњих затезућих сила. Овим испитивањем одређују се јачина на кидање (R_m , МПа), напон течења ($R_{p0.2}$, МПа), издужење (A_5 , A_{11} , %) и сужење (Z , %). Испитивање обухвата припрему и постављање епрувета – узорка стандардног облика и димензија, на уређај који се зове кидалица. Кидалица је опремљена динамометром за мерење силе и писачем који у сваком моменту записује зависност издужења од силе. Оптерећивање се врши до кидања, за време кога је регистрована зависност сила и издужење испитиване епрувете и одређене основне механичке карактеристике.

Помоћу забележених података при испитивању одређују се [15]:

- Јачина на кидање, R_m , МПа (Затезна чврстоћа):

$$R_m = \frac{F_m}{A_0}, \text{ МПа} \quad (9.1)$$

- Напон течења, $R_{p0.2}$, МПа (Горња граница течења, R_{eH}):

$$R_{p0.2} = \frac{F_{p0.2}}{S_0}, \text{ МПа} \quad (9.2)$$

- Издужење A_5 , A_{11} , %:

$$A_s = \frac{l-l_0}{l_0} \cdot 100, \% \quad (9.3)$$

где је: F_m – максимална сила у N,

S_0 – површина почетног попречног пресека узорка у mm^2 ,

Δl – издужење прекинуте епрувете у mm ,

F_p ($F_{p0.2}$) – сила на граници течења у N и

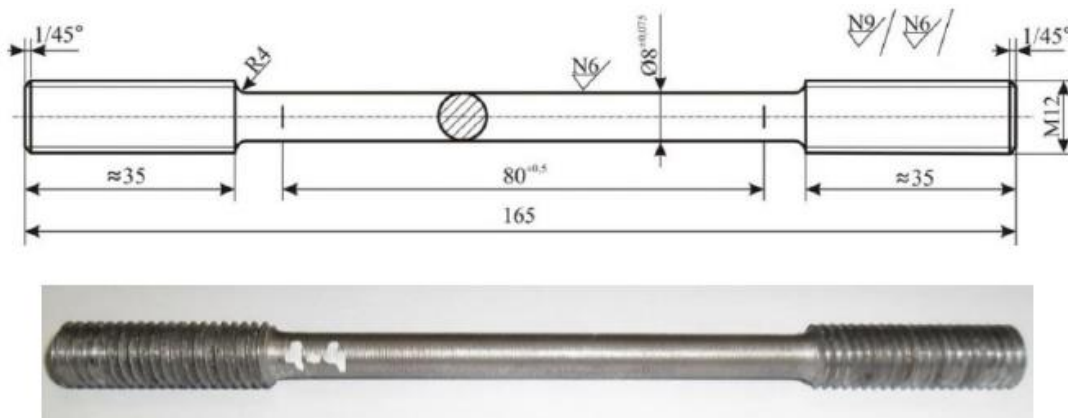
l_0 – почетна дужина пробе у mm .

Овим испитивањем може се показати квалитет изведеног завареног споја. Уколико се лом епрувете деси у зони споја (МШ, ЗУТ) може се закључити да је заварени спој најслабија карика у систему и обрнуто.

Уколико се лом епрувете деси ван зоне завареног споја, то представља најповољнији случај, што значи да је примењена технологија заваривања оптимална.

9.2.2 Експериментална испитивања

Експериментално испитивање извршено је на собној температури у статичким условима оптерећења до кидања. Облик, димензије и изглед испитиване епрувете приказан је на слици 9.15. Епрувете су израђене од угљеничног челика S355J2G3, исечене су из заварене плоче (15 mm) тако да садрже заварени спој, док су са друге стране, припремљене епрувете за испитивање затезањем без завареног споја.



Слика 9.16 Изглед епрувете за испитивање затезањем (ОМ и заварени спој)

Затезање је извођено у акредитованој лабораторији на кидалици мерног опсега 1÷100 kN. Брзина деформисања износила је 10 mm/min. На слици 9.17 приказан је изглед епрувета (ОМ и заварени спој) након лома.



Епрувета за испитивање затезањем – ОМ



Епрувета после испитивања затезањем - ОМ



Епрувета за испитивање затезањем – 3С



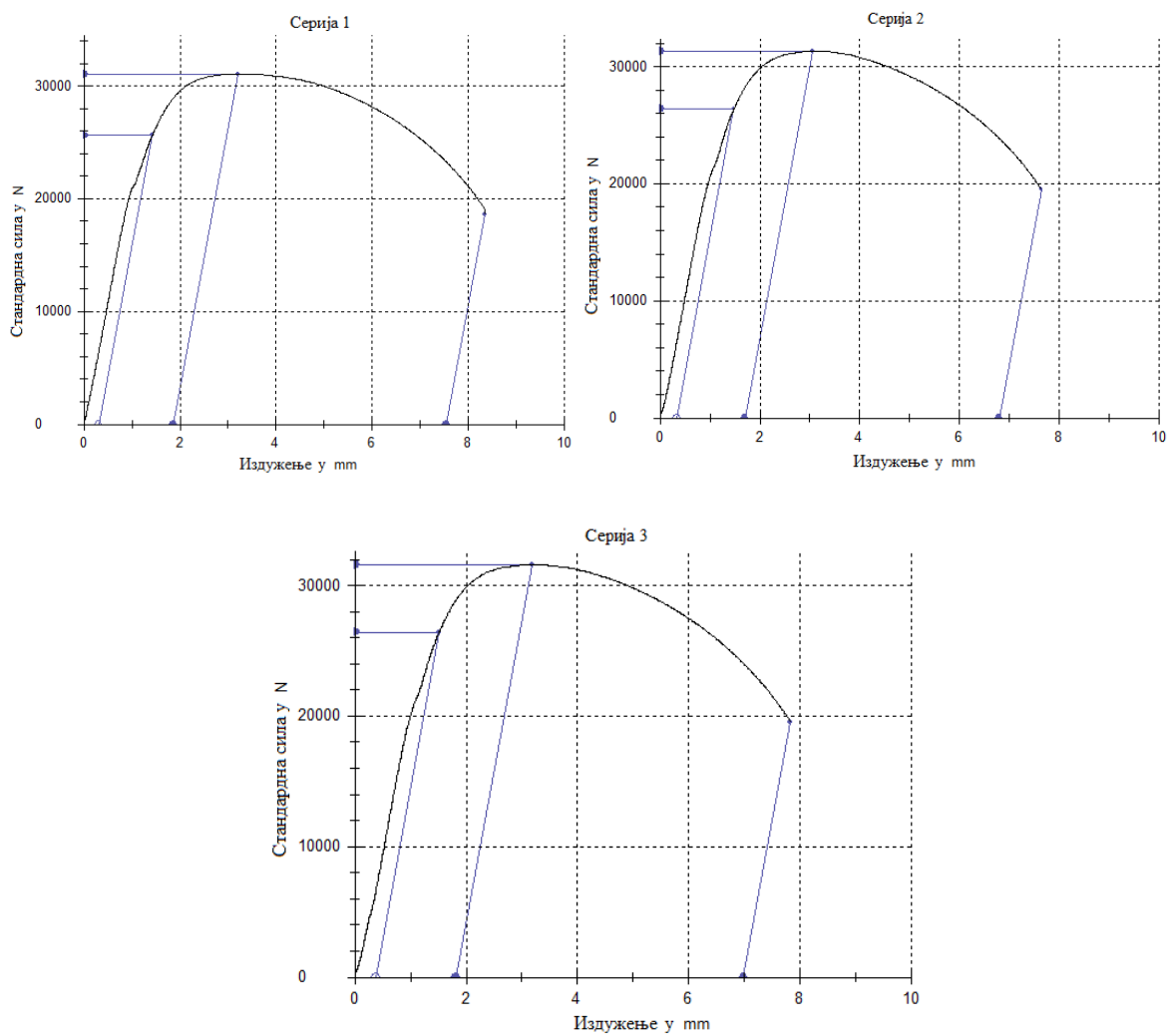
Епрувета за испитивање затезањем – 3С

Слика 9.17 Изглед епрувета за испитивање затезањем (ОМ и заварени спој)

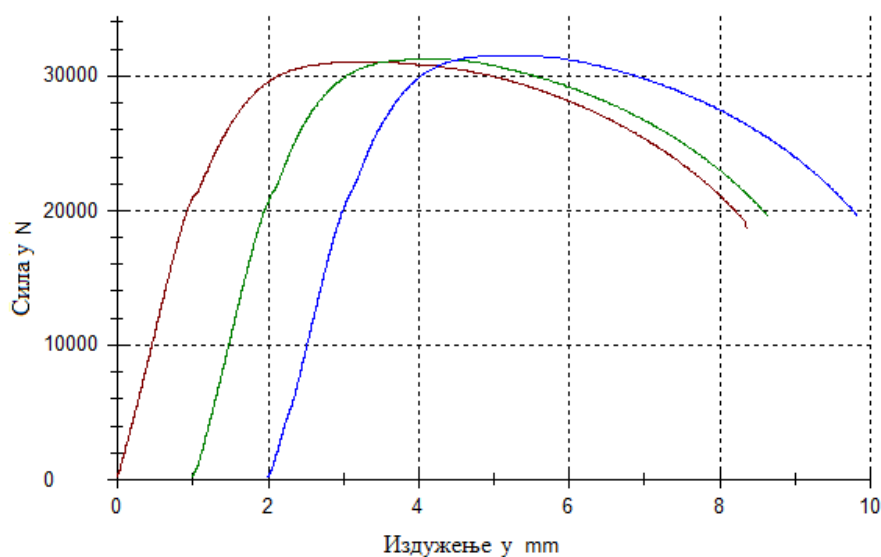
Добијени резултати приказани су у табелама 9.7 и 9.8, док су дијаграми затезања за ОМ приказани на сликама 9.18-9.20.

Табела 9.7. Експериментални резултати испитивања затезањем – ОМ S355J2G3

Број узорака	S_0, mm^2	L_0, mm	$R_{p0.2}, \text{MPa}$	R_m, MPa	$A, \%$
1	49.02	140	522.70	633.11	5.37
2	49.02	140	537.86	638.21	4.82
3	49.02	140	538.54	643.78	4.93



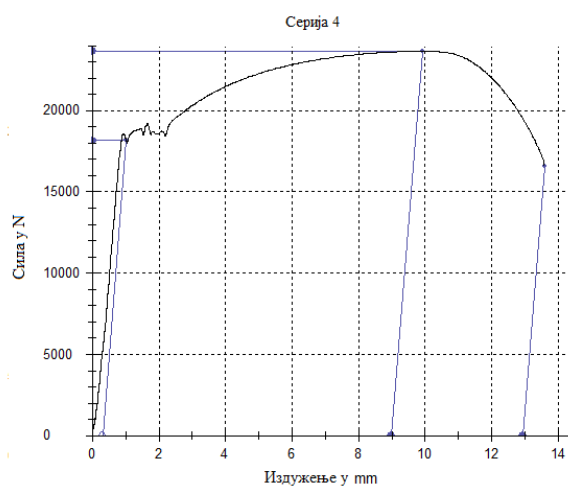
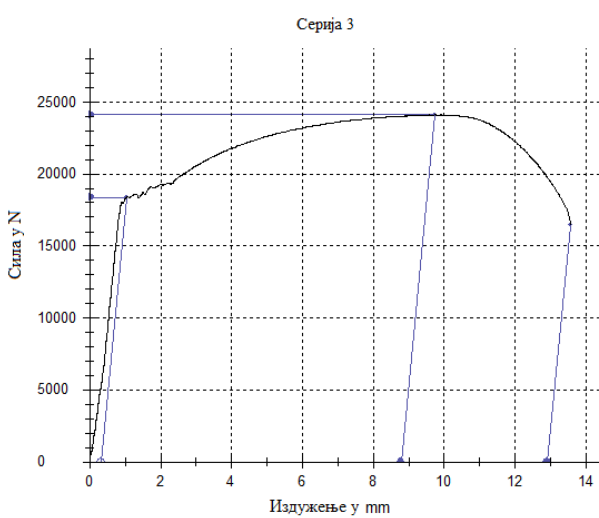
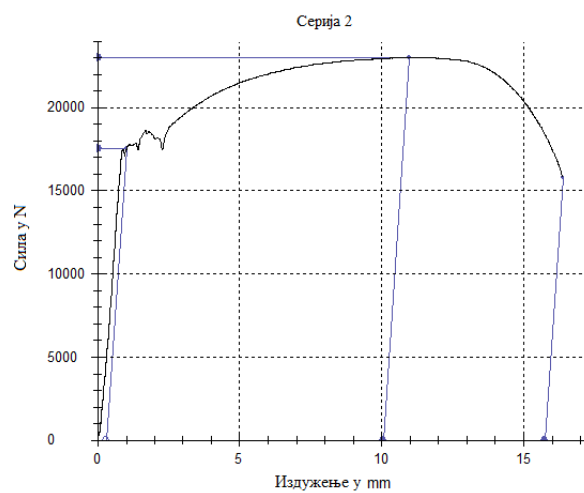
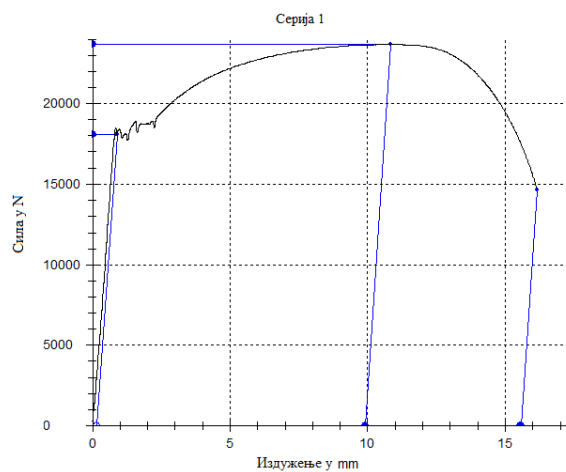
Слика 9.18. Дијаграми затезања за 3 епрувете – ОМ



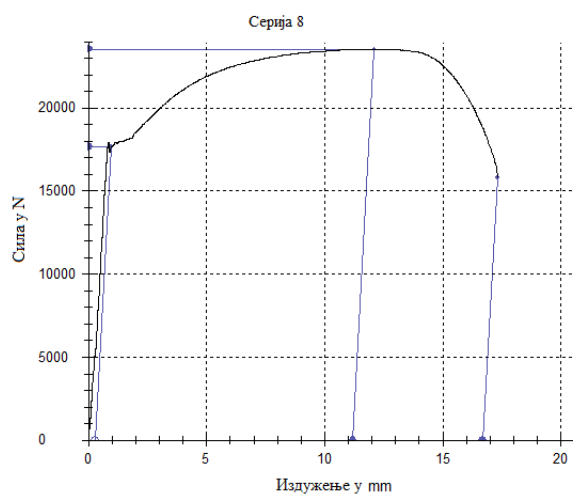
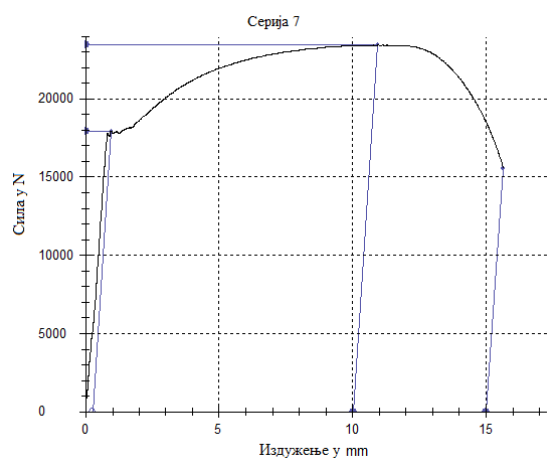
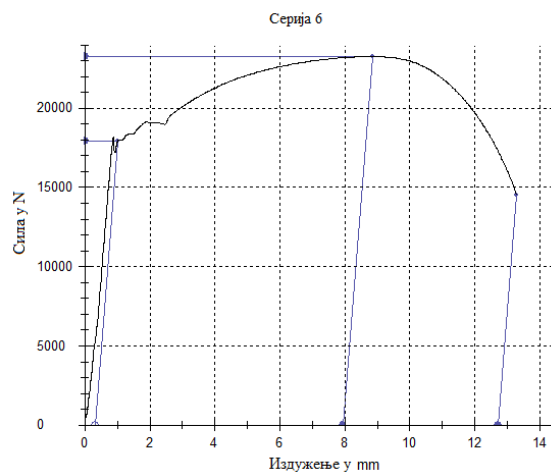
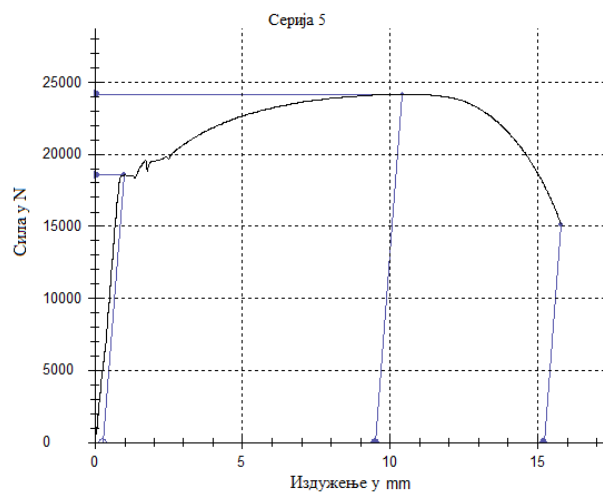
Слика 9.19 Збирни приказ дијаграма при испитивању затезањем-ОМ

Табела 9.8 Експериментални резултати испитивања затезањем-заварени спој

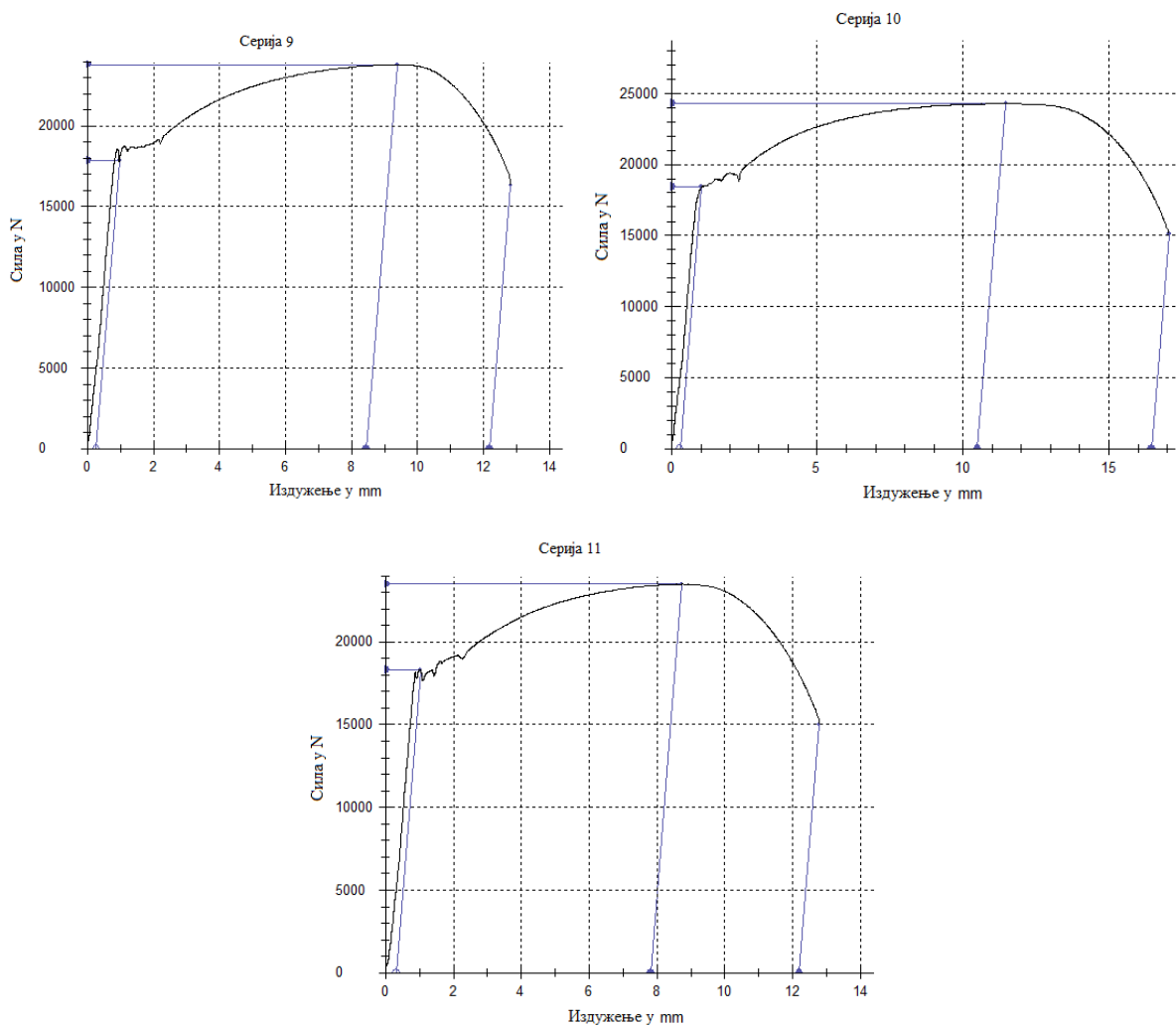
Број узорака	S_0, mm^2	L_0, mm	$R_{p0.2}, \text{MPa}$	R_m, MPa	$A, \%$
1	44.18	90.00	409.22	535.91	16.80
2	43.01	90.00	407.93	534.89	17.35
3	45.36	90.00	405.31	531.30	14.20
4	44.18	90.00	411.15	535.97	14.24
5	44.18	90.00	420.26	546.79	16.79
6	44.18	90.00	405.96	526.92	13.98
7	44.18	90.00	405.77	530.69	16.60
8	44.18	90.00	399.93	532.80	18.46
9	45.36	90.00	393.49	524.93	13.44
10	45.36	90.00	406.62	535.46	18.16
11	44.18	90.00	414.84	531.80	13.41



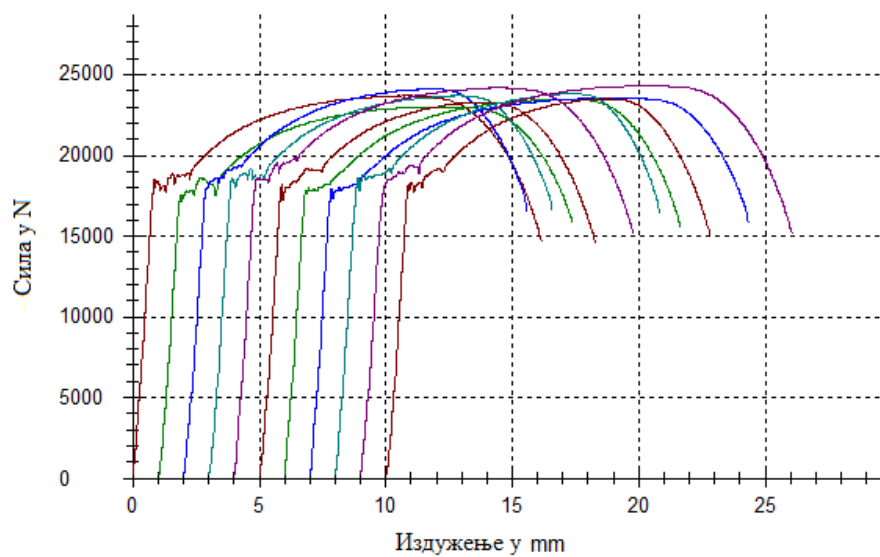
Слика 9.20-1 Дијаграми затезања за епрувете 1, 2, 3 и 4 – заварени спој



Слика 9.20-2 Дијаграми затезања за епрувете 5,6,7 и 8 – заварени спој



Слика 9.20-3 Дијаграми затезања за епрувете 9,10 и 11 – заварени спој



Слика 9.21 Збирни приказ дијаграма при испитивању затезањем-заварени спој

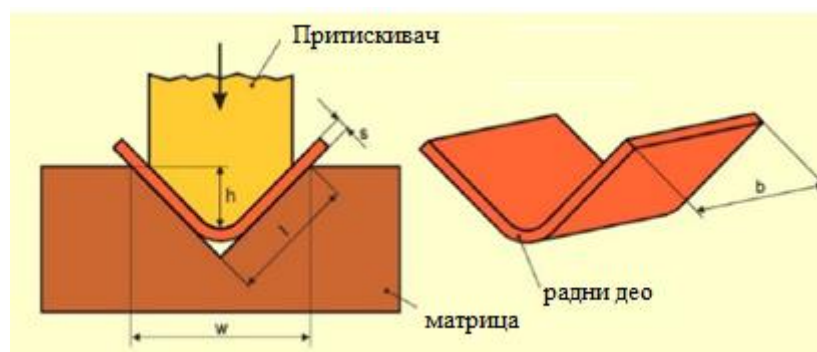
Почетни део криве најчешће је праволинијски. У овој области постоји линеарна зависност између силе и издужења, односно област у којој важи Хуков закон еластичности. Према Хуковом закону важи да је релативна деформација еластичног тела директно пропорционална напону који на њега делује. Константа пропорционалности у линеарном односу између деформације и напона назива се модул еластичности и зависи од карактеристика материјала и температуре. Са порастом напона преко границе еластичности, издужења постају све већа па се крива све више савија према апсциси.

Положај места кидања на свим испитиваним епруветама налази се изван зона заварених спојева, тј. у основном материјалу, што представља још један показатељ да су примењени методи и технологије заваривања, као и параметри заваривања правилно одабрани.

9.3 Испитивање савијањем

9.3.1 Уводне напомене

Испитивање савијањем се веома често користи у пракси. Епрувете за савијање су најчешће кружног или правоугаоног облика, на конкретном примеру, у питању је правоугаони облик. Заварени узорци се после одговарајуће припреме подвргавају дејству силе савијања (слика 9.22). Ако се за време пробе постигне најмања тражена вредност угла савијања, без појаве прслина, сматра се да је резултат испитивања позитиван. Резултати добијени савијањем служе да се одреди пластичност споја. Ако се у току испитивања уоче мале прслине у шаву резултат је негативан под условом да је угао савијања мањи од траженог.



Слика 9.22 Поступак испитивања савијањем

9.3.2 Експериментална испитивања

Испитивање савијањем има за циљ да се одреди деформациона способност шави и зоне утицаја топлоте. Изводи се према стандардизованим условима. Испитују се

непрекидним савијањем брзином од око 10 mm/min. Мера пластичности је угао савијања. Изгледи епрувета приказани су на сликама 9.23 - 9.28, добијени резултати приказани у табелама 9.9 - 9.11, док је дијаграм савијања приказан на слици 9.29.



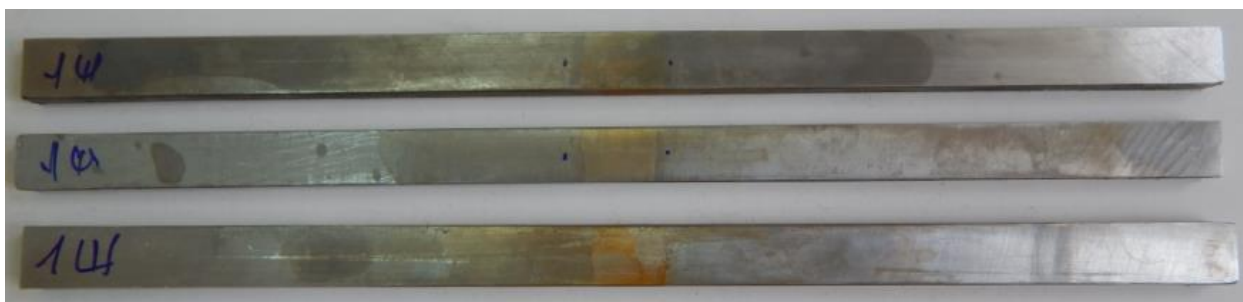
Слика 9.23 Изглед епрувета за испитивање савијањем-ОМ



Слика 9.24 Изглед епрувета после савијања - ОМ

Табела 9.9 Експериментални резултати испитивања савијањем – ОМ

Врста материјала	Број узорака	Температура, °C	Максимални распон силе $F_{\max}$, daN	v_{def} , mm/min	$F_{\max}$, daN	Угао савијања α , °
S355J2G3	1	20	10000	10	165	80
	2				165	89,5
	3				160	89



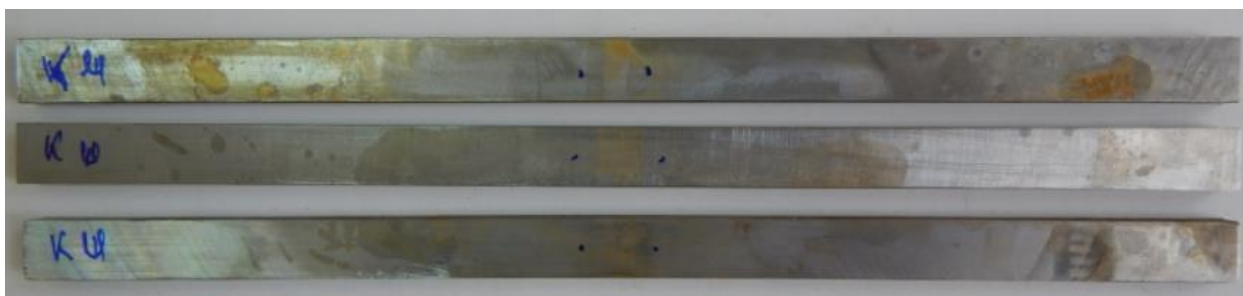
Слика 9.25 Изглед епрувета за испитивање савијањем-ЛШ



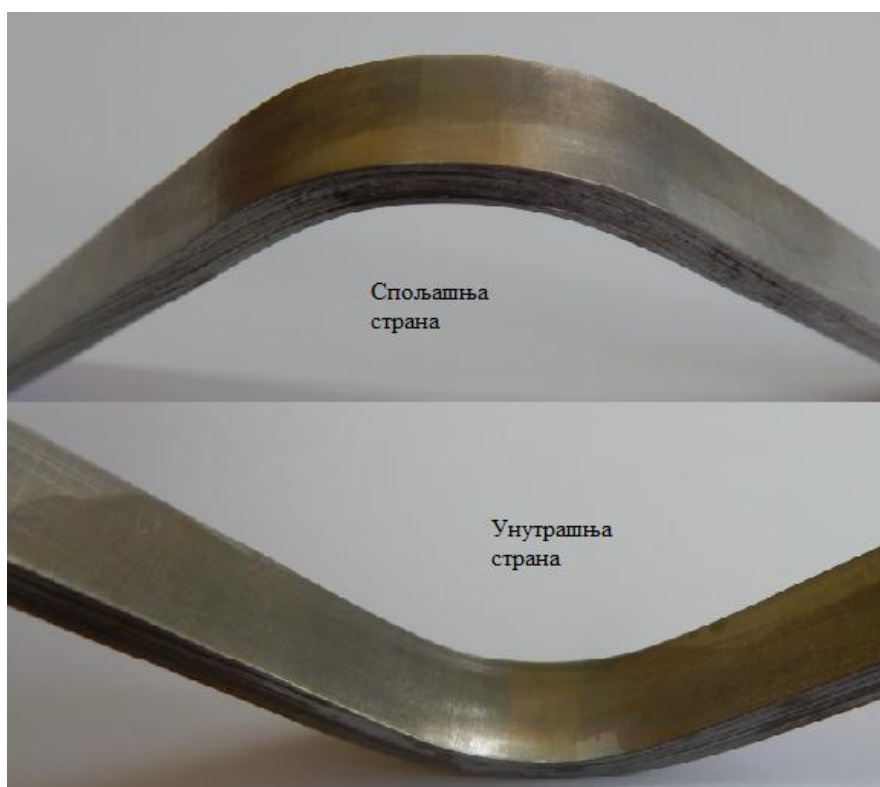
Слика 9.26 Изглед епрувета после савијања – ЛШ

Табела 9.10 Експериментални резултати испитивања савијањем – ЛШ

Врста материјала	Број узорака	Температура, °C	Максимални распон силе $F_{\max}$, daN	v_{def} , mm/min	$F_{\max}$, daN	Угао савијања α , °
S355J2G3	1	20	10000	10	167	90,5
	2				165	88
	3				129	92,5



Слика 9.27 Изглед епрувета за испитивање савијањем-КШ



Слика 9.28 Изглед епрувета после савијања – КШ

Табела 9.11 Експериментални резултати испитивања савијањем – КШ

Врста материјала	Број узорака	Температура, °C	Максимални распон силе $F_{\max}$, daN	v_{def} , mm/min	$F_{\max}$, daN	Угао савијања α , °
S355J2G3	1	20	10000	10	155	89
	2				148	90,5
	3				153	90,5

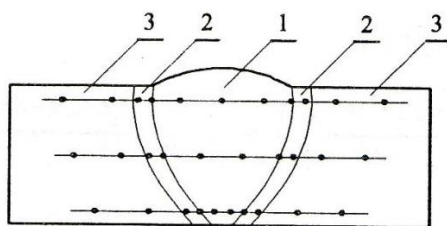
9.4 Мерење тврдоће и испитивање макроструктуре

9.4.1 Уводне напомене

9.4.1.1 Мерење тврдоће

Тврдоћа представља механичку особину материјала да се одупре продирању тела у њега и зависи од структуре материјала. Може се рећи да са порастом тврдоће долази до пада ударне жилавости и обрнуто. Пожељно је да тврдоћа, односно вредности које се јављају буду са што мање одступања у свим зонама материјала. Скок тврдоће дешава се у ЗУТ-у и дозвољен је до границе од 350 HV, јер се та вредност сматра границом повољне заварљивости челика. Главни разлог због којег се тврдоћа ограничава јесте да се спрече хладне прслине. Зато се код челика са повећаним садржајем угљеника ($CE > 0.40 \%$) мора смањити брзина хлађења и снизити садржај водоника у металу шав.

Тврдоћа се мери у више праваца и више места јер тврдоћа измерена на једном месту није у потпуности меродавна. Број праваца зависи од дебљине завариваних делова док се мерна места обично бирају тако да обухвате све карактеристичне зоне са по најмање 3 мерне тачке (слика 9.29). Већи број тачака значи и меродавније и поузданије резултате.



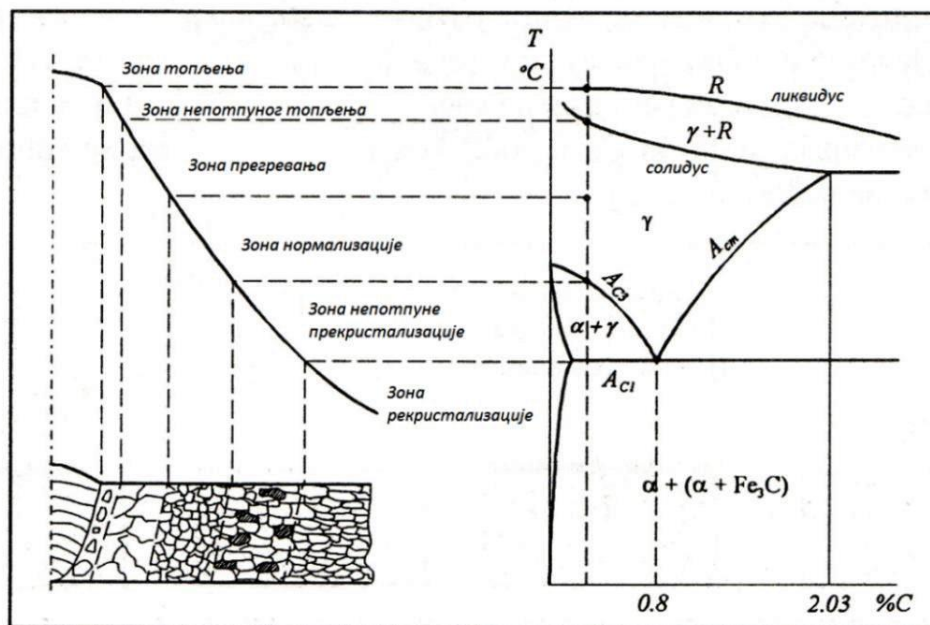
Слика 9.29 Мерење тврдоће - сучеони спој

9.4.2 Испитивање макроструктуре

На основу металографских испитивања врши се одређивање структуре материјала. Металографска испитивања имају за циљ одређивање и анализирање макроструктуре карактеристичних зона споја - метала шав, ЗУТ-а и основног материјала. У зависности од тога колико пута се увећава снимак узорка разликују се:

- *макроскопска* металографска испитивања и
- *микроскопска* металографска испитивања.

Макроскопска испитивања се изводе голим оком или при увећању узорка 20 пута. Површине је потребно припремити, односно обрусити и исполирати након чега се нагризају специјалним хемијским средством, које омогућава да се уоче метал шав, ЗУТ и основни материјал. На тај начин контролишу се шав, ЗУТ и основни материјал. На основу ових испитивања утврђују се линија стапања, регуларност ЗУТ-а, недовољно или превелико уваривање, порозност, укључци троске, хладни спојеви и др. Утврђују се и структура шав, ЗУТ-а и основног материјала (слика 9.30).



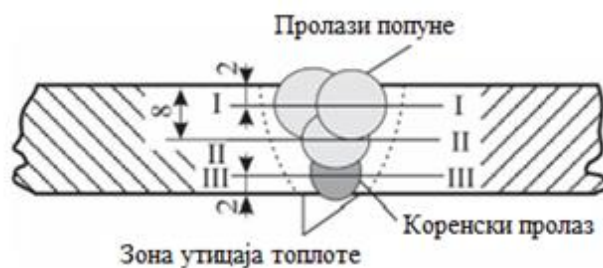
Слика 9.30 Структурне промене при заваривању угљеничних челика [1]

Микроскопска испитивања се изводе на металографским микроскопима. Заснивају се на анализи припремљених узорка са увећањем од 200÷500 пута, па и више. Посматра се: средиште шави, зона стапања, зона непотпуног топљења, зона прегревавања, зона нормализације, зона рекристализације, као и непромењен основни материјал.

Припрема металографског узорка обухвата низ строго контролисаних поступака с циљем да се обезбеди релевантна анализа реалног микроструктурног стања узорка на металографском микроскопу. Припрема површине металографског узорка обухвата њено почетно равнање, затим грубо и fino брушење, полирање, одмашћивање, испирање и сушење. Брушењем се поравњава површина узорка, најпре на тоцилу, а затим и брусним папирима све мање крупноће зрна уз сталне промене смера брушења. На тај начин се одстрањују сва оштећења и постиже се огледаласт метални сјај. После механичке припреме површине изводи се њено хемијско нагризање реактивним средством (5% - тни раствор азотне киселине у алкохолу - нитал 4), што представља последњи поступак припреме. После нагризања металографски узорци се испирају дестилованом водом и алкохолом, а затим се пажљиво суше у струји топлог ваздуха.

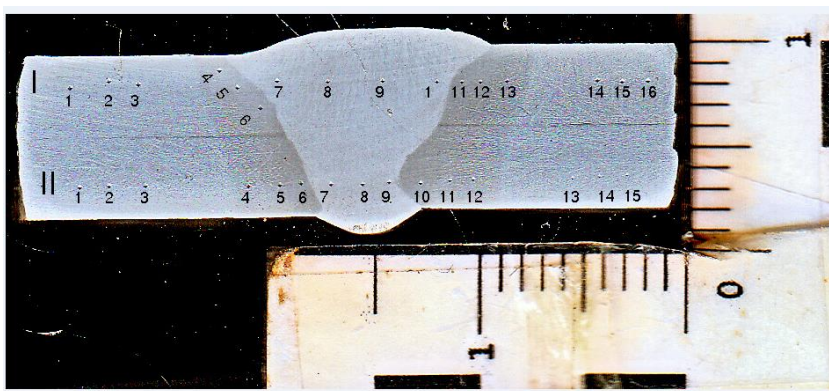
Металографско испитивање завареног споја

У овој фази извршено је мерење микротвдоће у три различита међусобно паралелна правца на узорку са завареним спојем који је остварен поступком МАГ заваривања, чији су положаји шематски приказани на слици 9.31.



Слика 9.31 Правци мерења микротврдоће на узорку

За дебљину плоче до 8 mm, правац мерења I-I обухвата основни материјал, зону утицаја топлоте и метал шава, док је правац II-II постављен са стране коренског пролаза у зони завареног споја. Изглед узорка и места мерења приказани су на слици 9.32, док су механичке –металографске особине приказане у табели 9.12.



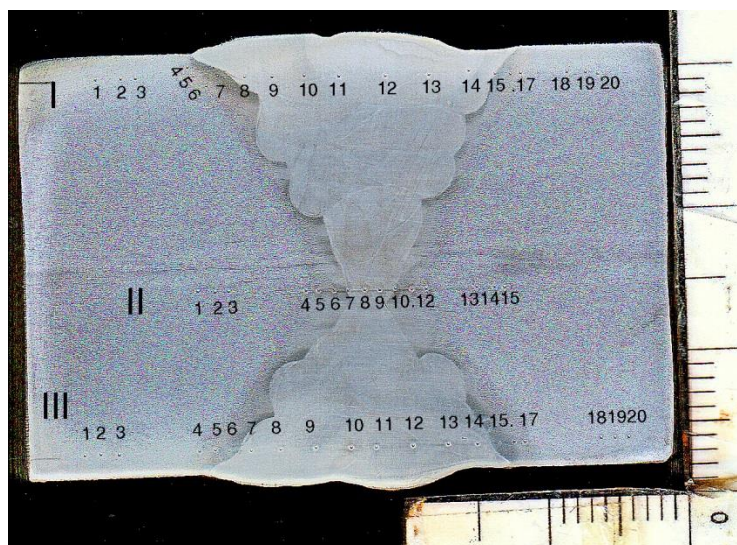
Слика 9.32 Места мерења микротврдоће на металографском узорку - 8 mm

Табела 9.12 Механичке особине узорка

Ознака узорка	R_m , МПа	Место прекида	D_0 , mm	α , °	Димензије епрувета	
					a, mm	b, mm
739.1	546	ОМ			8.0	25.6
739.2	543	ОМ			8.0	25.6
739.1l			32	180	8.0	30
739.2k			32	180	8.0	30
739.3l			32	180	8.0	30
746. 4k			32	180	8.0	30

За дебљину плоче до 30 mm, правац мерења I-I обухвата основни материјал, зону утицаја топлоте и метал шава. Правац II-II је одабран по средини споја у зони у којој је дошло до мешања коренског и покривног додатног материјала. Правац III-III је постављен са стране коренског пролаза у зони завареног споја у којој је доминантан

утицај начина извођења, параметара и додатног материјала коренског пролаза. Места мерења микротврдоће на узорку и изглед узорка након извршеног мерења микротврдоће приказани су на слици 9.33, док су механичке –металографске особине приказане у табели 9.13.



Слика 9.33 Места мерења микротврдоће на металографском узорку - 30 mm

Табела 9.13 Механичке особине узорка

Ознака узорка	R_m , МПа	Место прекида		D , mm	α , °	Димензије епрувета	
						a, mm	b, mm
740.1	602	ОМ					25
740.2	587	ОМ					25
740.3	595	ОМ					25
740.4	591	ОМ					25
746. 1l			Бочно савијање	10	180	16	30
746. 2 k				10	180	10	30
746. 3l				10	180	10	30
746. 4k				10	180	10	30

10. ЗАКЉУЧАК

У уводним напоменама истакнути су главни циљеви и разлози за израду овог мастер рада. У другом поглављу је укратко наведен историјат фирме "*Wacker Neuson CE*" у којој тренутно радим и која ми је омогућила извођење обимног експеримента из области њене делатности. У трећем поглављу дати су основни појмови о техници и технологији заваривања као једној од најважнијих производних технологија. У поглављу четири су дати основни појмови о заварљивости, као и о методама за процену овог сложеног технолошког својства. У петом поглављу дат је преглед најважнијих начина заваривања, пре свега заваривања топљењем. Нешто детаљније су описани поступци REL и MAG заваривања, као данас највише заступљени методи заваривања. У шестом поглављу указано је на значај избора додатног материјала за заваривање, као и заштитних гасова (инертних и активних). У седмом и осмом поглављу указује се на функцију кашике багера, њене најважније делове, врсту материјала од које је израђена, као и план и редослед заваривања појединих подсклопова и делова ове сложене заварене конструкције. Такође, наведен је и технолошки поступак заваривања кашике багера.

У деветом, најобимнијем поглављу, детаљно се описују експериментална испитивања заварених спојева, припремљених у фирми "*Wacker Neuson CE*". Из заварених моделских плоча су припремљени посебни узорци (тзв. "епрувете") за механичко-металографска испитивања. Већи део експерименталних испитивања изведен је на Факултету инжењерских наука у Крагујевцу, а један део у акредитованој лабораторији Институт Гоша (Смедеревска Паланка). Испитивања затезањем имала су за циљ упоређивање најважнијих својстава завареног споја са основним материјалом. Испитивање ударне жилавости имало је за циљ упоређивање енергије лома основног материјала са енергијом лома појединих делова завареног споја (ЗУТ-а, зоне стапања и метала шава), како са стране лица, тако и са стране корена шава. Циљ испитивања савијањем био је упоређивање својстава пластичности основног материјала са особинама завареног споја (лица и корена шава). Металографска испитивања укључила су макрографску анализу завареног споја (облик и геометрију споја, хомогеност метала шава, присуство грешака у завареном споју и др.) и мерење тврдоће појединих зона завареног споја.

На основу изведених експеримената и потврде надлежног акредитационог тела извршена је тзв. квалификација и верификација одабране технологије заваривања.

На основу експерименталних испитивања донети су следећи закључци:

- испитивања затезањем су показала да су најважнија својства завареног споја (отпорности и деформације) приближно једнака или чак већа од својстава основног материјала,
- испитивањем ударне жилавости појединих зона завареног споја је утврђено да нема великих одступања у односу на ударну жилавост основног материјала и да није регистрован крти лом,

- спроведена испитивања савијањем су показала изузетно високу пластичност основног материјала и завареног споја (са стране лица и корена шава) и да нема никаквих већих разлика у добијеним резултатима,
- макрографска испитивања су показала да је вишепролазни шав хомоген, правилног облика и без уочених присутних грешака и
- мерење тврдоће у појединим зонама завареног споја (у три правца) су показала да нема битних одступања у измереним вредностима, односно да нема присутних кртих фаза, јер су све измерене вредности знатно мање од критичне (350 HB);

На основу спроведених опсежних експерименталних испитивања може се коначно закључити да је одабрана технологија заваривања квалификована и верификована (потврда надлежног акредитационог тела) и да се она може успешно применити при изради реалне конструкције тј. кашике багера утоваривача.

11. ЛИТЕРАТУРА

- [1] М. Јовановић, В. Лазић: *Технологија ливења и заваривања*, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2015.
- [2] М. Јовановић, Д. Адамовић, В. Лазић: *Технологија заваривања-приручник*, друго издање, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2011.
- [3] Интернет адреса: <http://www.wackerneuson.us/en/wacker-neuson-us/home.html>, приступљено дана: 20.06.2017.
- [4] М. Милотић: *Приручник за завариваче*, Саобраћајни факултет у Добоју, Добој (Република Српска, БиХ), 2008.
- [5] Интернет адреса:
<https://www.aflglobal.com/Products/Conductor-Accessories/Substation-Accessories/230-kV-or-Less-Aluminum-Welded/Welded-Couplers/230-kV-Aluminum-Welded-Bus-Pipe-Couplers.aspx>, приступљено дана: 22.06.2017.
- [6] Интернет адреса:
<http://www.waybuilder.net/free-ed/Courses/05%20Building%20and%20Contruction/050205%20Welding/Welding00.asp?iNum=0304> приступљено дана: 23.06.2017.
- [7] Интернет адреса:
http://www.riteh.uniri.hr/zav_katd_sluz/zvd_kons_stroj/katedre/konstruiranje/kolegiji/ke1/ke1_materijali_vj/KE1%20www%20Zavareni%20spojevi.pdf приступљено дана: 23.06.2017.
- [8] Интернет адреса: <https://www.scribd.com/doc/80459343/zavar1> приступљено дана: 24.06.2017.
- [9] Интернет адреса:
http://www.riteh.uniri.hr/zav_katd_sluz/zvd_kons_stroj/katedre/konstruiranje/kolegiji/ke1/ke1_materijali_vj/KE1%20www%20Zavareni%20spojevi.pdf приступљено дана: 03.07.2017.
- [10] Б. Факић: *Утицај поступака заваривања на физичко-металуришке карактеристике челика: S355J2G3, 16Mo3, 13CrMo4-5 у зони утицаја топлоте*, Факултет за металургију и материјале у Зеници, Зеница (БиХ), 2010.
- [11] М. Мутавцић: *Репаратурно наваривање делова машина и уређаја грађевинске механизације*, докторска дисертација, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2015.
- [12] Интернет адреса:
http://ttl.masfak.ni.ac.rs/ANALIZA%20NOSECIH%20STRUKTURA%202006_2007%20S%20A%20J%20T/PREDAVANJE-2%20%20%20ANS.pdf приступљено дана: 04.07.2017.
- [13] Интернет адреса: <http://www.kovintrade.hr/materijali/#okrugli-celik> приступљено дана: 05.07.2017.

- [14] Интернет адреса: <https://www.tradeindia.com/fp1259655/EN-10025-S355JR-S355JO-S355J2G3-S355J2G4-Steel-Plate.html> приступљено дана:10.07.2017.
- [15] М. Јовановић, Д. Адамовић, В. Лазић, Н. Ратковић: *Машински материјали*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2003.
- [16] Интернет адреса: <http://scindeks-clanci.ceon.rs/data/pdf/0354-7965/2004/0354-79650401023z.pdf> приступљено дана: 11.07.2017.
- [17] Интернет адреса: <http://www.gradjevinarstvo.rs/katalog/dokumenta/11482/Hardox%20-Tvrdoca%20i%20zilavost.pdf> приступљено дана: 13.07.2017.
- [18] Интернет адреса: <http://scindeks-clanci.ceon.rs/data/pdf/0354-7965/2004/0354-79650401023z.pdf> приступљено дана: 14.07.2017.
- [19] Интернет адреса: <http://www.roadandtrack.com/car-culture/a27193/819-roa-2015-12-01-lost-art-gas-welding-67-5/?zoomable> приступљено дана:14.07.2017.
- [20] Интернет адреса: <http://www.wholesaleweldingsupplies.ie/image/data/04.jpg> приступљено дана: 16.07.2017
- [21] Интернет адреса: <https://www.slideshare.net/miroslavastevanovic/gasno-zavarivanje> приступљено дана:20.07.2017.
- [22] Интернет адреса: https://www.google.rs/search?q=gasno+zavarivanje+oprema&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwit6sXT6tPTAhWJvxQKHYYi6A4oQ_AUIBigB&biw=1670&bih=830#tbm=isch&q=equipment+for+gas+welding&imgsrc=qHdueDnQGtnkBM:&spf=634 приступљено дана: 22.07.2017.
- [23] Интернет адреса: <http://www.weldingbn.mk/B&N/en/welding.html> приступљено дана: 23.07.2017.
- [24] Интернет адреса: http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-BDC1E22D-7BE007FF/fronius_international/hs.xsl/79_787_ENG_HTML.htm#.WSVJaU1WGUK приступљено дана:30.07.2017.
- [25] Интернет адреса: <http://www.weldpedia.com/2014/04/five-types-of-welding-electrode-coatings.html> приступљено дана: 31.07.2017.
- [26] Интернет адреса: <http://www.ipo-tools.hr/uredzaj-za-zavarivanje> приступљено дана: 31.07.2017.
- [27] Интернет адреса: <https://makemoneywelding.com/wp-content/uploads/2015/09/mig-welding-a-large-pipe.jpg> приступљено дана: 31.07.2017.
- [28] Интернет адреса: http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-BDC1E22D-7BE007FF/fronius_international/hs.xsl/79_4675_ENG_HTML.htm приступљено дана: 31.07.2017.

- [29] Интернет адреса: http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-BDC1E22D-7BE007FF/fronius_international/hs.xsl/79_4675_ENG_HTML.htm приступљено дана: 01.08.2017.
- [30] Интернет адреса: <http://ptk-welding.ru/finntig> приступљено дана: 01.08.2017.
- [31] Интернет адреса: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:GTAW_torch.png приступљено дана: 01.08.2017.
- [32] Интернет адреса: <https://prekucavanje.files.wordpress.com/2012/10/specijalisticki-rad-primer-2.pdf> приступљено дана: 01.08.2017.
- [33] Интернет адреса: <http://www.welderreferer.com/2015/08/the-effects-of-polarity-on-tig-welding.html> приступљено дана: 02.08.2017.
- [34] Интернет адреса: <http://www.wurth.rs/media/114449/ZAVARIVANJE-R.pdf> приступљено дана: 02.08.2017.