

**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: 372/2013

Владимир М. Милановић

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСПИТИВАЊЕ ЗАВАРЉИВОСТИ И
ИЗБОР ОПТИМАЛНЕ ТЕХНОЛОГИЈЕ ЗАВАРИВАЊА
ЧЕЛИКА ПОВИШЕНЕ ЈАЧИНЕ S690 QL**

мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. др Вукић Лазих - ментор

Датум одбране: _____

2. _____

Оцена: _____

3. _____

У оквиру овог рада кандидат би требало да:

- 1) Наведе и опише најважније врсте челика повишене јачине (чврстоће).
- 2) Укаже на сложеност заварљивости челика повишене јачине и да на примеру челика класе S690 QL теоријски и експериментално одреди његову заварљивост и да предложи најповољнију технологију односно поступке заваривања, додатни материјал и изабере оптималну технологију заваривања.
- 3) Укаже на оправданост избора технологије заваривања и предложи најповољнију технологију за разматрани челик и да анализира добијене експерименталне резултате како би заварена конструкција у експлоатацији била што поузданија.

Препоручена литература:

- [1] **М. Јовановић, В. Лазих:** *Упутство за заваривање челика повишене јачине*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2008.,
- [2] **Д. Арсић,:** *Оцена заварљивости и избор најповољније технологије челика класе S690 QL*, Мастер рад, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2013.,
- [3] **Д. Ђорђевић:** *Оцена технолошко - металуршке заварљивости челика повишене јачине* - специјалистички рад, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2010.,
- [4] **М. Јовановић, Д. Адамовић, В. Лазих:** *Технологија заваривања - приручник*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2011.,
- [5] **А. Живковић, В. Милановић, В. Лазих:** *Повећање продуктивности заваривања челика WELDOX 700*, Заваривање и заварене конструкције, 2015, Број 2, Бр. стр. 53-60.

У Крагујевцу, октобра

ментор:
Др Вукић Лазих, ред. проф.

Резиме: У овом мастер раду, поред теоријских разматрања поделе челика повишене јачине, утицаја легирајућих елемената и најважнијих особина микролегираних челика, извршена је анализа експерименталних резултата заваривања челика класе S690 QL. Заваривање је извршено са пет различитих технологија:

- прва технологија је РЕЛ/МАГ са седам пролаза;
- друга технологија је РЕЛ/МАГ са осамнаест пролаза;
- трећа технологија је МАГ/МАГ са коренским пролазом у заштитној атмосфери чистог CO₂;
- четврта технологија је МАГ/МАГ са коренским пролазом у заштитној атмосфери мешавине гасова 82% Ar + 18% CO₂ и
- пета технологија је МИГ/МАГ са коренским пролазом у заштитној атмосфери мешавине гасова 97,5% Ar + 2,5% CO₂.

Циљ анализе ових обимних експерименталних резултата јесте избор најповољније технологије заваривања челика класе S690 QL.

Кључне речи: челици повишене јачине, заваривање, челик S690 QL, додатни материјал, микроструктура, тврдоћа, ударна жилавост.

Abstract: In this master work, besides the theoretical considerations of the clasification of high strength steel, alloying elements and their influence on the characteristicsof steel and properties of microalloyed steel, an analysis of the experimental results of welding steel class S690 QL has been made. Welding is performed with five different technologies:

- the first technology assumed using of MMA/MAG welding method with seven passes;
- the second technology assumed using of MMA/MAG welding method with eighteen passes;
- the third technology assumed using of MAG/MAG welding method with the root pass with Carbon Dioxide (CO₂) as a shielding gas;
- the fourth technology assumed using of MAG/MAG welding method with the root pass with gas mixture of 82% Ar + 18% CO₂ as a shielding gas and
- the fifth technology assumed using of MIG/MAG welding method with the root pass with gas mixture of 97,5% Ar + 2,5% CO₂ as a shielding gas.

The objective analysis of these extensive experimental results is the choice of the best technologies of welding steel class S690 QL.

Key words: High strength steel, welding, steel S690 QL, filler material, microstructure, hardness, impact toughness.

ПРЕДГОВОР

Због својих изузетних карактеристика челици повишене јачине добијају све већу примену при изради одговорних челичних конструкција, а однос квалитет-цена доприноси ширењу те примене. Пошто се сматра условно заварљивим челиком, због погоршања особина у ЗУТ-у, задатак је био пронаћи одговарајућу технологију заваривања за задате услове у експлоатацији.

Истраживање је захтевало дуготрајни рад и опсежна испитивања различитих технологија заваривања које не би могло да се оствари без помоћи водећих стручних људи из ове области у различитим институцијама и фирмама.

Посебну захвалност дугујем свом ментору др Вукићу Лазићу, редовном професору Факултета инжењерских наука у Крагујевцу за несебичну помоћ и подршку. Захваљујем колеги Душану Арсићу мастер инжењеру машинства истраживачу сараднику Факултета инжењерских наука у Крагујевцу.

Захваљујем се др Зијаху Бурзићу, начелнику Сектора за ваздухопловство на Војнотехничком институту у Београду и др Гордани Бакић, доценту на Машинском Факултету у Београду на урађеним испитивањима за поједине технологије заваривања у тим институцијама.

Захваљујем колективу јавног предузећа Југоимпорт СДПР, радна јединица "Морава", Велика Плана на добијеним плочама од челика S690 QL на којима је изведено заваривање, а потом и испитивање заварених спојева.

Захвалност дугујем и колективу фирме ГОША ФОМ а. д. на уступљеним резултатима испитивања заварених спојева неких технологија и на извођењу практичног дела ових истраживања.

САДРЖАЈ:

Предговор

1. УВОД.....	1
2. ЧЕЛИЦИ ПОВИШЕНЕ ЈАЧИНЕ	2
2.1. Угљенични челици.....	2
2.1.1. Утицај угљеника на структуру и својства угљеничних челика.....	3
2.1.2. Примесе у угљеничним челицима.....	3
2.1.3. Конструкциони челици	4
2.2. Легирани челици	5
2.2.1. Легирајући елементи и њихов утицај на особине челика	5
2.3. Финозрни микролегирани челици	11
2.3.1. Микролегирани нормализовани ситнозрни челици	14
2.3.2. Побољшани ситнозрни челици.....	17
3. ИСПИТИВАЊА ЗАВАРЕНОГ СПОЈА	19
3.1. Испитивања без разарања.....	19
3.2. Испитивања са разарањем.....	19
3.2.1. Испитивање макроструктуре	19
3.2.2. Испитивање микроструктуре.....	19
3.2.3. Мерење тврдоће	20
3.2.4. Одређивање ударне жилавости	22
3.2.5. Испитивање затезањем.....	24
4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСПИТИВАЊА.....	25
4.1. Прво експериментално испитивање – основни материјал	27
4.1.1. Испитивање макроструктуре	27
4.1.2. Испитивање микроструктуре.....	27
4.1.3. Мерење тврдоће	28
4.1.4. Одређивање ударне жилавости	28
4.1.5. Испитивање затезањем.....	31
4.2. Друго експериментално испитивање – технологија РЕЛ/МАГ са седам пролаза	33
4.2.1. Испитивање макроструктуре	34
4.2.2. Испитивање микроструктуре.....	34
4.2.3. Мерење тврдоће	36
4.2.4. Одређивање ударне жилавости	41
4.2.5. Испитивање затезањем.....	42
4.3. Треће експериментално испитивање – технологија РЕЛ/МАГ са осамнаест пролаза	44
4.3.1. Испитивање макроструктуре	45

4.3.2. Испитивање микроструктуре.....	45
4.3.3. Мерење тврдоће	46
4.3.4. Одређивање ударне жилавости	49
4.3.5. Испитивање затезањем.....	50
4.4. Четврто експериментално испитивање – технологија МАГ/МАГ са коренским пролазима у заштити угљен-диоксида	50
4.4.1. Испитивање макроструктуре	52
4.4.2. Испитивање микроструктуре.....	52
4.4.3. Мерење тврдоће	54
4.4.4. Одређивање ударне жилавости	58
4.4.5. Испитивање затезањем.....	59
4.5. Пето експериментално испитивање – технологија МАГ/МАГ са коренским пролазима у заштити гасова $Ar + 18\% CO_2$	61
4.5.1. Испитивање макроструктуре	63
4.5.2. Испитивање микроструктуре.....	63
4.5.3. Мерење тврдоће	64
4.5.4. Одређивање ударне жилавости	66
4.5.5. Испитивање затезањем.....	68
4.6. Шесто експериментално испитивање – технологија МИГ/МАГ са коренским пролазима у заштити $97,5\% Ar + 2,5\% CO_2$	68
4.6.1. Испитивање макроструктуре	69
4.6.2. Испитивање микроструктуре.....	69
4.6.3. Мерење тврдоће	74
4.6.4. Одређивање ударне жилавости	76
4.6.5. Испитивање затезањем.....	77
5. КОМЕНТАР ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ ИСПИТИВАЊА ЗАВАРЉИВОСТИ ЧЕЛИКА S690 QL	80
5.1. Основни материјал.....	80
5.2. Технологија РЕЛ/МАГ са седам пролаза.....	81
5.3. Технологија РЕЛ/МАГ са осамнаест пролаза	82
5.4. Технологија МАГ/МАГ са коренским пролазима у заштити CO_2	83
5.5. Технологија МАГ/МАГ са коренским пролазима у заштити $82\% Ar + 18\% CO_2$	84
5.6. Технологија МИГ/МАГ са коренским пролазима у заштити $97,5\% Ar + 2,5\% CO_2$	86
5.7. Упоредивање добијених резултата.....	87
5.7.1. Упоредивање добијених резултата испитивања макроструктуре	87
5.7.2. Упоредивање добијених резултата испитивања микроструктуре.....	87
5.7.3. Упоредивање добијених резултата одређивања тврдоће	88
5.7.4. Упоредивање добијених резултата одређивања ударне жилавости.....	89

5.7.5. Упоређивање добијених резултата испитивања затезањем.....	93
6. ЗАКЉУЧАК.....	94
7. ЛИТЕРАТУРА.....	96

1. УВОД

Развој челика повишене јачине је започео крајем прошлог века, када се појавила потреба за израдом одговорних заварених челичних конструкција које су изложене сложеним условима оптерећења. Технологија микролегирања омогућила је производњу ове категорије челика. Захваљујући микролегирајућим елементима, који омогућавају добијање финозрне микроструктуре у процесу ливења и специфичном процесу израде у ваљаницама, уз примену термичке обраде и високог степена деформације у току прераде, добијају се повишене механичке особине и отпорност на деформације и хабање, уз задржавање добрих технолошких особина, пре свега заварљивости. Ови материјали задржавају добре механичке особине како на собним тако и на ниским и релативно повишеним температурама. Повећање јачине ових челика резултат је позитивног дејства малих количина легирајућих елемената који, при томе не погоршавају заварљивост. Издвајање нисколегираних побољшаних челика у посебну групу, оправдано је и из економских разлога, јер им је цена незнатно већа од угљеничних челика. Циљ је, при избору основног материјала за заварене конструкције да материјал буде што јефтинији, а да при томе задовољи тражена механичка својства. Економичност примене ових челика у завареним конструкцијама новијег је датума произлази из чињенице да испуњавају те захтеве. У ове челике сврставају се сви челици са напоном течења већим од 360 МПа.

С обзиром на комплексност појма заварљивост где се увек сагледава узајамна веза конструкције, материјала и технологије, заварљивост челика повишене јачине захтева посебну пажњу у проучавању, нарочито што су неки од ових челика заварљиви само уз примену посебних мера везаних за контролисани унос топлоте. Ако је основни материјал микролегирани челик повишене јачине онда је избор најповољније технологије заваривања основни услов за поуздан рад заварене конструкције.

У овом мастер раду су укратко поменуте врсте челика и главне поделе док се за детаљније информације везане за поделе челика повишене јачине, могућности повећања јачине, проблеме заварљивости могу видети у одговарајућој литератури [6], тј. завршном раду В. Милановића, под називом: *"Оцена заварљивости челика повишене јачине на примеру челика S690 QL"*.

У овом мастер раду биће изостављен већи део теоријских разматрања који је знатно обимније разматран у раду [6], већ ће се највећи део овог рада бавити експерименталним испитивањима у циљу одабира најповољније технологије заваривања.

Овај мастер рад садржи шест обимних експерименталних испитивања, од којих прво даје експерименталне карактеристике основног материјала, док се наредних пет односе на различите поступке заваривања у циљу избора оптималне технологије заваривања челика S690 QL, уз напомену да су две технологије подразумевале РЕЛ/МАГ поступке, две МАГ/МАГ поступке и последња технологија МИГ/МАГ поступке.

Основни услов, који је проистекао из начина експлоатације производа, био је да заварени спој буде отпоран на ударна оптерећења, што је подразумевало заваривање коренског пролаза аустенитним додатним материјалом. Сви овде примењени поступци задовољили су овај услов.

2. ЧЕЛИЦИ ПОВИШЕНЕ ЈАЧИНЕ

Челици могу да се поделе према: хемијском саставу, намени, структури, начину добијања, квалитету, облику и стању полупроизвода.

Према хемијском саставу челици се деле на:

- угљеничне челике и
- легиране челике.

Према намени челици се деле на:

- конструкционе челике,
- алатне челике и
- челике са посебним својствима.

Према структури челици могу да буду феритни, феритно-перлитни, перлитни, подеутектоидни, еутектоидни, наеутектоидни, ледебуритни, аустенитни и мартензитни.

Према начину добијања разликују се Томасов, Бесемеров (LD), Сименс – Мартенов и електро-челик.

Према квалитету, тј. садржају сумпора и фосфора, челици се деле на:

- челике обичног квалитета (угљеничне) са садржајем сумпора до 0,06% и фосфора до 0,07%,
- квалитетне челике (угљенични и легирани) са садржајем сумпора 0,035 - 0,04% и фосфора 0,035 - 0,04%,
- високо квалитетне челике (легирани) са садржајем сумпора до 0,025% и фосфора до 0,025% и
- племените челике (легирани) са садржајем сумпора до 0,015% и фосфора до 0,015%.

Према облику и стању полупроизвода челици се деле на: ваљане, вучене, коване, ливене, брушене, пресоване и љуштене.

2.1. Угљенични челици

Угљенични челици су легуре гвожђа и угљеника (са садржајем С до 2,11%), у којима су присутне примесе. На угљеничне челике отпада 90% светске производње челика, па они представљају основни материјал у машинској индустрији. Угљеник је основна и најутицајнија компонента од које зависе структура и особине челика.

Према намени, угљенични челици се деле на:

- конструкционе, до 0,6% С и
- алатне, преко 0,6% С.

Угљенични челик је комбинација два елемента, гвожђа (Fe) и угљеника (C), где су остали елементи постоје у таквим односима да не утичу на особине легуре. Од легирајућих елемента, у угљеничном челику једино су дозвољени: манган, силицијум и бакар. Челик са ниским садржајем угљеника има исте особине као гвожђе. Како се садржај угљеника повећава, метал постаје тврђи и чвршћи, али мање жилав и тежи за заваривање. Висок садржај угљеника снижава тачку топљења челика, као и његову ватросталност и термopостојаност.

Према садржају угљеника челици се деле на:

- нискоугљеничне челике са садржајем угљеника од 0,05 до 0,29%. Нискоугљенични челици имају релативно ниску вредност затезне чврстоће, али су ковни и јефтини;
- челике са средњим садржајем угљеника од 0,30 до 0,59%. Поседују добру жилавост и чврстоћу па су јако отпорани на хабање;
- високоугљеничне челике са садржајем угљеника 0,60 до 0,99%. Врло су чврсти, користе се за опруге и жице високе чврстоће;
- ултра високоугљеничне челике са садржајем угљеника од 1,0 до 2,11%. Ови челици се топлотно обрађују до веома високе чврстоће.

Већина челика са преко 1,2% садржаја угљеника се праве методама прашкасте металургије и спадају у категорију високолегираних угљеничних челика.

Угљенични челик се може топлотно обрађивати, што омогућава да се делови производе док су још у меком стању. Ако је постоји довољно угљеника, легура може очврснути, те се тако повећава јачина, отпорност на хабање, као и отпорност на удар. Челици се обрађују и методом хладног ваљања, тј. обликовања метала путем деформација на ниској метастабилној температури.

2.1.1. Утицај угљеника на структуру и својства угљеничних челика

Са порастом садржаја угљеника, структура челика се мења од феритне, феритно-перлитне, перлитне, до перлитно – цементитне. Према томе, механичка својства угљеничних челика зависе од садржаја угљеника. Садржај од 0,1% С повећава затезну чврстоћу челика за око 90 МПа, а напон течења за око 45 МПа. Поређења ради, за сличан пораст затезне чврстоће потребно је 1% Mn, Si или Cr. Значи, угљеник утиче на особине гвожђа око десет пута јаче него наведени легирајући елементи.

Имајући у виду својства појединих структура челика, јасно је да са порастом садржаја угљеника код подеутектоидних челика значајно расте затезна чврстоћа – R_m , у мањој мери напон течења – R_{eH} , и тврдоћа, а смањује се издужење – A и сужење – Z .

Код наеутектоидних челика са порастом садржаја угљеника и даље расту напон течења и тврдоћа. Затезна чврстоћа расте до приближно 1,2% С, када достиже максимум, а потом опада. Ово може да се објасни повећањем количине секундарног цементита који се издваја на границама перлитних зрна, при порасту садржаја угљеника. То доводи до смањења затезне чврстоће, а нема утицаја на тврдоћу и напон течења.

Лоша страна повећања садржаја угљеника огледа се у следећем:

- повећању кртости челика, тј. смањењу жилавости и смањењу температуре преласка из жилавог у крто стање,
- погоршању заварљивости и
- безначајном утицају на смањење тежине (масе) конструкције.

2.1.2. Примесе у угљеничним челицима

Осим угљеника, као компоненте, у састав челика улазе и други елементи који се сматрају пратећим или случајним примесама.

Пратеће примесе, Si, Mn, Al, S и P у челику последица су процеса добијања гвожђа и челика.

Скривене примесе у челицима (N_2 , O_2 , H_2) потичу из ваздуха с којим растопљени челик долази у контакт у току изливања.

Случајне примесе су сви остали елементи који не спадају у пратеће или скривене примесе, а има их у челику у садржају мањем од минимално прописаног.

Садржај примеса у челицима треба да се сведе на најмању меру, с обзиром на то да они граде непожељна једињења као што су сулфиди, фосфиди и оксиди.

2.1.3. Конструкциони челици

Од конструкционих челика се захтева да имају добра механичка својства, да се добро обрађују резањем, деформисањем (ковање, ваљање, извлачење, пресовање), да имају добру заварљивост и ниску цену.

Према јачини (напону течења), ови челици се разврставају у четири групе:

1. челици ниске чврстоће, $R_e < 250 \text{ MPa}$,
2. челици средње чврстоће, $250 \text{ MPa} < R_e < 750 \text{ MPa}$,
3. челици високе чврстоће, $750 \text{ MPa} < R_e < 1550 \text{ MPa}$ и
4. челици ултрависоке чврстоће, $R_e > 1550 \text{ MPa}$.

Угљенични конструкциони челици припадају првој групи, а легирани челици другој, трећој или четвртој.

Постоји више група конструкционих челика: општи конструкциони челици, финозрни конструкциони челици, челици за цементацију, челици за побољшање, челици за опруге, челици за аутомате, челици отпорни према хабању, ватроотпорни челици, челици за рад на повишеним температурама, нерђајући челици и др.

2.1.3.1. Конструкциони челици с ниским садржајем перлита или без перлита

Осим класичних поступака производње конструкционих челика у другој половини 20-ог века развијена је нова технологија која је обухватала и термичку обраду па је такав поступак назван термомеханичка обрада. Таквим начином произведени челици већ у ваљаном стању имају повољну границу течења и отпорност према кртом лому. Међутим, термомеханичка обрада је успешна само уколико је садржај угљеника врло низак, па не утиче на повећање јачине. Такви челици представљају засебну групу заварљивих конструкционих челика повишене јачине, која се од нормализованих и побољшаних челика разликује по хемијском саставу, начину производње и механизму повећања јачине. Хемијски састав конструкционих челика сиромашних перлитом и без перлита приказан је у табели 2.1.

Челици сиромашни перлитом садрже 0,08 – 0,12% угљеника, док су челици без перлита разугљеничени поступцима секундарне металургије до екстремно ниског садржаја угљеника (максимално 0,02%). Изразито низак садржај угљеника онемогућава стварање перлита, зато што се онемогућава формирање цементита. Због сниженог садржаја угљеника изостаје његов утицај на јачину па је код таквих челика потребно применити микрولةгирање ниобијумом или ванадијумом ради повећања јачине. Ниобијум и ванадијум због високог афинитета према угљенику и азоту стварају током хлађења челика фино распоређене честице карбонитрида.

Челици сиромашни перлитом или без перлита испуњавају захтеве у погледу високе границе течења, побољшане жилавости, и добре заварљивости. Углавном се примењују као заварљиви конструкциони челици повишене јачине код транспорта гаса и нафте, за израду судова под притиском и при ниским температурама (нпр. течни пропилен и амонијак по правилу на температури од $-50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ до $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$) итд.

Табела 2.1. Поређење хемијског састава конструкционог челика S355J2G3 (Č0563) са челицима са мало перлита и без перлита

Челик	Хемијски састав, %				
	C	Si	Mn	Nb	V
S355J2G3	0,16 – 0,20	0,10 – 0,55	1,20 – 1,50	–	–
Са мало перлита	0,08 – 0,12	0,10 – 0,40	1,00 – 2,00	0 – 0,08	0 – 0,10
Без перлита	0,01 – 0,02	0,10 – 0,40	1,00 – 2,00	0 – 0,08	0 – 0,10

2.2. Легирани челици

Легирани челици осим угљеника (и примеса) садрже и друге легирајуће елементе, који се додају у циљу побољшања захтеваних својства. Легирани челици се деле према броју, садржају и врсти легирајућих елемената.

Према броју легирајућих елемената, челици се деле на једноструко и вишеструко легиране.

Према укупном садржају легирајућих елемената, челици се деле на:

- нисколегиране – до 5% легирајућих елемената и
- високолегиране – више од 5% легирајућих елемената.

Према врсти легирајућих елемената, разликује се више група челика, који се називају према легирајућим елементима: Cr – Ni челици, Cr челици, Ni челици, Mo челици, Cr – Mo – V челици, Mn челици, V челици, Si челици.

Код легираних челика велики утицај на особине имају легирајући елементи. Легирајући елементи се намерно додају у циљу побољшања одређених особина угљеничних челика или ради постизања специјалних особина које угљенични челици немају. Садржај при коме се неки елемент сматра легирајућим елементом дефинише се утицајем тог елемента на структуру и особине челика. За различите елементе је та граница веома различита. За сваки елемент одређена је горња граница до које се он сматра примесом, односно легирајућим елементом преко те границе, табела 2.2.

Табела 2.2. Минимални садржај легирајућих елемената у челицима

Елемент	Si	Mn	Cr	Ni	W	Mo	V	Co	Ti	Cu	Al
Минимални садржај [%]	0,60	0,80	0,30	0,30	0,10	0,08	0,10	0,10	0,05	0,40	0,10

Легирајући елементи у челику могу да:

- се растварају у α и γ – гвожђу, градећи чврсте растворе;
- стварају сопствене карбиде или се растварају у цементиту;
- стварају интерметална једињења или једињења са неметалима и
- буду у елементарном облику.

2.2.1. Легирајући елементи и њихов утицај на особине челика

Легирајући елементи у челику се разликују по томе да ли стабилизују стварање карбида, аустенита или ферита, односно са којим циљем су легирани. Сваки елемент даје

челику одређени низ карактеристика специфичних само њему. Постоје врсте челика где само карактеристична комбинација "супростављено" делујућих легирајућих елемената даје жељену микроструктуру. Легирање челика даје само основу за постизање жељених особина у току термичке обраде и пластичне прераде.

Угљеник (C)

- Шири γ – област у фазном бинарном метастабилном дијаграму Fe – Fe₃C.

Угљеник је компонента у челику. Са повећањем масеног удела угљеника расте затезна чврстоћа и тврдоћа челика, док се способност извлачења, ковност и машинска обрадивост смањују. Заварљивост се погоршава са садржајем угљеника преко 0,25% и захтевају се посебне мере при заваривању. Корозиона отпорност у односу на воду, киселине и вреле гасове скоро и да не зависи од садржаја угљеника.

Манган (Mn)

- Шири γ – област у фазном бинарном метастабилном дијаграму Fe – Fe₃C.

Манган у челику на првом месту служи као дезоксидационо средство. Веома снижава критичну брзину хлађења што повећава способност каљења челика. Затезна чврстоћа, тврдоћа и граница течења се повећавају, са повишењем садржаја мангана. Манган такође повољно утиче на ковност, а заваривање је отежано са садржајем изнад 1% Mn. Смањењем садржаја овог елемента испод 0,5% затезна чврстоћа се знатно смањује, али се ударна жилавост повећава.

Силицијум (Si)

- Сужава γ – област у фазном бинарном метастабилном дијаграму Fe – Fe₃C.

Силицијум је јако и врло често примењивано дезоксидационо средство при производњи челика. Као легирајући елемент силицијум повећава чврстоћу, границу еластичности и отпорност на хабање. Способност да повећа границу еластичности доводи до врло честе примене силицијума као легирајућег елемента у производњи челика за опруге. Челик са садржајем преко 2% Si има смањену способност деформисања, а са садржајем преко 1,2% Si заварљивост се погоршава.

Хром (Cr)

- Изражена тежња ка стварању карбида.
- Сужава γ , а шири α – област у фазном бинарном метастабилном дијаграму Fe – Fe₃C.

Затезна чврстоћа и граница течења се повећавају са садржајем до 5% хрома, а изнад тог садржаја те вредности се смањују. Способност деформисања се повећава до садржаја од 6%, даљим повећавањем до 12% Cr се смањују, а изнад тога утицај на издужење је незнатан. Садржај хрома изнад 1% смањује ударну жилавост. У границама садржаја од 3 до 12% Cr повећава се отпорност према оксидацији на повишеним температурама, преко садржаја од 12% Cr повећава се отпорност према електрохемијској корозији. Са повећањем садржаја хрома се повећава склоност према закаљењу и погоршава заварљивост.

Никл (Ni)

- Шири γ – област у фазном бинарном метастабилном дијаграму Fe – Fe₃C.

Повећава границу течења и смањује кртост код челика негарантованог састава. У циљу повећања жилавости никл се додаје као легирајући елемент у челик за цементацију и челик за побољшање. При садржају од 1,59% Ni смањује се кртост при ниским

температурама. Ударна жилавост при ниским температурама нарочито се побољшава додатком никла под условом да је садржај O, N, S, P, Mn и Si низак.

Молибден (Mo)

- Изражена тежња ка стварању карбида.
- Сужава γ – област у фазном бинарном метастабилном дијаграму Fe – Fe₃C.

Молибден се већином легира у комбинацији са другим легирајућим елементима. Молибден снажно снижава критичну брзину хлађења што повећава способност каљења челика. У комбинацији са хромом, никлом и манганом, молибден смањује склоност ка отпустној кртости, поспешује стварање финијег (ситнијег) зрна, позитивно делује на способност заваривања. Граница течења и затезна чврстоћа се повећавају са повишењем садржаја молибдена. При већем садржају молибдена долази до смањења способности машинске обраде. Због изражене тежње ка стварању карбида побољшава особине брзорезних алатних челика. Примењен код високолегираних челика легираних хромом или код хром-никл-аустенитних челика, молибден помаже даљем повећању корозионе постојаности. Са повећањем садржаја молибдена побољшавају се механичке особине на повишеним температурама, спречава отпустна кртост и побољшава корозиона отпорност. До садржаја од 2,25% молибден повећава ударну жилавост, а изнад 2,25% је смањује.

Алуминијум (Al)

- Сужава γ – област у фазном бинарном метастабилном дијаграму Fe – Fe₃C.

Алуминијум је најјаче и најчешће примењивано дезоксидационо средство осим у облику оксида Al₂O₃, када је штетна примеса. Већ у малим концентрацијама утиче на уситњавање зрна што касније значајно утиче на механичке особине. Већ од 0,06% Al утиче на повећање затезне чврстоће и на смањење пластичности и жилавости. Повећава склоност према појави прслина. Заједно са хромом и силицијумом повећава отпорност према оксидацији на повишеним температурама.

Ванадијум (V)

- Изражена тежња ка стварању карбида.

Додатком ванадијума постиже се фина ситнозрна микроструктура која за последицу има побољшање механичких особина, повећава затезну чврстоћу и смањује ударну жилавост. Додатак ванадијума позитивно делује на отпорност на хабање (због присуства тврдих карбида), добре механичке особине у раду на повишеним температурама, као и повољан утицај на процес отпуштања. Челици са ванадијумом захтевају посебну технологију заваривања јер су осетљиви према прслинама.

Волфрам (W)

- $T_f = 3410^\circ\text{C}$.
- Изражена тежња ка стварању карбида.

Волфрам делује врло позитивно на затезну чврстоћу, границу течења као и на жилавост челика. Због тога што утиче на повећање чврстоће челика на повишеним температурама, а уз то повећава и отпорност на хабање, волфрамом се легирају брзорезни алатни челици. Са повећањем садржаја изнад 0,2% смањује се ударна жилавост.

Титан (Ti)

- Изражена тежња ка стварању карбида.

Као снажно дезоксидационо средство има изузетну тежњу ка стварању карбида. Титан се користи као стабилизирајући елемент код корозионо отпорних челика (нерђајући челици). До 0,63% Ti ефикасно делује на повећање затезне чврстоће, али и смањење

ударне жилавости, уз побољшање механичких својстава на повишеним температурама и погоршање заварљивости.

Ниобијум (Nb)

- Изражена тежња ка стварању карбида.
- Сужава γ – област у фазном бинарном метастабилном дијаграму Fe – Fe₃C.

Због особине да повећава ватросталност као и отпорност на пузање врло често се користи као легирајући елемент за челике који раде у условима високог притиска и високе температуре. До садржаја од 1,19% Nb повећава затезну чврстоћу, али утиче на смањење ударне жилавости. Не дозвољава стварање карбида хрома и тиме повећава отпорност према корозији у агресивним срединама.

Бор (B)

Аустенитни нерђајући челици легирани бором у процесу таложног ојачавања постижу повећану границу течења и затезну чврстоћу, с тим што истовремено слаби њихова корозиона постојаност. Микроконституенти издвојени у процесу таложног ојачавања повећавају затезну чврстоћу високо ватросталних челика у подручју изузетно високих температура. Код челика негарантованог састава и код угљеничних челика бор као легирајући елемент побољшава прокалаљивост, а самим тим затезну чврстоћу. Бор као легирајући елемент генерално смањује способност заваривања челика.

Берилијум (Be)

- Шири γ – област у фазном бинарном метастабилном дијаграму Fe – Fe₃C.

Има снажно дезоксидационо својство и афинитет према сумпору. Никал-берилијум легуре су веома корозионо постојане и користе се за израду хируршких инструмената. Берилијум онемогућава таложно ојачавање што води паду затезне чврстоће.

Калцијум (Ca)

Заједно са силицијумом у форми силико – калцијума употребљава се у процесу производње при дезоксидацији челика. У принципу калцијум повећава ватросталност.

Церијум (Ce)

Због свог изузетно великог афинитета према кисеонику и сумпору служи као средство за постизање високе чистоће челика. Побољшава код високолегираних челика способност обраде на повишеним температурама док код ватросталних челика потпомаже ватросталност.

Кобалт (Co)

- Не ствара карбиде

Отежава раст зрна, побољшава отпорност у односу на кртост при процесу отпуштања као и затезну чврстоћу на повишеним температурама. Због тога се користи као легирајући елемент код брзорезних челика и алатних челика за рад на повишеним температурама.

Магнезијум (Mg)

Магнезијум се користи као средство за уклањање нежељеног сумпора из челика. Као легирајући елемент у добијању нодуларног лива поспешује стварање глобуларног (сферног) графита.

Олово (Pb)

Олово у принципу није легирајући елемент у челику, јер његов утицај на механичке особине скоро и да не постоји. Додаје се у количини између 0,2 и 0,5% у циљу побољшања машинске обраде.

Цирконијум (Zr)

- Изражена тежња ка стварању карбида.
- Сужава γ – област у фазном бинарном метастабилном дијаграму Fe – Fe₃C.

Цирконијум се понаша као снажно дезоксидационо средство и денитрификационо средство. Код челика за аутомате, који иначе имају пожељно увећан садржај сумпора, цирконијум делује позитивно на састав и облик исталожених честица сулфида што смањује опасност од појаве лома у црвеном.

Фосфор (P)

- Непожељан легирајући елемент изузетно снажног легирајућег утицаја.
- Сужава γ – област у фазном бинарном метастабилном дијаграму Fe – Fe₃C.

Постоји само једна група челика код које је дозвољен релативно висок садржај фосфора. То су челици за аутомате. Фосфор показује јаку тенденцију посебно ка примарној сегрегацији, чије се штетно присуство услед релативно ниског коефицијента дифузије фосфора, како у аустениту тако и у фериту, веома тешко уклања. Сегрегације делују као слаба места у структури материјала на којима по правилу креће пропација прслине, што за последицу има лом материјала. Пошто је скоро немогуће спречити сегрегацију фосфора, односно поспешити његову равномерну расподелу унутар чврстог раствора, остаје као једино решење максимално смањење садржаја (од 0,03%-0,05%). Фосфор већ у малим количинама повећава осетљивост на појаву кртости материјала приликом отпуштања. Тај утицај се повећава са повећањем садржаја угљеника. Такође расте температура каљења, величина зрна као и смањење способности пластичне деформације. Последица свега тога може да буде лом у хладном стању, као последица пораста кртости материјала. Погоршава заварљивост.

Сумпор (S)

- У принципу непожељан легирајући елемент веома снажног легирајућег дејства.

Са повећањем садржаја сумпора изнад 0,04% смањује се напон течења, затезна чврстоћа и жилавост. Растворљивост сумпора у гвожђу је толико мала да и најмањи садржај сумпора доводи до образовања сулфида FeS. Између FeS и Fe образује се еутектоид који се издваја на границама зрна и топи на 985°C. Сумпор је често узрок појаве кртог лома, познатог под називом црвени лом. Штетан утицај FeS се смањује ако се дода манган ($\text{FeS} + \text{Mn} \rightarrow \text{Fe} + \text{MnS}$). Настало хемијско једњење MnS топи се на ~ 1620°C, па се тиме отклања опасност од црвеног лома. Међутим, при хладној и топлој деформацији MnS се деформише, изазивајући тракавост, односно раслојавање ферита и перлита. Ипак, ова појава није тако штетна као црвени лом, јер тракавост може да се отклони накнадним жарењем, тј. нормализацијом. Сумпор у челицима за аутомате може да буде користан јер помаже стварање крте и ломљиве струготине, чиме се убрзава обрада резањем. Код ових челика дозвољен садржај сумпора је до 0,3%.

Кисеоник (O)

Кисеоник се у челику налази у виду разних оксида, који неповољно утичу на својства челика. Погоршава механичке особине челика као што су жилавост и способност старења. Као и сумпор кисеоник доводи до "лома у црвеном". Смањује отпорност према настајању прслина.

Азот (N)

- Шири γ – област у фазном бинарном метастабилном дијаграму Fe – Fe₃C.

У зависности од врсте и намене челика, азот се може посматрати и као штетан и као користан легирајући елемент. Штетне су појаве таложења које доводе до снижења

способности извлачења, а у процесу старења изазивају такозвани "лом у плавом", као и могућност појаве интеркристалне напонске корозије код нелегираних или нисколегираних челика. Као легирајући елемент стабилизује аустенитну структуру, повећава код аустенитних челика границу течења, а посебно затезну чврстоћу као и остале механичке особине на повишеним температурама. У процесу нитрирања азот се може нанети у танком површинском слоју, чиме се добија врло чврст и тврд површински слој, док унутрашњост остаје оригинално мека и жилава, чиме се постижу оптималне карактеристике на пример за делове који су изложени снажном динамичком оптерћењу. У присуству Al, Nb и V позитивно делује на уситњење зрна челика.

Водоник (H)

Водоник смањује пластичност и повећава склоност према кртом лому. У металу шава може да проузрокује појаву гасних мехурова, а у неким случајевима и прелине.

Бакар (Cu)

Бакар се врло ретко користи као легирајући елемент (само код неких посебних врста челика), иначе је у принципу врло непожељан у челику. Посебан проблем представља у челичанама које производе челик у електролучним пећима где се његов удео у легури може врло тешко контролисати. Штетно дејство бакра испољава се током пластичне пререде челика на повишеним температурама (ковања, ваљања, извлачења...), и последица је издвајања бакра по границама зрна. Издвајање бакра по границама зрна повећава површинску осетљивост материјала у току свих врста пластичне прераде на повишеним температурама. Граница течења и однос границе течења/затезна чврстоћа се побољшавају са порастом садржаја бакра у челику. Садржај преко 0,3% бакра доводи до повећања тврдоће, односно повећане способности каљења. Утицај на способност заваривања није уочен. Код нелегираних и нисколегираних челика, бакар повећава њихову отпорност на штетне атмосферске утицаје. Код високолегираних челика садржај бакра изнад 1% повећава њихову отпорност на дејство киселина (поготово хлороводоничне и сумпорне киселине).

Калај (Sn)

- Непожељан легирајући елемент веома снажног легирајућег дејства.

Арсен (As)

- Сужава γ – област у фазном бинарном метастабилном дијаграму Fe – Fe₃C.
- Склоност ка стварању сегрегација
- Изузетно штетна појава при ливењу челика.

Дифузионо жарење, иначе једини начин уклањања сегрегација у челику, је још теже у случају арсена него што је то случај код, на пример, фосфора. Поред тога повећава кртост материјала после процеса отпуштања, снижава драстично затезну чврстоћу и способност заваривања.

Антимон (Sb)

- Сужава γ – област у фазном бинарном метастабилном дијаграму Fe – Fe₃C.
- Склоност ка стварању сегрегација.
- Непожељан легирајући елемент.

Слично арсену повећава кртост односно смањује жилавост материјала.

2.3. Финозрни микролегирани челици

Повећање јачине челика, уз истовремену уштеду легирајућих елемената, остварује се применом поступка микролегирања. Микролегирање се користи првенствено код израде конструкционих челика које карактерише висока граница течења, задовољавајућа пластичност, незнатна склоност ка кртом лому и добра заварљивост.

Развој заварљивих конструкционих челика започиње крајем 20-их година прошлог века. У почетку производње таквих челика основни циљ био је повећање јачине, односно границе течења. Међутим, полазећи од све наглашенијих потреба за уштедом материјала и енергије у последње време све се већи значај усмерава према жилавости, заварљивости и способности обликовања.

За све актуелне заварљиве челике повишене јачине карактеристично је да су микролегирани ниобијумом, ванадијумом, титаном или неким другим микролегирајућим елементом. Разлика у односу на уобичајен састав конструкционих челика је у релативно ниском садржају угљеника и додатку микролегирајућег елемента.

Садржај микролегирајућег елемента у микролегираним челицима износи од 0,01 до 0,1%, а садржај угљеника је врло низак (0,02 – 0,22%). Микролегирајући елементи не мењају основну врсту челика тј. нелегирани челик остаје нелегиран, а нисколегирани челик остаје нисколегиран.

Деловање микролегирајућих елемената у челику је различито. Они могу стварати мешовите кристале (чврсте растворе) или једињења као што су нитриди, карбиди и карбонитриди. Додатак микролегирајућих елемената који стварају карбиде и нитриде (као нпр. ниобијум, ванадијум, титан) има значајну примену за повећање јачине при производњи челика. Најзначајније деловање изражено им је кроз уситњење зрна и преципитацију. На тај начин се надокнађује пад јачине изазван снижењем садржаја угљеника, односно удела перлита, те се омогућава даљи пораст јачине. Микролегирајући елементи који стварају стабилне карбиде, нитриде и карбонитриде при термомеханичкој обради челика имају значајан утицај на механизме ојачања и омекшања, стога такви челици већ у ваљаном стању имају висока механичка и технолошка својства.

Комбиновањем хемијског састава и термомеханичке обраде могућа је контрола структуре, морфологије и величине аустенитног зрна за време топлог ваљања, с циљем да се после $\gamma \rightarrow \alpha$ трансформације постигне оптимална феритна структура.

Иако су микролегирани челици пронашли широку примену и већи низ година се налазе у производњи и експлоатацији, њихова употребна својства се стално проучавају ради усавршавања технологије производње и прераде, као и проширења могућности примене.

Основна разлика између микролегирајућих и осталих легирајућих елемената у челику уочава се на основу њиховог садржаја у легури (горња граница концентрације микролегирајућих елемената изражава се у десетом делу процента). Микролегирајући елементи делују преко везивања пратећих елемената или преко излучивања других фаза у основној маси челика.

Интензитет деловања микролегирајућих елемената постаје јаснији ако се истакне чињеница да се жељени ефекти (добивање потребних својстава) могу постићи само са једним микролегирајућим атомом на 1000 атома гвожђа. Насупрот томе, код класичних легирајућих елемената тај однос износи од 1:100 до 1:5.

Микролегирајући елементи утичу на:

- повећање тврдоће ферита због настанка мешовитих кристала,
- повећање тврдоће ферита због излучених честица,
- смањење величине зрна ферита због успоравања (кашњења) и потхлађења $\gamma \rightarrow \alpha$ трансформације (због растопљених честица у аустениту),
- смањење величине зрна због настанка клица (у аустениту излучених једињења),
- смањење величине зрна због “кочења” рекристализације аустенита.

Претпоставља се да микролегирајући елементи доводе до очвршћавања стварањем честица (преципитата), које настају дифузијом микролегирајућих елемената (укључујући азот и угљеник) у подручје из којег је дифундовала одређена количина гвожђа.

Табела 2.3. Утицај микролегирајућих елемената на микроструктуру и својства конструкционих челика [6]

Микролегирајући елементи		Al	B	Nb	Te	Ti	V	Zr
	Кисеоник, O	++	+			++	+	++
	Сумпор, S				+	++		++
	Азот, N	+	+	+		++	+	++
	Угљеник, C			+		+	+	+
Микроскопски утицај	Крупне излучевине					+		+
	Ситне излучевине	+	+	+			+	+
	Блокирање дислокација и граница зрна	+		+		+		
	Утицај на облик сулфида				+	+		+
Макроскопски утицај	Повишене јачине на повишеним температурама	+				+		
	Утицај на способност топлог обликовања	–	–	–		+		
	Успоравање рекристализације			++		++	+	
	Утицај на брзину фазне трансформације	+	–	–,*, +		–,*, +	–	
	Уситњење зрна	+		++		+	+	
	Преципитационо ојачавање			++		++	+	
	Побољшавање способности за обликовања на хладно				+	+		+

+ позитиван утицај, – негативан утицај, * у зависности од претходне термичке обраде

У табели 2.3. приказан је утицај микролегирајућих елемената на макроструктуру и својства конструкционих челика.

Додатак азота је делотворан код челика који садрже алуминијум. Везивање азота у фино дисперговане нитриде, нарочито после нормализације, доводи до уситњења зрна, а тиме и до повећања границе течења и отпорности на крти лом.

Додатак ниобијума делује као додатно уситњење зрна, при чему се знатно поспешује деловање већ присутног AlN. Највеће уситњење зрна добија се додатком ниобијума уз истовремено повишен садржај азота.

При додатку ванадијума узрок повећања границе течења је излучивање врло ситних честица ванадијумовог карбонитрида за време хлађења кроз α -подручје, јер је ово излучивање лакше и брже од излучивања AlN.

Истовремено микролегирање с ниобијумом и титаном значајно повећава границу течења у нормализованом стању. Додатним отпуштањем овај ефекат изостаје због укрупњавања карбонитрида. Повећан садржај азота у овом случају остаје без утицаја.

Деловање ниобијума и ванадијума, уз повишен садржај азота, значајно повећава границу течења. Висока температура топљења карбида, нитрида и карбонитрида спречава пораст аустенитног зрна и тиме доводи до настанка микроструктуре са ситнијим зрном.

Бор се у челику јавља у облику борида Fe_2B , који је диспергован у основној маси челика и као слободан, који претежно сегрегирани по границама примарног, аустенитног зрна. Врло мала количина растворљивог бора распоређеног по границама зрна, значајно успорава дифузиону $\gamma \rightarrow \alpha$ трансформацију, тј. спречава феритну реакцију и тако побољшава прокаљивост. Утицај бора на повећање тврдоће има значај само испод површине.

Термичком обрадом, посебно у комбинацији с топлим обликовањем, може се „управљати“ процесима топљења и излучивања тако да се микроструктура и механичка својства челика битно мењају.



Слика 2.1. Схематски приказ развоја ситнозрних микролегираних челика

Алуминијум, такође стварањем нитрида, утиче на механичка својства челика, иако излучивањем алуминијум нитрида не долази до преципитационог ојачавања.

У зависности од постигнуте границе течења приликом добијања, разликују се три групе микролегираних челика:

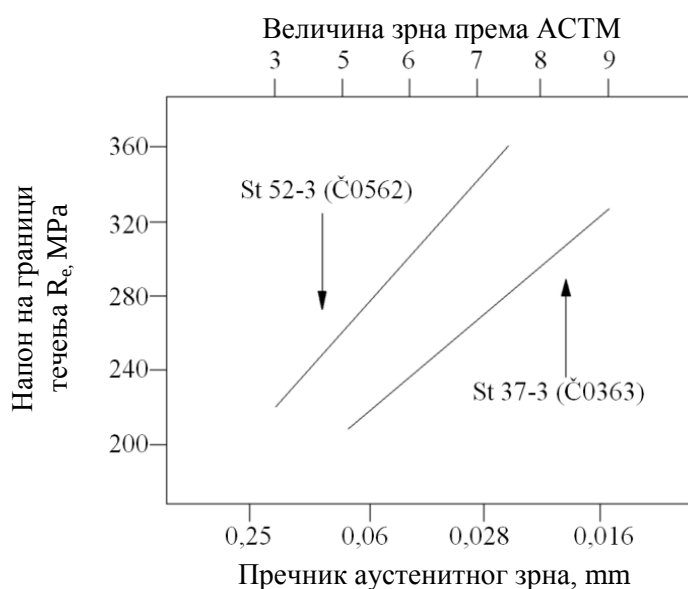
- челици повишене јачине с границом течења до 550 МПа, која се постиже после ваљања и нормализације,

- челици високе јачине с границом течења до 1500 МПа, која се постиже после побољшања,
- ултрајаки челици с границом течења изнад 1500 МПа, која се постиже термомеханичким контролисаним ваљањем.

2.3.1. Микролегирани нормализовани ситнозрни челици

Ситнозрни челици су развијени првенствено из челика за носеће конструкције као што су S355J0G3 (Č0562) и S355J2G3 (Č0563). Будући да су умирени алуминијумом и силицијумом имају ситнију феритно-перлитну микроструктуру, тиме и задовољавајућу заварљивост. Повишењем удела перлита (виши удео угљеника) може се постићи висока јачина, али тада опада заварљивост и жилавост. Даљим развојем ове групе челика додавани су манган, никл и хром као легирајући елементи у циљу повећања јачине механизмом ојачавања помоћу мешовитих кристала (ферита). Међутим, последица таквог начина повећања јачине су погоршана технолошка својства (расте склоност ка закаљивању при заваривању).

Позитивно деловање легирајућих елемената на уситњење перлитно – феритног зрна посебно је важно ради повећања границе течења (слика 2.2.).



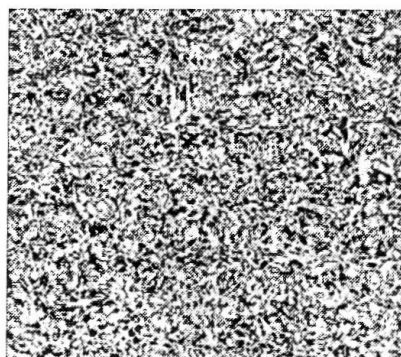
Слика 2.2. Зависност границе течења од величине аустенитног зрна

Дезоксидацијом растопа секундарним алуминијумом долази до настанка Al_2O_3 (који прелази у троску), али и AlN који већим делом остаје у челику равномерно диспергован у облику врло финих честица. Током хлађења растопа AlN настаје при $1200^\circ C$, а при загревању почиње да се распада изнад $1050^\circ C$ (потпуно се распада $> 1350^\circ C$ што одговара температури зоне утицаја топлоте за време заваривања). Загревањем таквих челика до $1200^\circ C$ и ваљањем до уобичајених температура ваљања зрно остаје ситно уколико хлађење није било преспоро (пожељно хлађење на ваздуху).

Честице нитрида алуминијума “опкољавају” зрно аустенита и спречавају његов раст (нпр. при заваривању, нормализацији). Сазнање о повољном утицају ситнијег зрна

добитоног повољним деловањем AlN довело је до даљег развоја ситнозрних челика (слика 2.1.).

Поред додатка алуминијума уситњавање зрна постиже се појединачним или комбинованим ($< 0,1\%$) деловањем микролегирајућих елемената (ниобијум, ванадијум, титан) с циљем да се споје с угљеником и азотом у карбиде, нитриде и/или карбонитриде, па тако појачају деловање нитрида алуминијума. Снижењем завршне температуре ваљања, уз присуство нитрида и карбида отежава се рекристализација аустенита који се испод температуре A_{r1} претвара у ситни перлит/ферит (слика 2.3.).



Слика 2.3. Феритно-перлитна микроструктура ситнозрнастог челика

Ситнозрни микролегирани челици нису осетљиви на крти лом. Добра заварљивост се постиже ниским масеним уделом угљеника ($< 0,2\%$) и еквивалентом угљеника испод $0,4\%$.

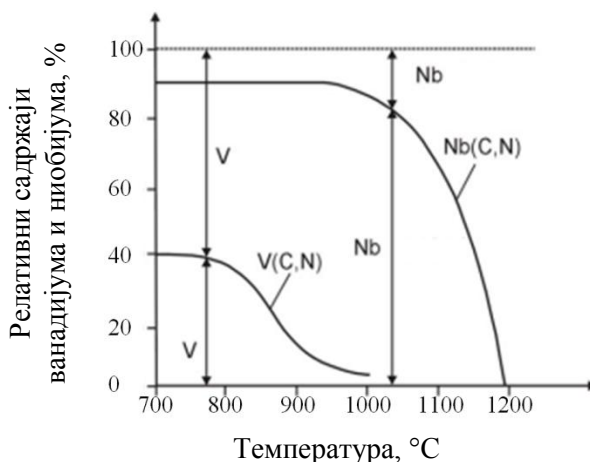
Микролегирајући елементи углавном делују стварањем карбида (NbC и VC), нитрида (NbN и VN) и карбонитрида [$V(C,N)$ и $(Nb,V)(C,N)$] који спречавају раст аустенитног зрна. Наведени преципитати су довољно густо дисперговани, ситни, термички отпорни и тврди да представљају ефикасне препреке кретању дислокација и утичу на уситњење зрна. Челици произведени на такав начин углавном добијају назив HSLA (енг. *High Strength Low Alloyed*) челици. Феритно-перлитно зрно биће ситније што је било ситније аустенитно зрно. Ситна аустенитна зрна имају већу укупну граничну површину него крупна па је број феритних клица већи.

Табела 2.4. Утицај микроструктуре и процеса излучивања на својства конструкционих челика

Својство	Деловање				
	Садржај перлита	Стварање мешаног кристала	Преципитационо ојачавање	Уситњење зрна	Утицај на укључке
Чврстоћа	+	+	+	+	0
Жилавост	–	–	–	+	+
Заварљивост	–	–	– / 0	0	0
Способност обликовања	–	– / 0	–	+/ 0	+

Осим повећањем садржаја перлита (повећањем садржаја угљеника) ојачавање челика може се постићи стварањем мешаног кристала, преципитационим ојачавањем и уситњењем зрна. Стварање мешаног кристала (нпр. преко силицијума) одражава се негативно на жилавост и заварљивост. Утицај преципитационог ојачавања је знатно повољнији, (табела 2.4.).

За време жарења мењају се удели ванадијума и ниобијума спојени у карбонитриде, (слика 2.4.). Што је температура жарења виша преципитиране честице су грубље, а степен инкохерентности у аустениту већи, па им је и утицај мањи.



Слика 2.4. Утицај температуре нормализације на интензитет растварања $V(C,N)$ и $Nb(C,N)$ у челику са 0,2% C

Уколико је топловаљаном челику завршна температура ваљања била изнад температуре Ar_3 после хлађења микроструктура таквог челика је грубозрна. Да би се постигло уситњење зрна и омогућило ојачавање потребно је да се спроведе нормализација (загревање до $\sim 900^\circ\text{C}$ и хлађење на ваздуху). Нормализацијом се топловаљани челик доводи у аустенитно подручје, и тада му се уклања непожељна секундарна структура (тракаста структура, усмереност). Загревањем и кратким задржавањем на $\sim 900^\circ\text{C}$ омогућава се спајање алуминијума и азота у нитрид (AlN), који се фино дисперзује у аустениту. Настале честице алуминијум-нитрида представљају клице кристализације перлитно-феритних зрна.

Табела 2.5. Деловање истопљеног и преципитираног ванадијума и ниобијума

$[M]_\gamma$ (растворено у аустениту)		M_x (излучено као нитрид и/или карбид)	
Деловање	- успоравање дифузије - снижавање температуре трансформације $\gamma \rightarrow \alpha$	- успостављање рекристализације	- спречавање укрупњавања зрна (блокирање границе зрна) - отежавање кретања дислокација
Структурне појаве	- уситњење зрна - ојачавање дислокацијама	- уситњење зрна - појава текстуре	- уситњење зрна - преципитационо ојачавање

Излучивање честица нитрида појачава се уколико челик садржи одређену количину ниобијума и/или ванадијума. Што је температура нормализације виша то је виши удео истопљеног ванадијума односно ниобијума, али и грубље зрно аустенита. Стога учинак преципитационог ојачавања у случају нормализације HSLA челика подлеже компромису: не прегрубо зрно при температури аустенитизације, али довољно истопљеног ниобијума и/или ванадијума који ће преципитацијом “чувати” ситније зрно и деловати као препрека за кретање дислокација. Приказ деловања истопљеног односно преципитираног ниобијума и ванадијума наведен је у табели 2.5.

Величина, распоред и утицај карбида, нитрида и карбонитрида микролегирајућих елемената зависи од тренутка и температуре њиховог настанка, (табела 2.6.).

Табела 2.6. Врсте карбида, нитрида и карбонитрида у микролегираним челицима

Врста и величина честица	Процес излучивања	Пример насталог једињења
Груби, угласти укључци; ~ $10^4 \mu\text{m}$	Излучивање пре или за време очвршћавања	TiN; ZrN
Грубе честице; ~ $10^2 \mu\text{m}$	Излучивања на границама зрна	NbC; TiC
Ситне честице; ~ $10^1 \mu\text{m}$	Излучивања индукована обликовањем	NbC
Ситне честице сврстане у низове; ~ $10^1 \mu\text{m}$	Излучивања на граници фаза γ/α	NbC; V(C, N)
Екстремно ситне, делимично кохерентне честице, кластери; < $10^1 \mu\text{m}$	Излучивања у α -фази	NbC; TiC; V(C, N)

2.3.2. Побољшани ситнозрни челици

Главна карактеристика ових челика је да су каљени у води с температуре обликовања на топло и додатно отпуштени при температури $680 \div 710^\circ\text{C}$. Захтеви у погледу могућности доброг заваривања ове групе челика условили су да сви челици из ове групе конструкционих челика садрже испод 0,20% угљеника. Нискоугљенични мартензит је најпогоднији за постизање задовољавајуће комбинације јачине и жилавости. У односу на феритно-перлитну и бејнитну микроструктуру мартензит је изразито неосетљив на крти лом.

Микролегирањем се повећава температура почетка настанка мартензита ($M_s \approx 400^\circ\text{C}$) тако да при хлађењу долази до побољшавања самоотпуштањем мартензита у површинским слојевима услед деловања топлоте језгра (јавља се побољшана жилавост челика).

Микролегирањем се може постићи:

- смањење утицаја дебљине челика тако да се оствари што виша прокаљивост ($> 90\%$ мартензита и/или бејнита у средини пресека),
- добијање нискоугљеничног мартензита или доњег бејнита за време хлађења на ваздуху,
- избегавање настанка ферита за време хлађења на ваздуху - могу настати прслине (повољно је деловање молибдена, бора и хрома),

- требало би водити рачуна о могућем снижавању M_s температуре и самоотпуштање мартензита,
- стварање ситнијег зрна.

Поред легирајућих елемената (Cr, Mn, Ni, Mo, Co) побољшани ситнозрни челици додатно се микролегирају ванадијумом, титаном, цирконијумом и бором. Побољшани ситнозрни челици се најчешће примењују при изради судова под притиском, мостова, делова грађевинских машина и дизалица, војне опреме, возила, вагона, кућишта и ротора водених турбина, цевовода, делова бродова итд.

3. ИСПИТИВАЊА ЗАВАРЕНОГ СПОЈА

3.1. Испитивања без разарања

Испитивања без разарања се користе за откривање површинских, потповршинских и дубинских грешака у завареном споју.

За откривање површинских и потповршинских грешака у завареном споју користе се:

- визуелна метода,
- метода течних пенетраната и
- магнетофлуksна (магнетна-ферофлуks) метода.

За откривање грешака по дубини завареног споја користе се:

- ултразвучна метода и
- радиографска метода (γ ; x зраци).

3.2. Испитивања са разарањем

Методe испитивања са разарањем подразумевају израду одговарајућих епрувета направљених из плоча за испитивање. За верификацију нове технологије заваривања потребно је да се изведу следећа испитивања:

- макроструктурно испитивање,
- микроструктурно испитивање,
- испитивање тврдоће,
- испитивање ударне жилавости и
- испитивање затезањем.

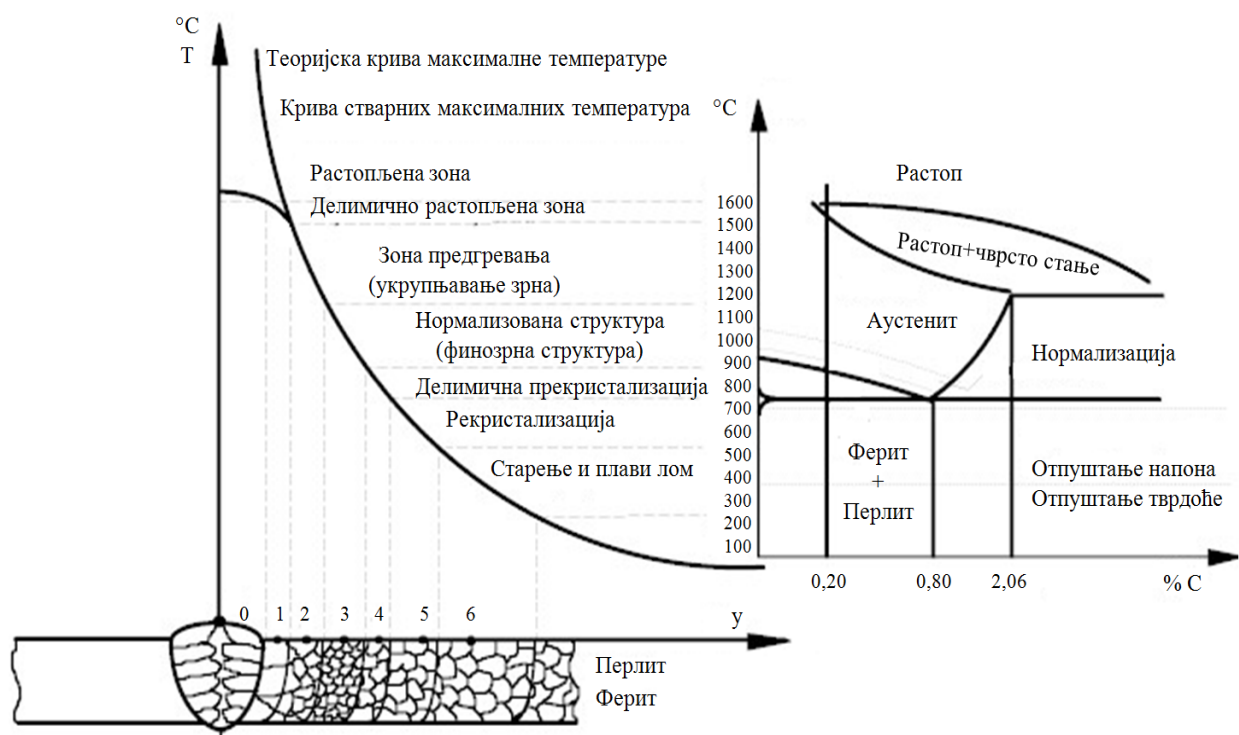
3.2.1. Испитивање макроструктуре

Макроструктурно испитивање завареног споја је стандардно испитивање (SRPS EN 1321) [13] које се обавља приликом квалификације технологије заваривања. Испитивање макроструктуре се изводи на истој епрувети на којој се изводи и испитивање микроструктуре и мерење тврдоће. Бочне стране епрувете се брусе брусним папиром и нагризају. Нагризање се изводи петопроцентним ниталом (HNO_3 – раствор азотне киселине у алкохолу) који помаже да се јасније уочи струтура завареног споја. При овом испитивању утврђује се да ли у завареном споју постоје грешке типа укључака и прслина.

3.2.2. Испитивање микроструктуре

Испитивање микроструктуре је стандардно (SRPS EN 1321) металграфско испитивање узорака припремљених из завареног споја. Ова метода се изводи после макроструктурног испитивања. За овај поступак неопходно је да се епрувете нагризу дванаестопроцентним раствором нитала или, у зависности од структуре, раствором пикрала (HCl - раствор хлороводоничне киселине у алкохолу). Припремљени узорци се посматрају под микроскопом увећани $200 \div 500$ пута. Зоне испитивања су: основни

материјал, зона утицаја топлоте (ЗУТ), линија стапања и метал шави. Анализирањем тих зона утврђује се њихова микроструктура, такође може да се одреди и величина зрна, присуство мартензита, бејнита, аустенита и осталих микроструктура, (слика 3.1.).



Слика 3.1. Структурне зоне за челик са 0,2% C

3.2.3. Мерење тврдоће

Под појмом тврдоће метала и легура подразумева се отпор који тај материјал пружа продирању неког тврђег тела у њега. Усвојена ознака за тврдоћу је H (Hardness). Постоје статичке и динамичке методе за испитивање тврдоће. Статичке методе су: Бринелова (HB), Викерсова (HV) и Роквелова (HR), а динамичке методе су: метода Полдијевог чекића (HP) или метода упоређивања, склероскопска метода (HSh) и дуроскопска метода (HD).

Код статичких метода, тврдоћа се изражава односом силе по јединици површине отиска или мерењем дубине отиска који направи утискивач у материјалу изражен у одговарајућим јединицама за тврдоћу.

Тврдоћа заварених спојева мери се методом Викерс, силом утискивања нпр. од 10 daN, (HV₁₀) уз тежњу да сила утискивања буде што мања. Тврдоћа заварених спојева се израчунава према изразу 3.1.

$$HV = 1,854 \cdot \frac{F}{d^2}, \quad 3.1.$$

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}, \quad (3.2.)$$

где су:

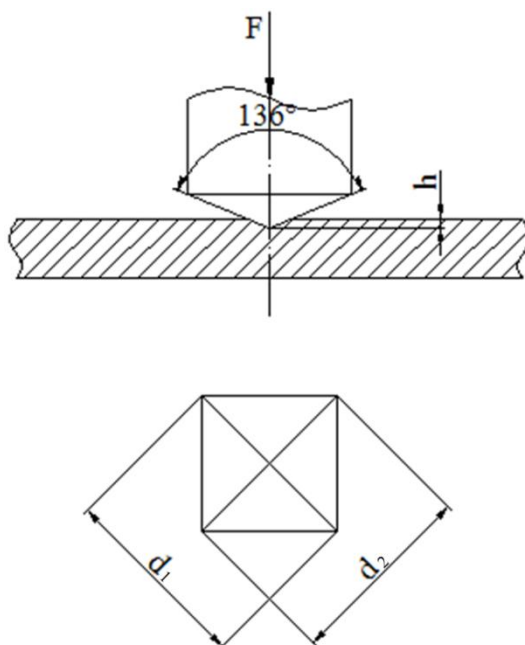
HV – тврдоћа по Викерсу,

F – сила и

d – средња дужина дијагонале отиска, (израз 3.2.).

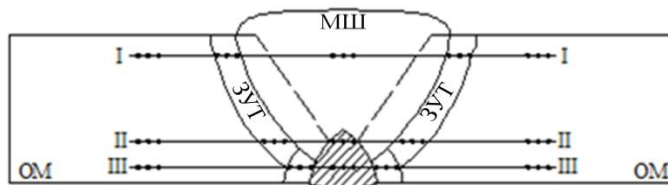
Мерење тврдоће према Викерсу спроводи се на унапред припремљеном узорку. Припрема узорка се најчешће изводи брушењем и полирањем. После испитивања макроструктуре исти узорак се користи за мерење тврдоће. На постављени узорак делује се силом преко утискивача у облику пирамиде, (слика 3.2.).

Викерсова тврдоћа рачуна се из односа силе притиска F (N) и површине отиска омотача пирамиде A (mm²) по линији (правцу), који се одређује мерењем дијагонала d₁ и d₂ (mm) према изразу 3.1.



Слика 3.2. Викерсова метода – утискивач и отисак

Тврдоћа се мери на више места по пресеку епрувете тако да се обухвати основни материјал леве плоче, зона утицаја топлоте, метал шав, зона утицаја топлоте и основни материјал десне плоче у правцу једне линије.



Слика 3.3. Правци мерења тврдоће за вишепролазни сучеои спој

У зависности од дебљине материјала мерење се изводи у различитом броју линија, (слика 3.3.). Тврдоћа је један од веома значајних фактора за оцену заварљивости према стандарду ISO 6507-1 [14].

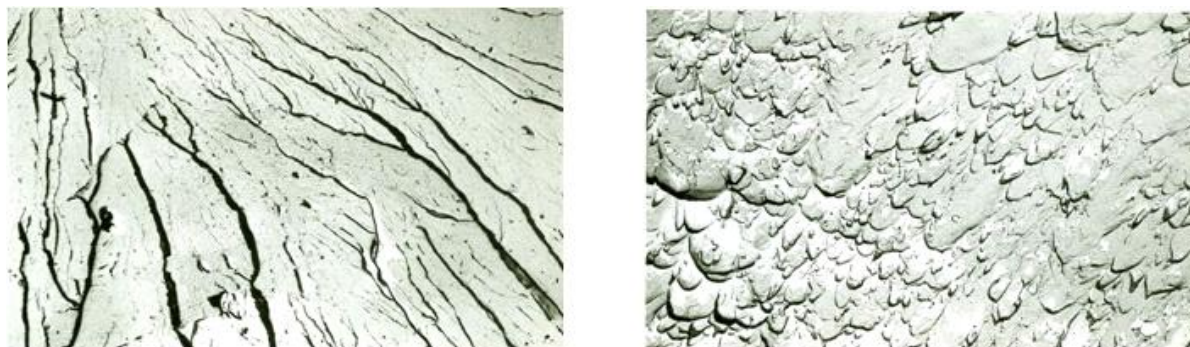
3.2.4. Одређивање ударне жилавости

Испитивање ударне жилавости, методом Шарпи, употребом епрувета са зарезом, је једно од најважнијих механичких метода испитивања материјала, а служи за утврђивање његове отпорности према кртом лому.

Енергија утрoшена за лом епрувете (изражена у џулима, J) је мера жилавости материјала, а захтева се и код развоја нових материјала, код провере готових материјала и код анализе лома услед разних дефеката у пракси. Зарез на епрувети може да буде у облику слова U, V, итд.

Епрувете са V-зарезом обавезно се користе за одређивање ударне жилавости општих конструкционих челика, а епрувете са U-зарезом код испитивања својстава квалитетнијих челика. Ударна жилавост металних материјала се испитује на стандардизованим епруветама квадратног или правоугаоног попречног пресека са зарезом у облику слова U (ознака KU) или слова V (ознака KV).

За утврђивање жилавости материјала испитују се по три исте епрувете на прописаној температури, при чему не сме бити веће расипање добијених вредности од 30% у односу на минималну прописану вредност (само једна од њих може имати нижу вредност). У стандардима за пријем и испоруку металних материјала прописане су минималне средње вредности ударне жилавости. На слици 3.4. је приказан крти и жилав лом.



Слика 3.4. Крти и жилав лом увећани под електронским микроскопом 10000×

На жилавост материјала утиче низ фактора као што су:

- температура испитивања,
- микроструктура (нарочито величина зрна),
- облик и димензије зареза,
- димензије епрувете и
- брзина удара.

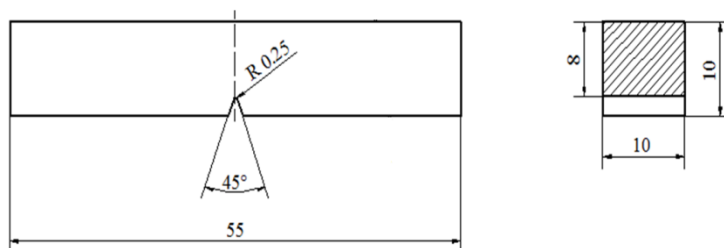
Температура испитивања има највећи утицај на жилавост. Жилавост материјала опада са снижавањем температуре испитивања, јер са снижавањем температуре снижава се и пластичност, односно деформабилност материјала.

Микроструктура има велики утицај на жилавост материјала. Нарочито повољно на жилавост утиче смањивање величине зрна.

Облик и димензије зареза знатно утичу на жилавост. Зареzi изазивају концентрацију тродимензионалних напрезања, нормална напрезања при томе, делују на затезање, док тангенцијална изазивају клизање.

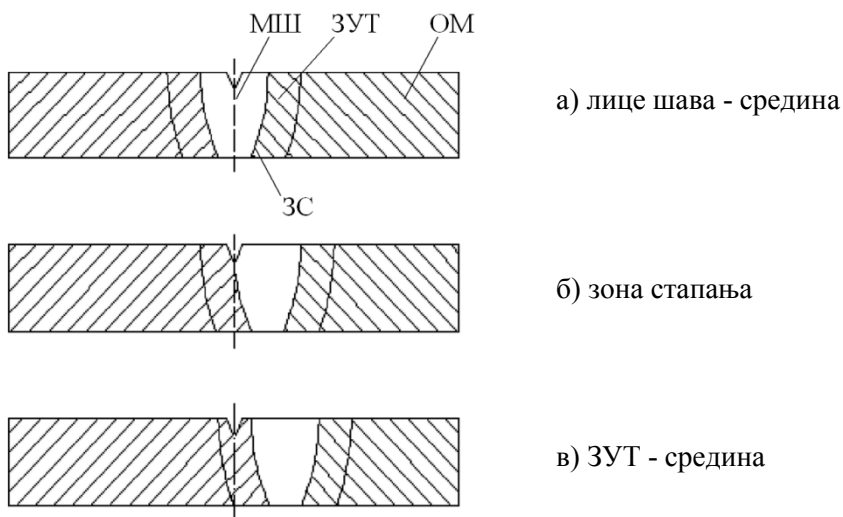
Димензије епрувете различито утичу на жилавост материјала. Најмање утиче дужина епрувете, док ширина и дебљина утичу слично на смањивање жилавости. На слици 3.5. приказана је стандардна епрувета са V-зарезом.

Брзина удара Шарпијевог клатна нема значајнијег утицаја на жилавост материјала ако је у распону 3 до 7 m/s, док знатно веће брзине $20 \div 50$ m/s смањују жилавост због смањеног удела пластичне деформације.



Слика 3.5. Епрувета за испитивање жилавости са V-зарезом

Енергија удара је важно механичко својство материјала, које најбоље дефинише његову отпорност према нестабилном расту прслине у њему под прецизно одређеним условима. Другим речима, енергија удара је критична вредност концентрације напона на врху прслине при којој наступа њен нестабилни раст у условима равanske деформације.



Слика 3.6. Распоред зареза на епруветама

- а) зарез у МШ,
- б) зарез у ЗС и
- в) зарез у ЗУТ-у

Рад утрошен за прелом епрувете добија се као разлика између расположивог рада и неутрошеног рада, док се ударна жилавост израчунава као енергија удара по јединици површине испод V зареза стандардне епрувете, а изражава се у J/cm^2 .

Енергија удара се састоји од енергије иницијације (енергија потребна да се појави прелина) и енергије ширења прелине.

Испитују се сучеони спојеви (слика 3.6.), при чему се одређује жилавост у металу шава (а), на линији стапања (б) и у зони утицаја топлоте (в).

Експериментална испитивања енергије лома и ударне жилавости приказана у овом раду изведена су на Војнотехничком институту (ВТИ) у Београду, на епруветама израђеним према стандарду SRPS EN 875 [9].

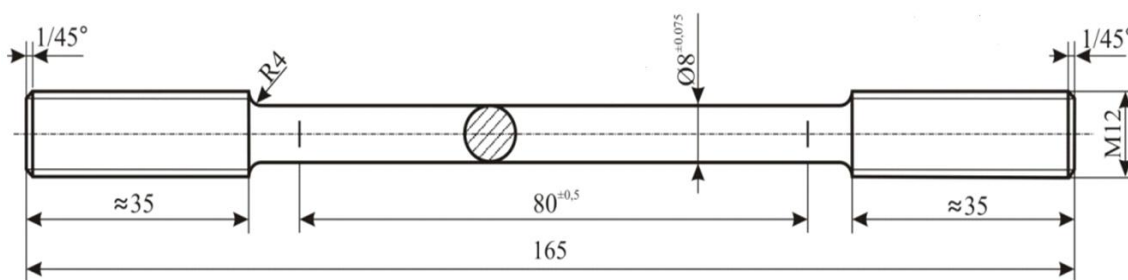
3.2.5. Испитивање затезањем

Испитивање затезањем је најзначајнији начин испитивања материјала у циљу одређивања његових механичких својстава: напона течења $R_{p0,2}$ и затезне јачине R_m . Истовремено, са испитивањем својстава јачине могу се добити и подаци о способности деформације материјала: издужење (A) и сужење (Z).

Испитивање затезањем се заснива на спором затезању узорка стандардног облика и димензија. Универзална машина за испитивање (кидалица) је опремљена динамометром за мерење силе и писачем који у сваком моменту записује зависност издужења од силе. Помоћу података добијених при испитивању и измерених на прекинутом узорку одређују се:

- затезна јачина, R_m , МПа,
- напон течења, $R_{p0,2}$, МПа (горња граница течења, R_{eH}),
- издужење $A_{5,65}$, $A_{11,3}$, % (индекси се односе на мерну дужину),
- сужење Z, % (контракција) и
- модул еластичности E, МПа.

Епрувете за испитивање затезањем основног материјала (слика 3.7.) и завареног споја се по облику и геометрији не разликују. Једина разлика је у томе што код епрувете за испитивање завареног споја у средини постоји заварен спој.



Слика 3.7. Изглед епрувете за испитивање затезањем [11]

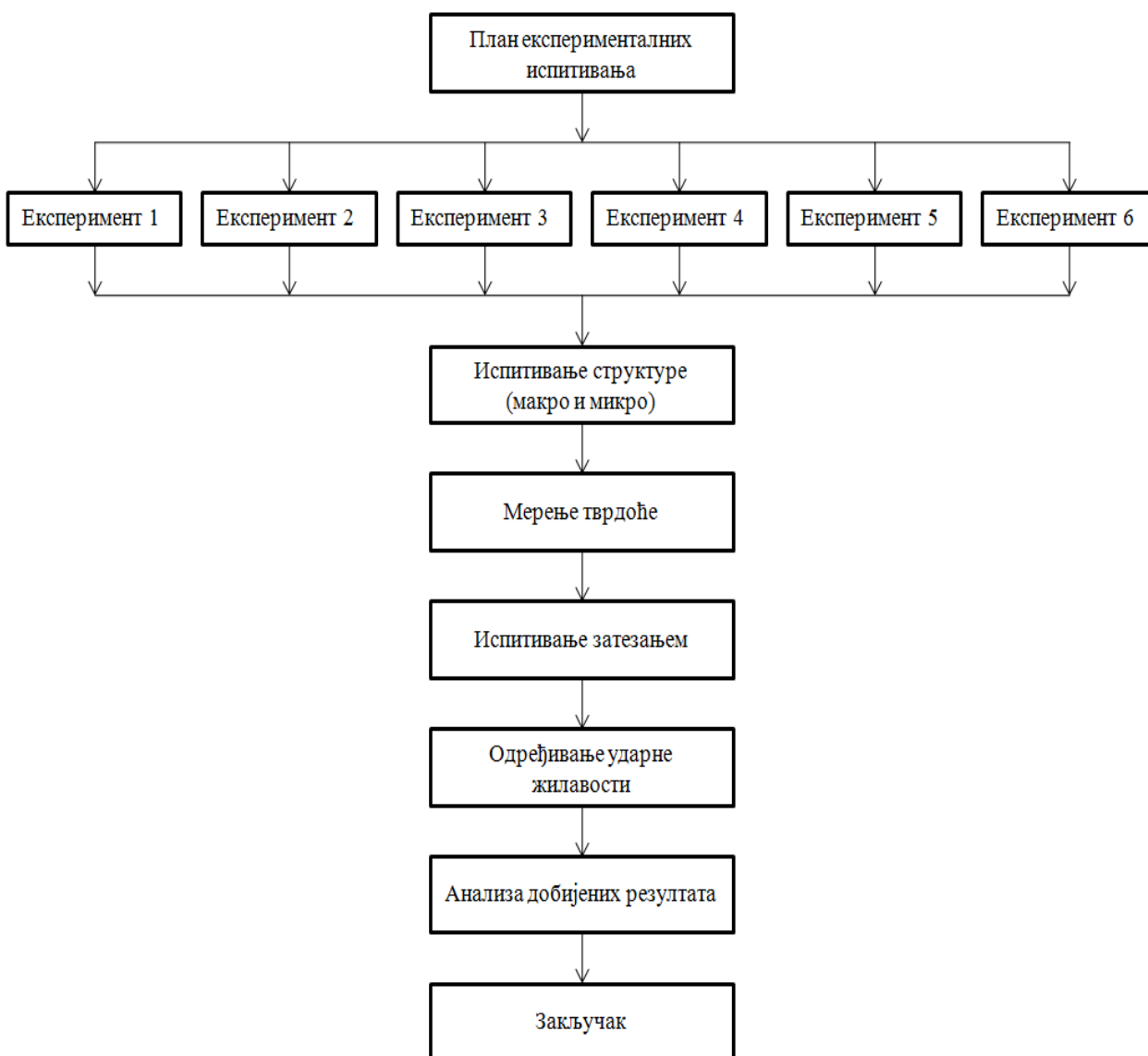
Затезање је изведено у акредитованој лабораторији на кидалици, мерног опсега $1 \div 100$ kN. Брзина деформисања износила је 10 mm/min.

Сва експериментална испитивања затезањем, рађена су на ВТИ-у у Београду, на стандардно израђеним епруветама (SRPS EN 895) [10].

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСПИТИВАЊА

Европски комитет за стандардизацију гвожђа и челика задужен за стварање европских стандарда, челик S690 QL сврстао је у шесту групу стандарда EN 10025 (издање из 2004. год.). Овој групи припадају челици повишене јачине каљени и отпуштени (побољшани) са границом течења од 460 – 960 МПа.

Квалитет завареног споја зависи од особина основног материјала (ОМ) и додатног материјала (ДМ), геометрије жлеба, вештине заваривача и стања заваривачке опреме.



Слика 4.1. План извођења експерименталних испитивања

Проблем који се односи на заварљивост челика S690 QL, код делова веће дебљине, односи се на хладне (водоничне) прслине. Углавном се тај проблем може решити употребом аустенитних електрода, контролисаним уносом топлоте, предгревањем и у посебним случајевима накнадном термичком обрадом. При томе се подразумева да се употребљавају нисководонични додатни материјали.

У циљу проналажења најповољније технологије заваривања челика S690 QL урађено је шест експерименталних испитивања према схеми са слике 4.1 који подразумевају пет различитих технологија.

Први експеримент се односио на испитивање механичких карактеристика основног материјала, остали експерименти су се односили на различите технологије и поступке заваривања овог основног материјала.

Технологије су обухватале три поступка заваривања код којих се подразумевало да коренски пролази буду изведени аустенитним додатним материјалом због услова да производ буде отпоран на ударна оптерећења.

Прво су рађени експерименти са РЕЛ поступком у коренском пролазу, као најчешће примењиван у оваквим случајевима.

Технологије са МАГ поступком у коренском пролазу одабране су због веће продуктивности, а МИГ поступком је рађена последња технологија.

Прве две технологије заваривања подразумевале су исте поступке, али су се разликовале у параметрима заваривања. Претпоставка је била да исти поступци неће дати исте резултате ако се параметри заваривања измене. Требало је проверити колико ће се резултати испитивања променити ако се заваривање изводи са мањим или већим бројем пролаза. Тако су други и трећи експеримент замишљени као технологија са РЕЛ/МАГ поступцима са седам пролаза и технологија са РЕЛ/МАГ поступцима са осамнаест пролаза.

Четврти и пети експеримент су се односили на технологије заваривања МАГ/МАГ поступцима са седам и дванаест пролаза. Истовремено је промењена и заштитна атмосфера тако да је у првом случају за коренске пролазе коришћен чист угљен-диоксид, а у другом случају коренски пролази су нанети у мешавини 82 % Ar + 18 % CO₂.

Било је потребно установити како поред броја пролаза и састав заштитног гаса утиче на квалитет завареног споја.

Последњи, шести експеримент који је подразумевао технологију са МИГ/МАГ поступцима рађен је да би се сагледала оправданост коришћења скупљег поступка заваривања у односу на квалитет који та технологија може да обезбеди.

4.1. Прво експериментално испитивање – основни материјал

Основни материјал је челик повишене јачине S690 QL, EN 10025-6, трговачког назива WELDOX 700 произведен у Шведској у железари SSAB Oxelösund. Карактеристике челика S690 QL приказане су у табелама 4.1. до 4.4.

Табела 4.1. Хемијски састав S690 QL (max. %)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Ni	Mo	B
0,20	0,80	1,70	0,020	0,010	1,50	0,50	2,0	0,70	0,005

Табела 4.2. Механичке карактеристике челика S690 QL

Дебљина mm	Напон течења R_{eH} MPa	Затезна чврстоћа R_m MPa	Издужење $A_{5,65}$, %
3 – 50	690	770 – 940	14
50 – 100	650	760 – 930	14
100 – 150	630	710 – 900	14

Табела 4.3. Ударна жилавост челика S690 QL у попречном правцу

Температура испитивања	-40 °C	-20 °C	0 °C
Минимална енергија удара	27 J	30 J	35 J

Табела 4.4. Еквивалент угљеника CEV (max) челика S690 QL

Дебљина, mm	3 – 50	50 – 100	100 – 150
CEV	0,65	0,77	0,83

$$CEV = C + \frac{M_n}{6} + \frac{C_r + M_o + V}{5} + \frac{C_u + N_i}{15}, \quad 4.1.$$

Хемијски еквивалент угљеника (CE) је рачунат по формули међународног института за заваривање (израз 4.1.), при чему се он обележава и као CEV [11].

Према стандарду EN ISO 15608, челик S690 QL спада у групу материјала 3, а подгрупу 3.2. Дозвољена вредност тврдоће за групу материјала 3 према стандарду EN 15614-1 је 450 HV (без предгревања), а 380 HV (са предгревањем) [12, 13].

4.1.1. Испитивање макроструктуре

Макроструктурно испитивање основног материјала није рађено.

4.1.2. Испитивање микроструктуре

Експерименталним испитивањем микроструктуре потврђена је сорбитна структура основног материјала (слика 4.2.).



Слика 4.2. Микроструктура ОМ (200×)

4.1.3. Мерење тврдоће

Све технологије су имале по два узорка за мерење тврдоће са изузетком друге и четврте са по једним узорком. Број тачака на којима је мерена тврдоћа кретао се од три до седам.

Табела 4.5. Вредности тврдоће ОМ измерене методом Викерс (HV_{10})

Број експ.	Тврдоћа ОМ испитивана у технологији:	Линија I-I		Линија II-II		Линија III-III	
		Прва тачка	Последња тачка	Прва тачка	Последња тачка	Прва тачка	Последња тачка
1.	РЕЛ/МАГ узорак 1	260	279	279	276	276	276
	РЕЛ/МАГ узорак 2	181	279	279	270	279	279
2.	РЕЛ/МАГ	258	258	245	258	268	222
3.	МАГ/МАГ узорак 1	287	279	279	279	279	279
	МАГ/МАГ узорак 2	276	279	281	279	279	281
4.	МАГ/МАГ	260	266	245	268	264	264
5.	МИГ/МАГ узорак 1	242	254	-	-	259	259
	МИГ/МАГ узорак 2	262	259	-	-	254	269

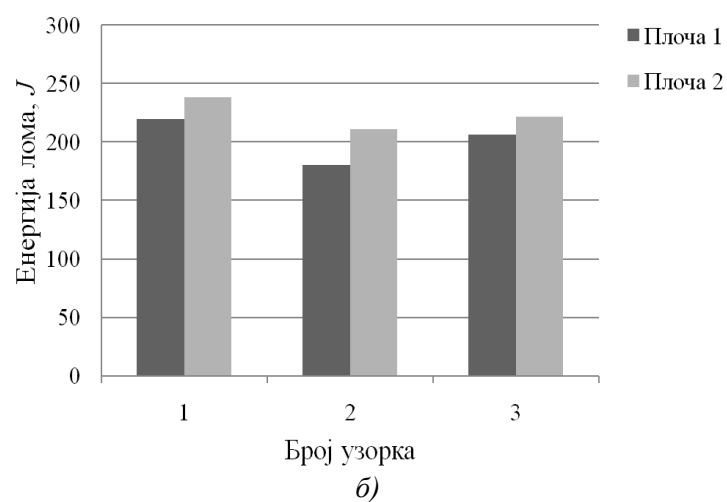
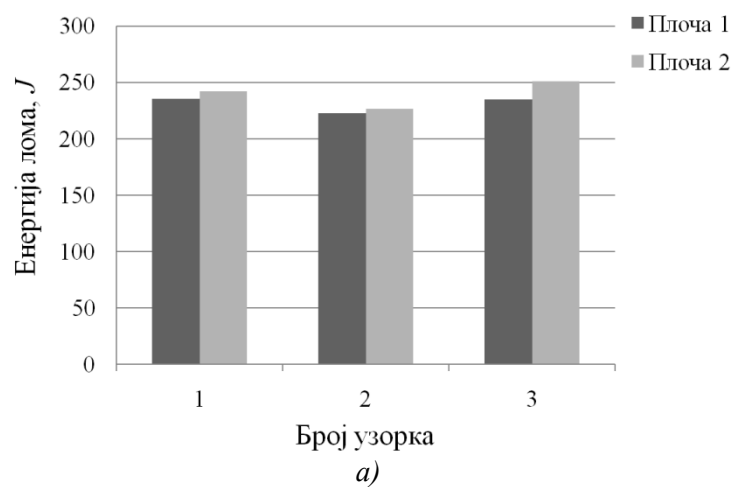
Због боље прегледности у табели 4.5. дате су вредности тврдоће основног материјала само прве леве и прве десне тачке на све три линије испитивања, а због лакшег поређења, код свих урађених експеримената.

4.1.4. Одређивање ударне жилавости

Испитивање ударне жилавости основног материјала рађено је само код првог и четвртог експеримента са по три узорка чији су резултати приказани у табелама 4.6. и 4.7. и на сликама 4.3. и 4.4.

Табела 4.6. Енергија лома и ударна жилавост основног материјала на собној и сниженој температури прве заварене плоче

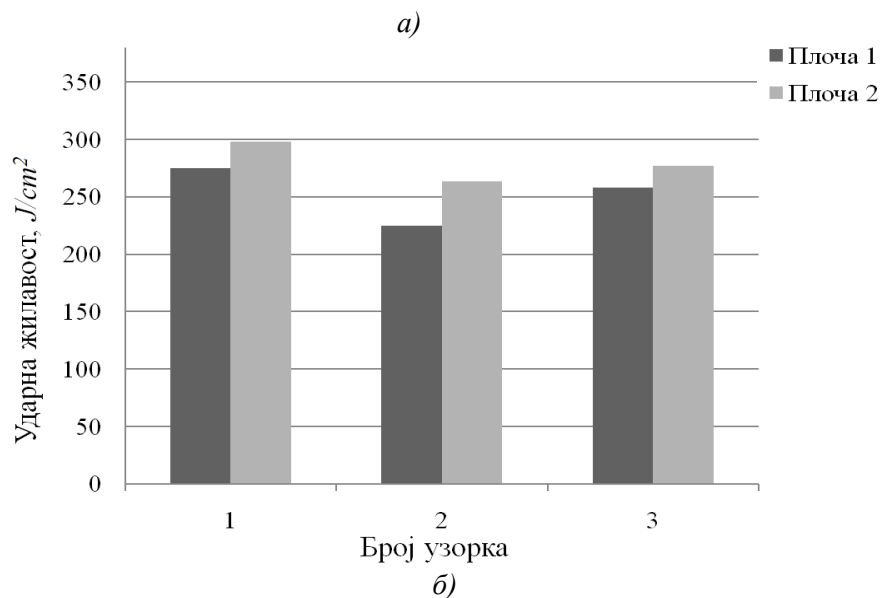
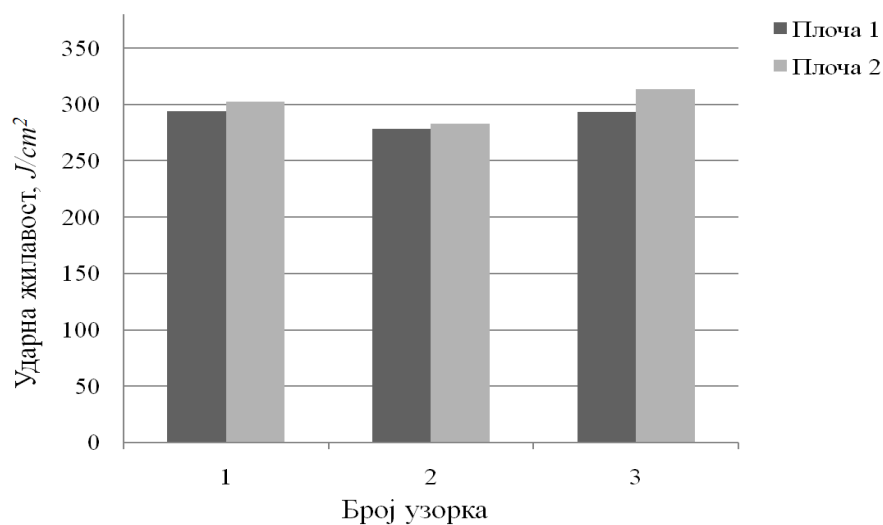
Челик	Температура °C	Број узорка	Енергија иницијације J	Енергија ширења J	Енергија лома J	Ударна жилавост J/cm ²	Жилав лом %
S690 QL	+20	1.	51,87	183,30	235,17	293,96	91,04
		2.	53,45	168,99	222,44	278,05	93,54
		3.	43,79	190,88	234,68	293,34	96,02
	-40	1.	54,65	164,94	219,59	274,49	89,05
		2.	50,22	129,56	179,78	224,72	78,50
		3.	41,04	165,04	206,08	257,60	80,58



Слика 4.3. Упоредни приказ вредности енергије лома – ОМ: а) $T = 20^{\circ}\text{C}$ и б) $T = -40^{\circ}\text{C}$

Табела 4.7. Енергија лома и ударна жилавост основног материјала на собној и сниженој температури друге заварене плоче

Челик	Температура °C	Број узорка	Енергија иницијације J	Енергија ширења J	Енергија лома J	Ударна жилавост J/cm ²	Жилав лом %
S690 QL	+20	1.	55,59	168,43	242,02	302,52	91,79
		2.	53,61	172,58	226,19	282,74	92,83
		3.	52,34	198,55	250,89	313,61	94,81
	-40	1.	42,30	195,80	238,10	297,62	92,96
		2.	48,97	161,87	210,84	263,55	95,31
		3.	54,80	166,59	221,39	276,74	95,70



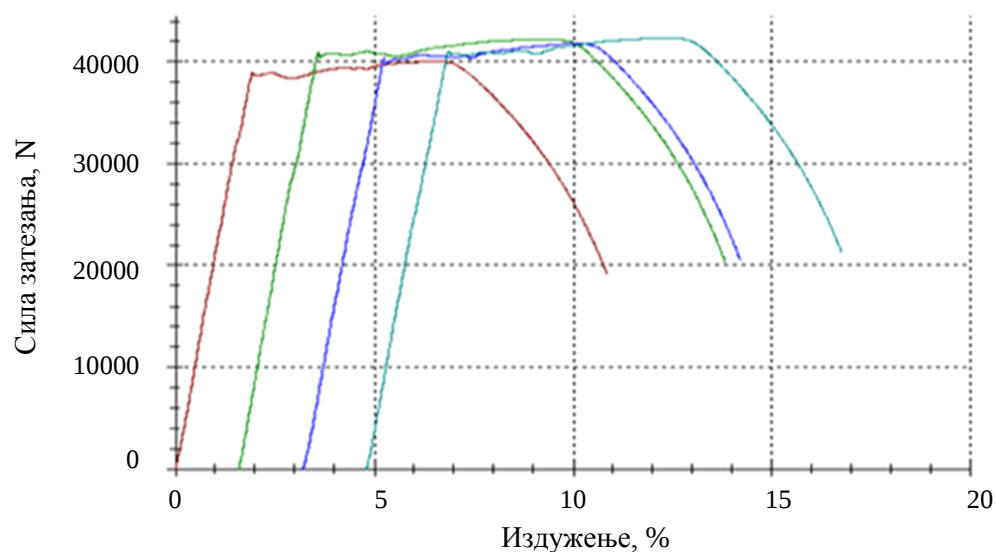
Слика 4.4. Упоредни приказ вредности ударне жилавости – ОМ: а) $T = 20^{\circ}\text{C}$ и б) $T = -40^{\circ}\text{C}$

4.1.5. Испитивање затезањем

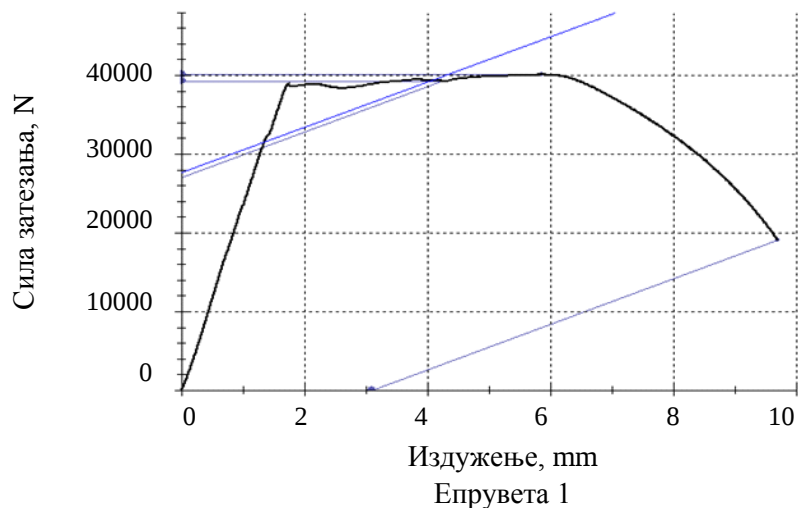
Испитивање затезањем изведено је на епруветама које су израђене из плоча које су заварене у првом и четвртном експерименту са по два узорка. Резултати испитивања приказани су у табели 4.8. и на сликама 4.5. и 4.6.

Табела 4.8. Експериментални резултати испитивања затезањем – ОМ

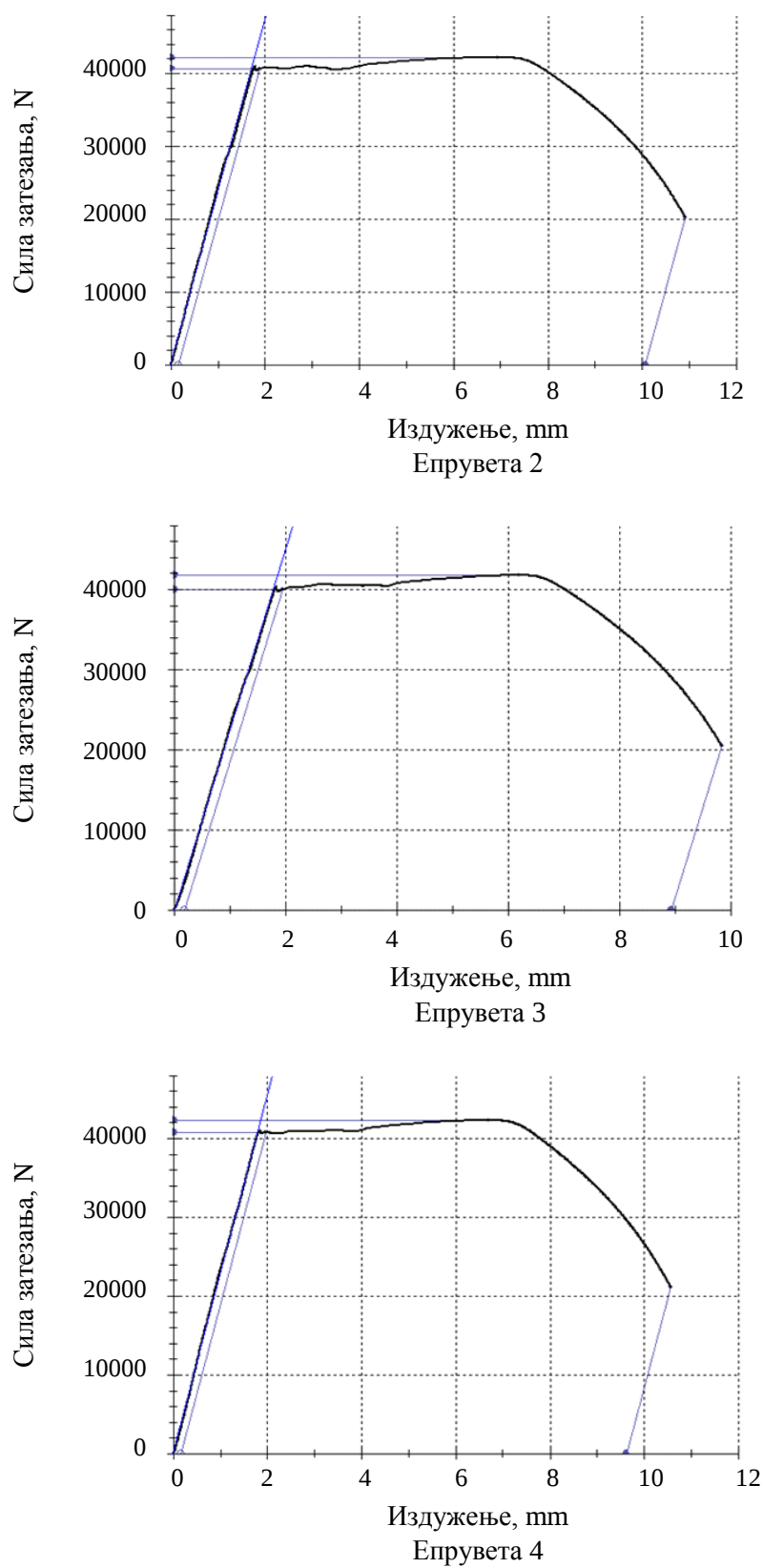
Број епрувете	l_0 , mm	S_0 , mm ²	$R_{p0,2}$, МПа	R_m , МПа	$A_{11,3}$, %
1.	89,28	50,27	781,94	797,81	14,19
2.	89,28	50,27	809,40	839,92	11,3
3.	89,42	50,01	800,41	835,52	9,98
4.	88,29	50,27	811,95	842,45	10,92



Слика 4.5. Збирни дијаграм затезања за четири епрувете – ОМ



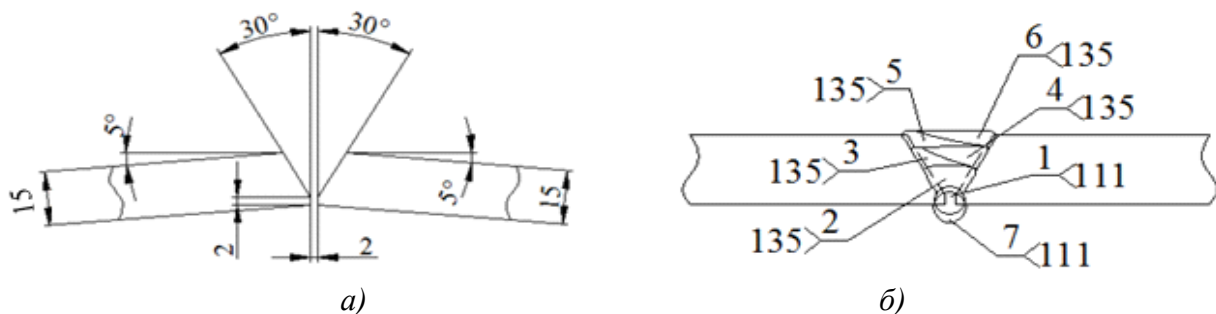
Слика 4.6. Дијаграми затезања за четири епрувете – ОМ / l



Слика 4.6. Дијаграми затезања за четири епрувете – ОМ / 2

4.2. Друго експериментално испитивање – технологија РЕЛ/МАГ са седам пролаза

Плоча је заварена коришћењем комбинације РЕЛ/МАГ поступака са електродом INOX В 18/8/6 пречника 3,25 mm (коренски пролаз) и пуном жицом МИГ 75 пречника 1,2 mm (пролази попуне) у заштити мешавине гасова Ar + 18% CO₂.



Слика 4.7. Припрема плоча за заваривање а) и распоред уношења пролаза б)

Табела 4.9. Параметри заваривања

Завар број	Поступак	Додатни материјал / пречник - / mm	Струја А	Напон V	Брзина заваривања cm/min	Погонска енергија kJ/cm
1.	111	INOX 18/8/6 / 3,25	110	22	18,5	6,28
2.	135	MIG 75 / 1,2	145	28	30,77	5,94
3.	135	MIG 75 / 1,2	145	28	28,57	6,39
4.	135	MIG 75 / 1,2	145	28	28,57	6,39
5.	135	MIG 75 / 1,2	165	24	24,75	7,20
6.	135	MIG 75 / 1,2	165	24	24,75	7,20
7.	111	INOX 18/8/6 / 3,25	110	22	18,5	6,28

За време заваривања изведено је предгревање гасним грејачем на температуру $T_p = 200^{\circ}\text{C}$, а температура међупролаза (interpass) одржавана је у интервалу од $200 \div 225^{\circ}\text{C}$. Контрола ових температура вршена је бесконтактним термометром.

Припрема жлеба заварене плоче извршена је машинским путем на глодалици. Пре почетка заваривања плоче су постављене под углом (слика 4.7.а) у циљу смањења деформација које настају при заваривању услед унете количине топлоте. Параметри заваривања (табела 4.9.) који су коришћени одабрани су тако да је унета количина енергије у препорученим границама.

За заваривање припојних и коренских пролаза коришћена је аустенитна, базична електрода, према стандардима:

EN 1600 E 18 8 Mn B 22; DIN 86 56 E 18 8 Mn B 20 +; AWS A5.4 $\approx$ E 307–15;

Трговачки назив електроде је INOX В 18/8/6, произвођача Електроде "Јесенице", Словенија. Коришћени пречник електроде је 3,25 mm [14].

Хемијски састав и механичке карактеристике чистог метала шава дате су у табелама 4.10. и 4.11.

Табела 4.10. Хемијски састав чистог метала шава у %

C	Si	Mn	Cr	Ni
0,12	0,8	7	19	9

Табела 4.11. Механичке карактеристике чистог метала шава

R _{p0,2} , МПа	R _m , МПа	A ₅ , %	KV (+20°C), J
> 350	590 – 690	> 40	> 80

Према препорукама произвођача, пре употребе, електроде су сушене у пећи на температури од 300°C у трајању од два часа, а затим пребациване у загрејане тоболце (T = 100°C) од стране заваривача.

За заваривање пролаза попуне коришћена је пуна жица легирана са Mn, Ni и Mo, пречника 1,2 mm, намењена за заваривање финозрних челика повишене јачине са напоном течења не мањим од 690 МПа према стандардима: EN 12534 Mn3Ni1CrMo; AWS A5.28 ER100C-1; EN ISO 16834-A G69 4 Mn 3 NiCrMo.

Трговачки назив ове пуне жице је МИГ 75, произвођач "Јесенице", Словенија.

При заваривању коришћена је мешавина инертног и активног гаса Ar + 18% CO₂ (M21 према EN 14175).

Хемијски састав и механичке карактеристике чистог метала шава дате су у табелама 4.12. и 4.13.

Табела 4.12. Хемијски састав чистог метала шава у % [14]

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
0,08	0,60	1,70	0,25	1,50	0,30

Табела 4.13. Механичке карактеристике чистог метала шава

R _{p0,2} , МПа	R _m , МПа	A ₅ %	KV (-40°C) J
> 690	770 – 940	> 17	> 47

Ова комбинација "меке" нерђајуће, аустенитне електроде (коренски пролаз) и "јаке" пуне жице (завари попуне) одабрана је, јер се аустенитни додатни материјал успешно одупире евентуалним топлим прслинама и добро подноси ударна оптерећења којима су изложени склопови у току експлоатације, а остатак шава по јачини одговара основном материјалу.

4.2.1. Испитивање макроструктуре

На узорцима нису откривене грешке типа заједа, непровара и прслина. Узорци задовољавају класу квалитета „В“ према стандарду EN ISO 5817.

4.2.2. Испитивање микроструктуре

Испитивање микроструктуре код ове технологије рађено је светлосним микроскопом са увећањем 200× у свим карактеристичним зонама на два узорка (слике 4.8. и 4.9.).



ОМ - мартензитно-бејнитна структура



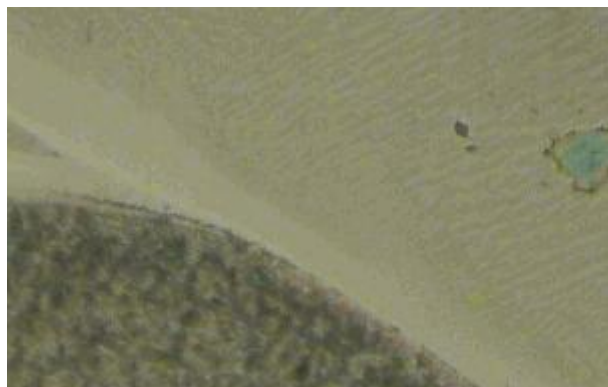
ЗУТ - међуфазна структура



Прелаз О. М. и материјал лица шави



МШ - феритно-мартензитна структура са излученим карбидима

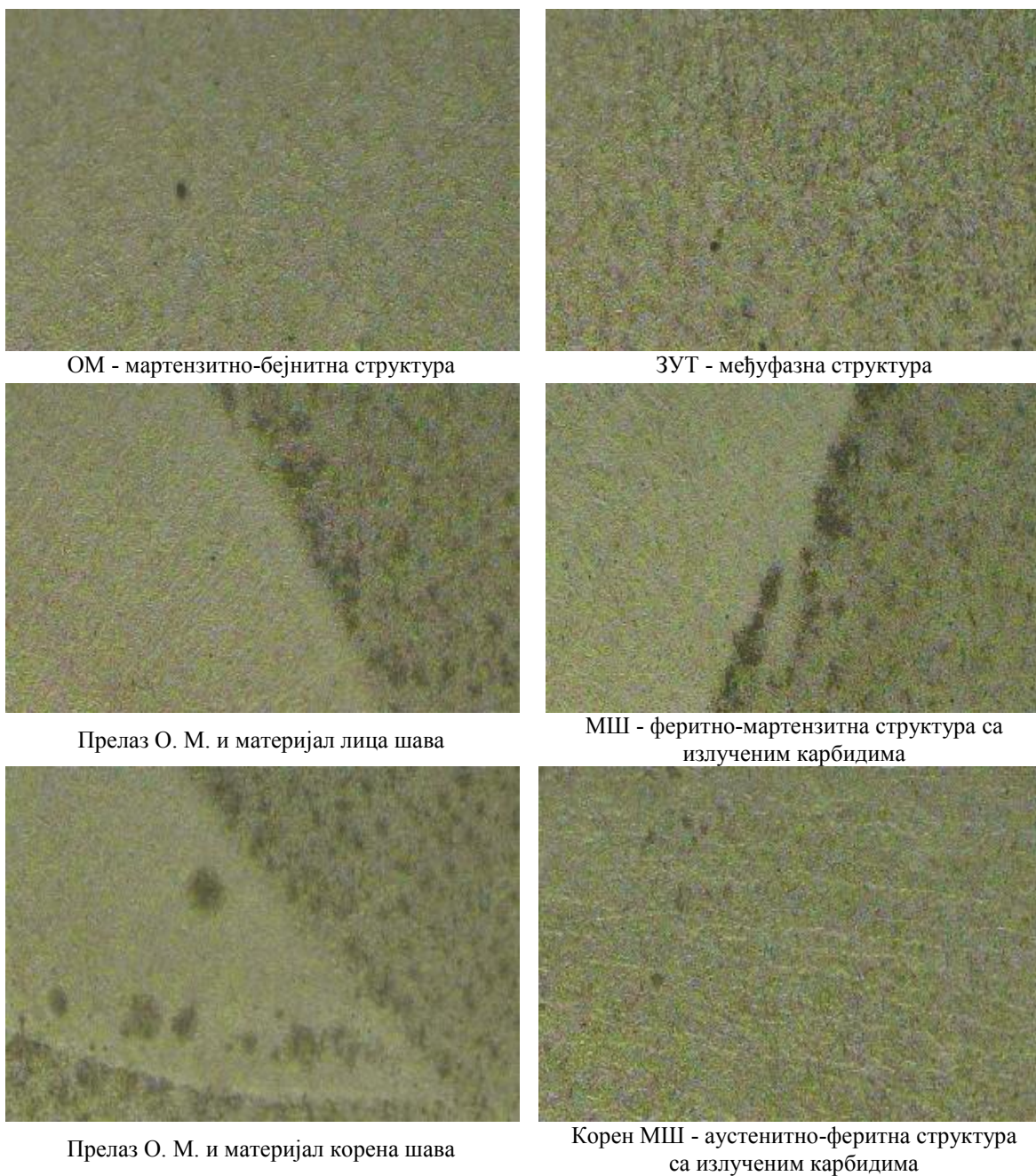


Прелаз О. М. и материјал корена шави



Корен МШ - аустенитно-феритна структура са излученим карбидима

Слика 4.8. Микроструктура карактеристичних зона узорак – 1 (200×)

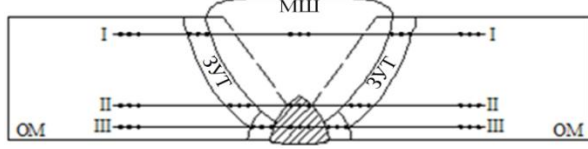


Слика 4.9. Микроструктура карактеристичних зона узорак – 2 (200×)

4.2.3. Мерење тврдоће

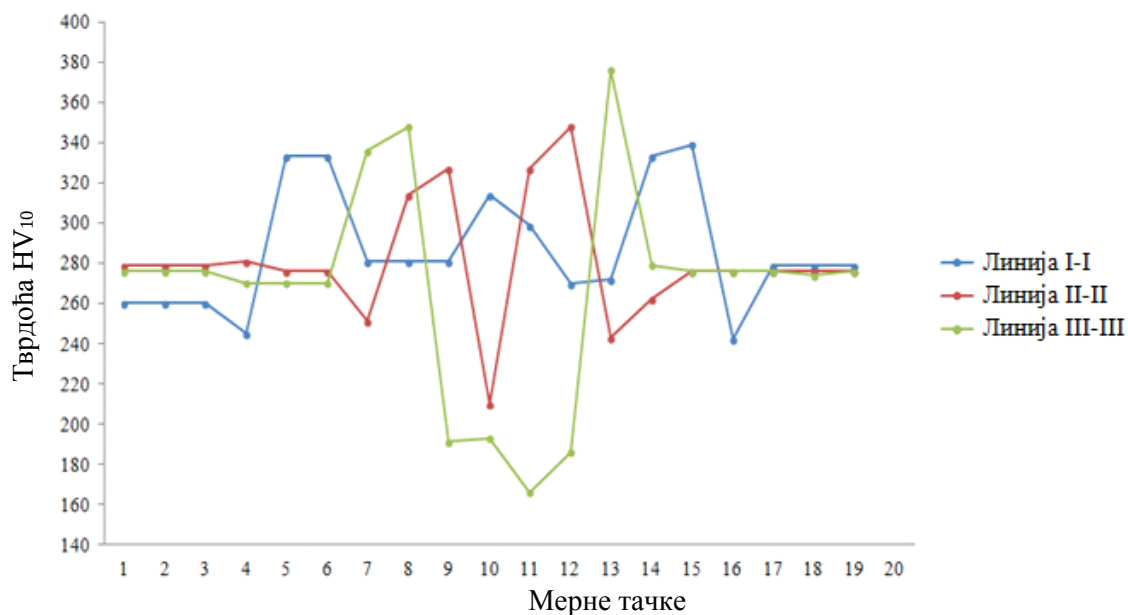
Мерење тврдоће изведено је на два узорка у три линије са деветнаест тачака код првог и двадесет тачака код другог узорка (слике 4.10. и 4.13.). Тврдоћа је мерена методом Викерс, а резултати су приказани у табели 4.14. и на сликама 4.11, 4.12, 4.14 и 4.15.

Табела 4.14. Вредности тврдоће узорка измерене методом Викерс (HV_{10})

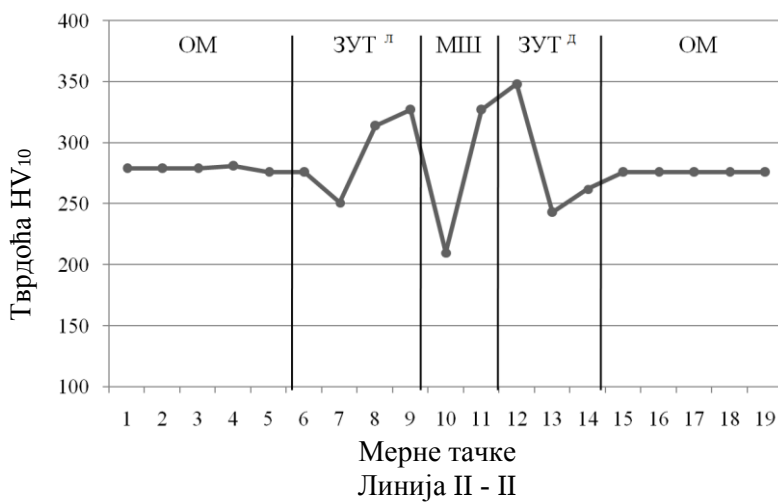
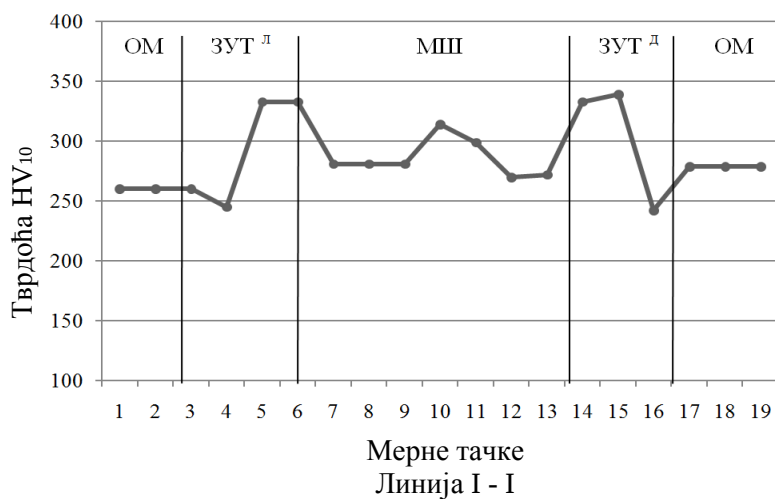
												Сучеоно заварени спој: дебљина 15 mm; тврдоћа мерена методом HV ₁₀				
Број мерне тачке	Технологија РЕЛ/МАГ															
	Узорак 1						Узорак 2									
	I-I		II-II		III-III		I-I		II-II		III-III					
1	260	ОМ	279	ОМ	276	ОМ	281	ОМ	279	ОМ	279	ОМ				
2	260		279		276		274		276		279					
3	260		279		276		279		279		279					
4	245	ЗУТ	281	ОМ	270	ОМ	254	ЗУТ	276	ОМ	279	ОМ				
5	333		276		270		251		276		279					
6	333		276		270		342		276		279					
7	281	МШ	251	ЗУТ	336	ЗУТ	289	МШ	254	ЗУТ	266	ЗУТ				
8	281		314		348		287		256		262					
9	281		327		191	МШ	281		МШ	339	МШ	336	МШ			
10	314	МШ	210	МШ	193		МШ	276		МШ		317		336		
11	299		327		166			390				319		198		
12	270	ЗУТ	348	ЗУТ	186	ЗУТ		299	ЗУТ		191	183				
13	272		243		376			268			333	186				
14	333	ЗУТ	262	ОМ	279	ОМ	266	ЗУТ	325	ЗУТ	197	ЗУТ				
15	339		276		276		294		236		336					
16	242		276		276		325		258	ОМ	342	ОМ				
17	279	ОМ	276		276		351	ОМ	281		245					
18	279		276		274		276		276		281					
19	279		276		276		279		276		279					
20	-		-		-		279		270		279					



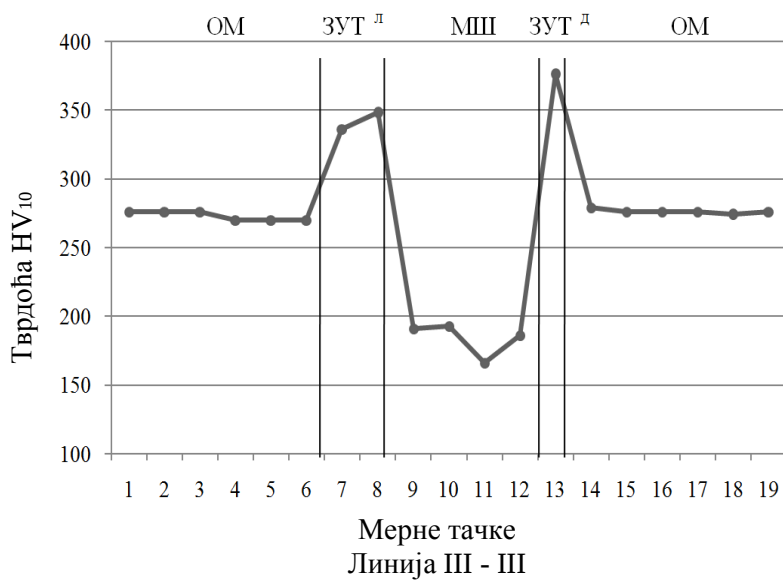
Слика 4.10. Металографски узорак - 1 за испитивање макроструктуре и мерење тврдоће сучеоно завареног споја



Слика 4.11. Збирни дијаграм расподеле тврдоће узорак – 1



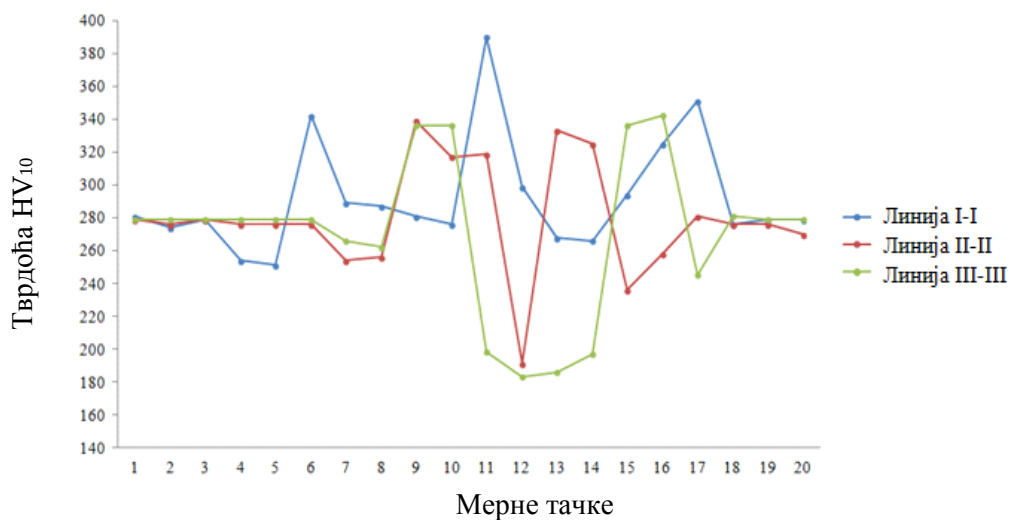
Слика 4.12. Дијаграми расподеле тврдоће узорак – 1 / 1



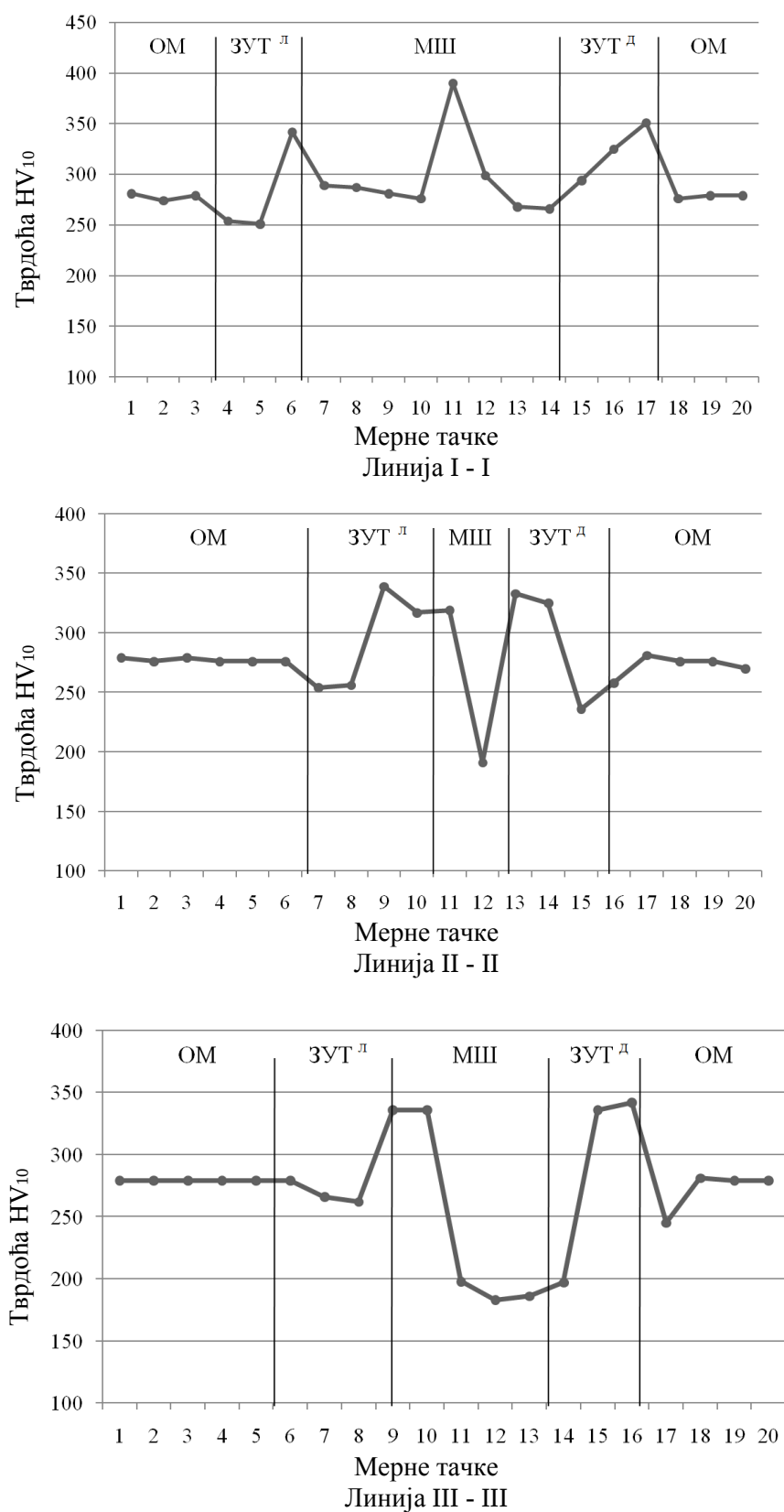
Слика 4.12. Дијаграми расподеле тврдоће узорак – 1 / 2



Слика 4.13. Металографски узорак - 2 за испитивање макроструктуре и мерење тврдоће сучеоно завареног споја



Слика 4.14. Збирни дијаграм расподеле тврдоће узорак – 2



Слика 4.15. Дијаграми расподеле тврдоће узорак – 2

4.2.4. Одређивање ударне жилавости

Испитивање енергије лома и ударне жилавости вршено је на собној температури и то: на лицу шава - пет узорака, корену шава - четири узорка и корен шава-линија стапања - пет узорака. Резултати су приказани у табелама 4.15. до 4.17.

Табела 4.15. Енергија лома и ударна жилавост лица шава средина на собној температури

Челик	Температура °C	Број узорка	Енергија иницијације J	Енергија ширења J	Енергија лома J	Ударна жилавост J/cm ²	Жилав лом %
S690 QL	+20	1.	34,63	9,92	44,54	55,68	1,82
		2.	32,09	19,96	52,05	65,06	13,58
		3.	27,15	20,16	47,31	59,14	8,20
		4.	33,05	16,16	49,21	61,51	6,20
		5.	24,58	11,37	35,95	44,94	1,08

Табела 4.16. Енергија лома и ударна жилавост корена шава средина на собној температури

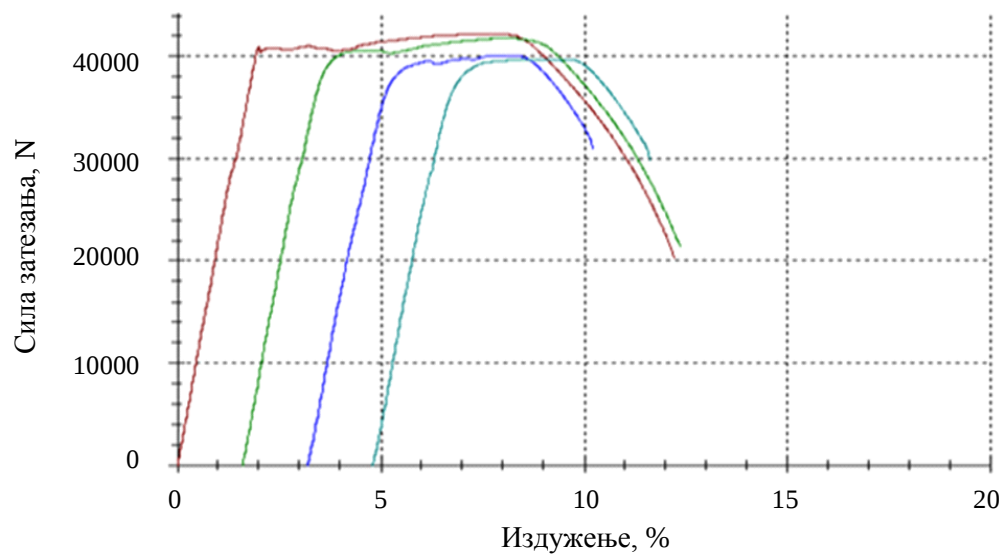
Челик	Температура °C	Број узорка	Енергија иницијације J	Енергија ширења J	Енергија лома J	Ударна жилавост J/cm ²	Жилав лом %
S690 QL	+20	1.	21,08	9,59	30,67	38,34	0,64
		2.	15,48	11,85	27,33	34,16	0,88
		3.	14,77	30,26	45,03	56,29	27,53
		4.	14,52	11,60	26,12	32,65	4,89

Табела 4.17. Енергија лома и ударна жилавост корен шава – линија стапања, на собној температури

Челик	Температура °C	Број узорка	Енергија иницијације J	Енергија ширења J	Енергија лома J	Ударна жилавост J/cm ²	Жилав лом %
S690 QL	+20	1.	15,53	34,99	50,53	63,16	15,43
		2.	8,41	19,88	28,29	35,36	12,96
		3.	19,41	15,43	34,84	43,55	2,36
		4.	13,28	21,38	34,66	43,32	21,67
		5.	17,82	17,12	34,93	43,66	2,34

4.2.5. Испитивање затезањем

Испитивање затезањем завареног споја изведено је на четири узорка. Резултати испитивања приказани су у табели 4.18. и на сликама 4.16. и 4.17.

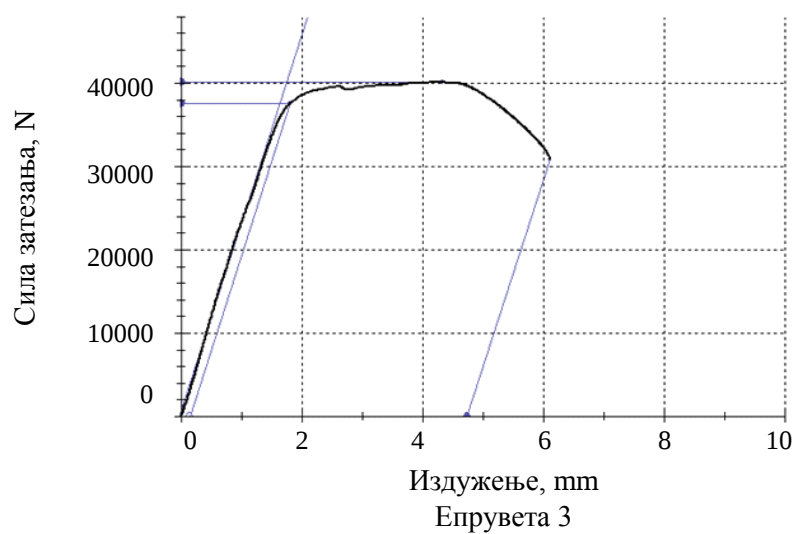
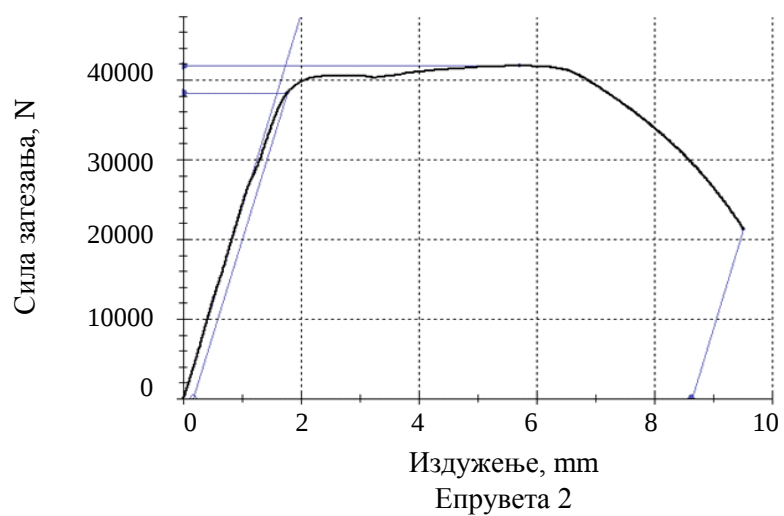
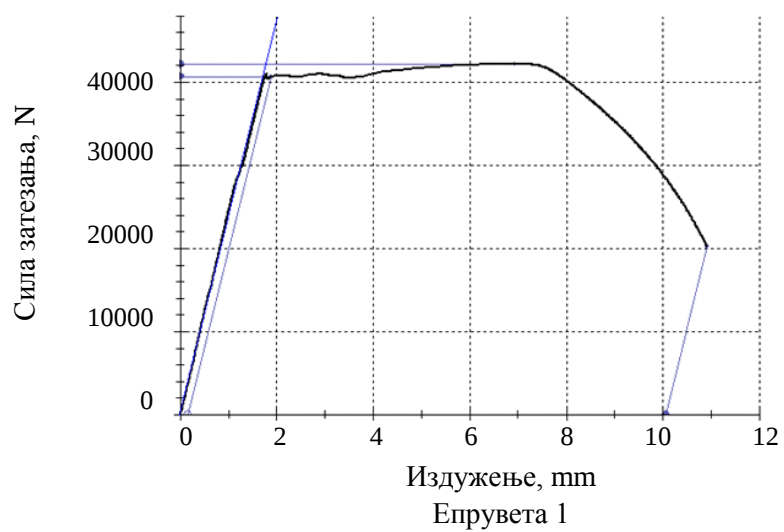


Слика 4.16. Збирни дијаграм затезања за четири епрувете – 3С

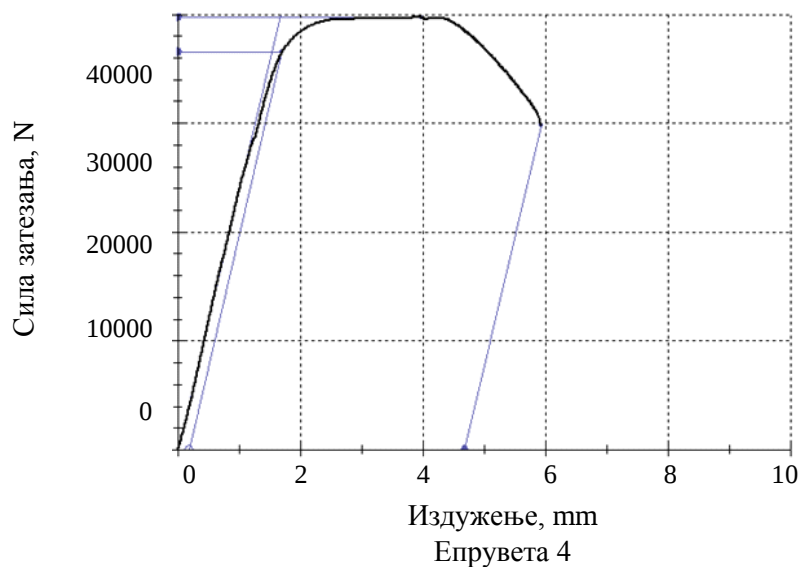
Лом епрувета се у свим случајевима дешавао у основном материјалу, што указује на то да су зоне завареног споја јаче од основног материјала.

Табела 4.18. Експериментални резултати испитивања затезањем – 3С

Број епрувете	l_0 , mm	S_0 , mm ²	$R_{p0,2}$, MPa	R_m , MPa	$A_{11,3}$, %
1.	89,28	50,27	809,40	839,92	11,30
2.	88,42	50,27	763,52	831,08	9,77
3.	86,96	49,39	760,36	812,00	5,49
4.	86,96	49,39	739,68	804,47	5,38



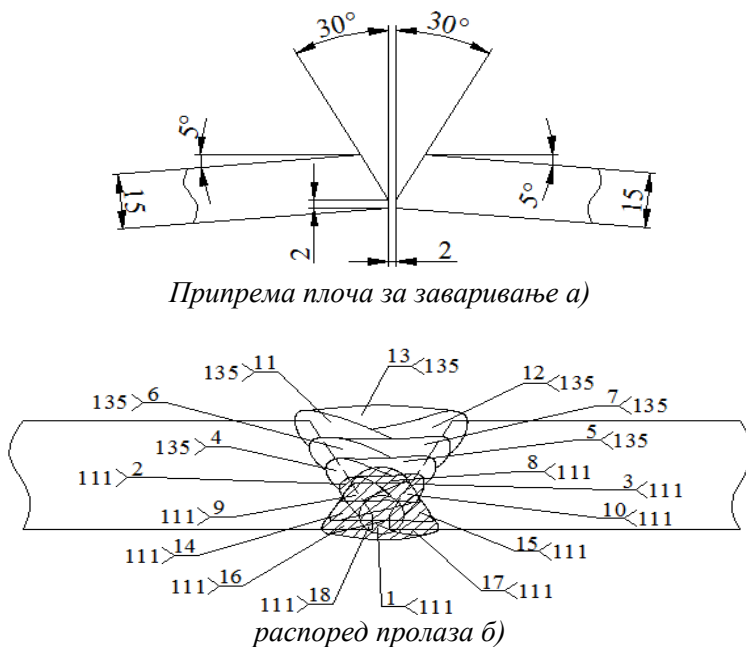
Слика 4.17. Дијаграми затезања за четири епрувете – ЗС / 1



Слика 4.17. Дијаграми затезања за четири епрувете – 3С / 2

4.3. Треће експериментално испитивање – технологија РЕЛ/МАГ са осамнаест пролаза

Измењена је, са већим бројем пролаза (слика 4.18.), технологија РЕЛ/МАГ са електродом INOX В 18/8/6 пречника 3,25 mm (коренски пролаз) и пуном жицом MIG 75 пречника 1,2 mm (завари попуне) у заштити мешавине гасова Ag + 18% CO₂, уз примену параметара приказаних у табели 4.19.



Слика 4.18. Припрема плоча за заваривање а) и распоред пролаза б)

Табела 4.19. Параметри заваривања

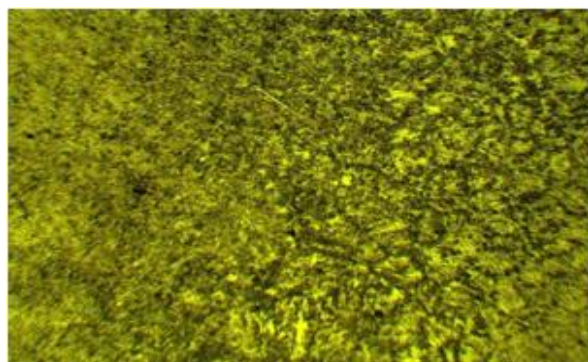
Завар број	Додатни материјал / пречник - / mm	I A	U V	t _{zav} s	v _{zav} cm/s	q ₁ kJ/cm
1.	INOX B 18/8/6 / 3,25	125	25	101	0,346	7,225
2.	INOX B 18/8/6 / 3,25	125	25	102	0,343	7,289
3.	INOX B 18/8/6 / 3,25	125	25	103	0,340	7,353
4.	MIG 75 / 1,2 (Ar/CO ₂ =82/18%)	245	25	35	1	4,594
5.	MIG 75 / 1,2 (Ar/CO ₂ =82/18%)	245	25	37	0,946	4,856
6.	MIG 75 / 1,2 (Ar/CO ₂ =82/18%)	245	25	37	0,946	4,856
7.	MIG 75 / 1,2 (Ar/CO ₂ =82/18%)	245	25	35	1	4,594
8.	INOX B 18/8/6 / 3,25	125	25	104	0,336	7,44
9.	INOX B 18/8/6 / 3,25	125	25	70	0,5	5
10.	INOX B 18/8/6 / 3,25	125	25	89	0,393	6,361
11.	MIG 75 / 1,2 (Ar/CO ₂ =82/18%)	245	25	36	0,972	4,726
12.	MIG 75 / 1,2 (Ar/CO ₂ =82/18%)	245	25	42	0,833	5,515
13.	MIG 75 / 1,2 (Ar/CO ₂ =82/18%)	245	25	35	1	4,594
14.	INOX B 18/8/6 / 3,25	125	25	92	0,38	6,579
15.	INOX B 18/8/6 / 3,25	125	25	114	0,307	8,143
16.	INOX B 18/8/6 / 3,25	125	25	85	0,411	6,083
17.	INOX B 18/8/6 / 3,25	125	25	80	0,437	5,721
18.	INOX B 18/8/6 / 3,25	125	25	132	0,265	9,434

4.3.1. Испитивање макроструктуре

Макроструктурним прегледом нису пронађене грешке. Узорак задовољава ниво квалитета „В“ према стандарду EN ISO 5817.

4.3.2. Испитивање микроструктуре

Испитивање микроструктуре код ове технологије рађено је светлосним микроскопом са увећањем 200× у свим карактеристичним зонама на једном узорку (слика 4.19.).

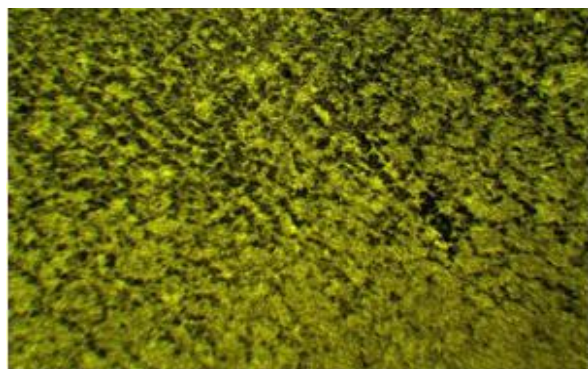


ЗУТ - сорбитно - перлитна структура, линија I - I



МШ - међуфазна структура - сорбит, линија I - I

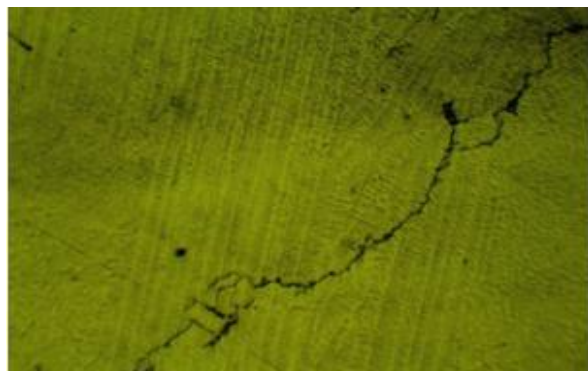
Слика 4.19. Микроструктура карактеристичних зона (200×) / 1



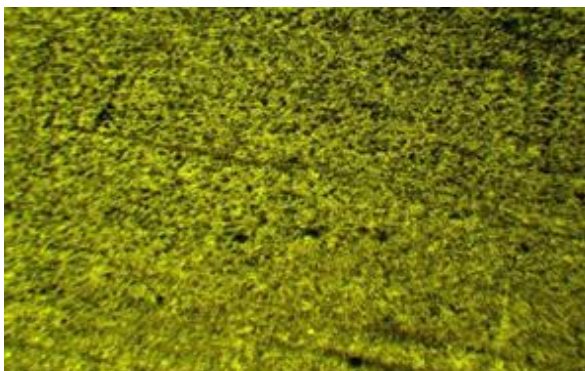
ЗУТ - међуфазна структура са учешћем перлита,
линија II - II



МШ - микропрлина, линија II - II



МШ - микропрлина, линија II - II

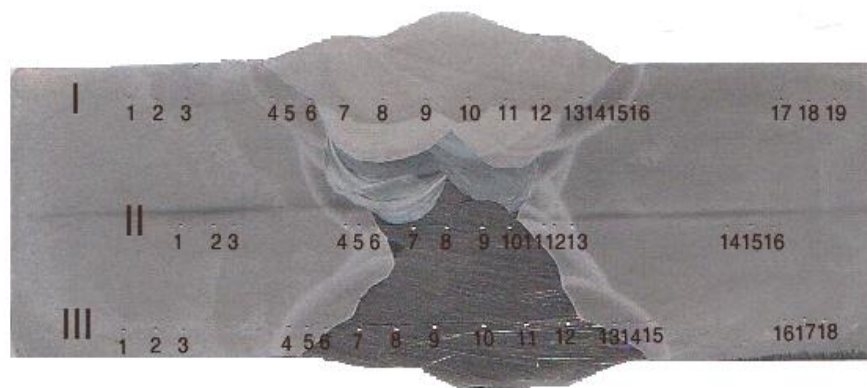


ЗУТ - сорбитно-перлитна структура
линија III - III

Слика 4.19. Микроструктура карактеристичних зона (200×) / 2

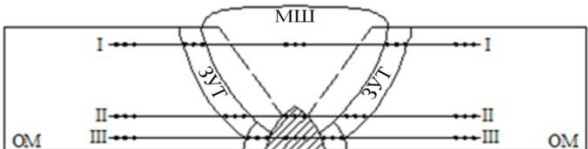
4.3.3. Мерење тврдоће

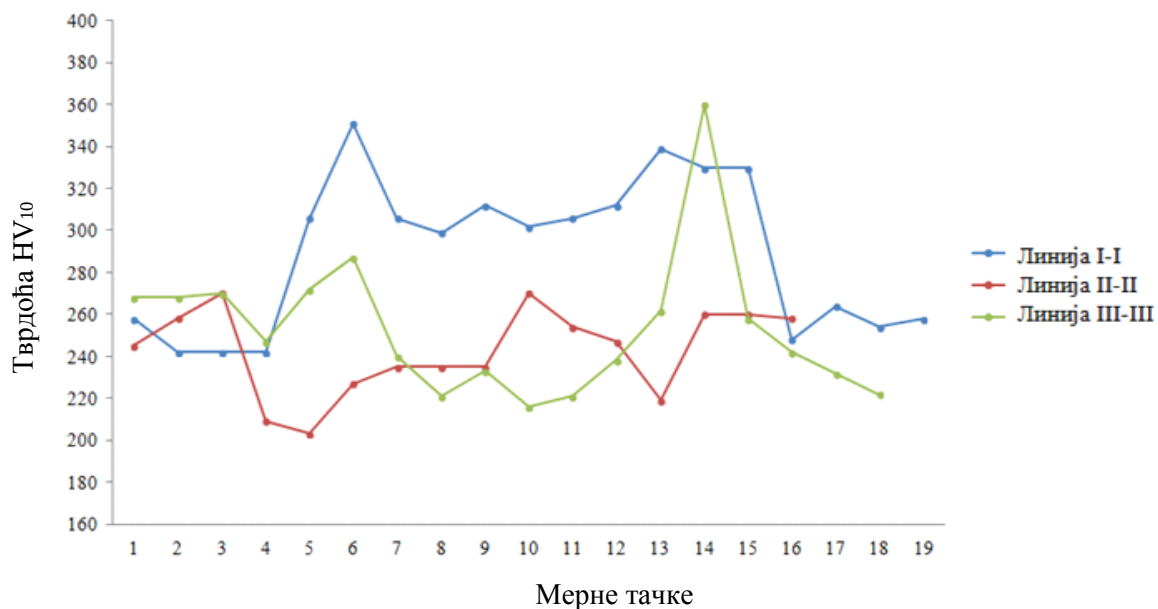
Мерење тврдоће рађено је на једном узорку у три линије са деветнаест тачака, (слика 4.20.). Тврдоћа је мерена методом Викерс. Вредности мерене тврдоће приказани су у табели 4.20. и на сликама 4.21. и 4.22.



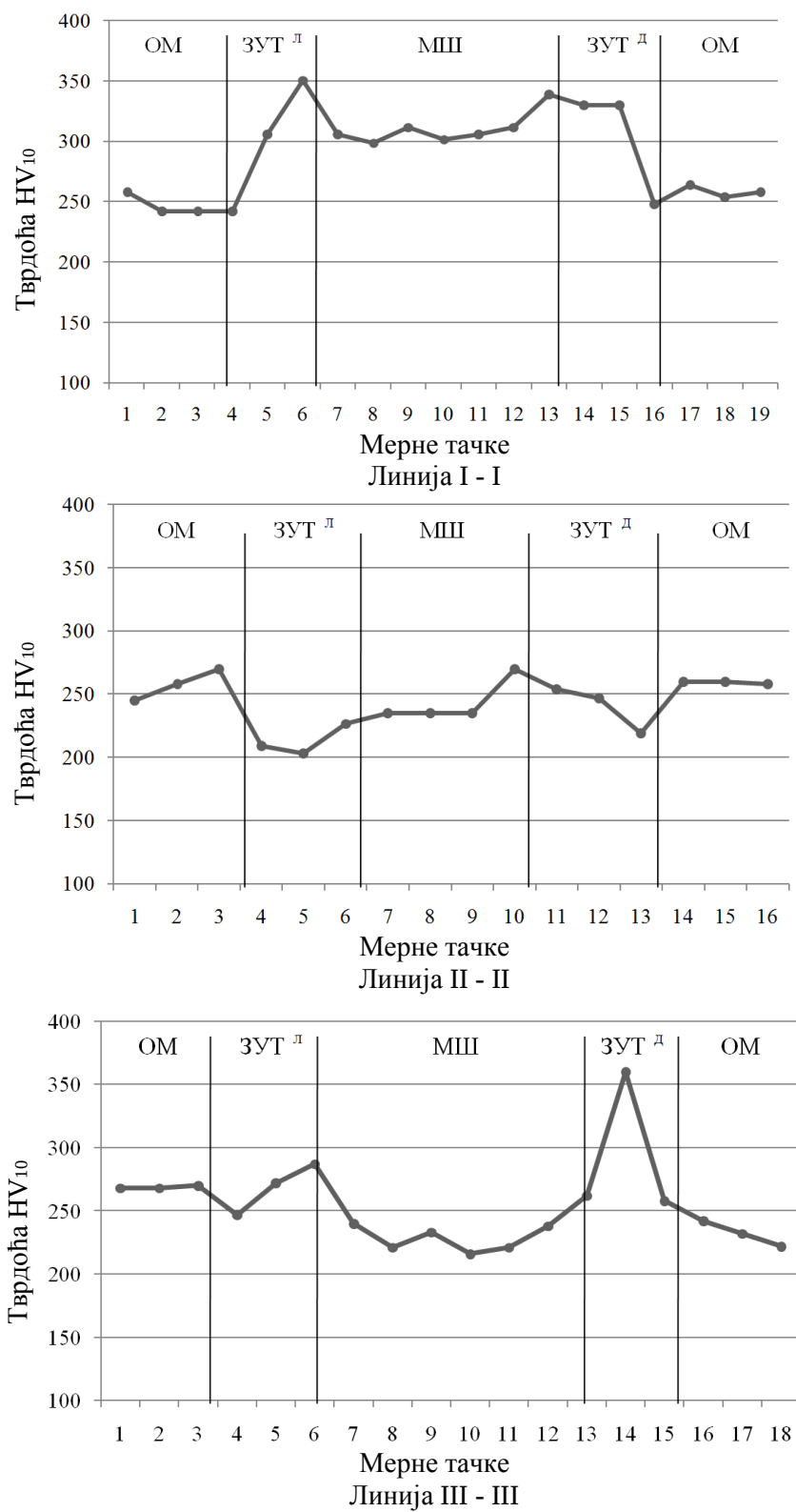
Слика 4.20. Металлографски узорак за испитивање
макроструктуре и мерење тврдоће

Табела 4.20. Вредности тврдоће узорка измерене методом Викерс (HV_{10})

					Сучеонони заварени спој: дебљина 15 mm; тврдоћа мерена методом HV ₁₀	
Број мерне тачке	Технологија РЕЛ/МАГ					
	I-I		II-II		III-III	
1	258	ОМ	245	ОМ	268	ОМ
2	242		258		268	
3	242		270		270	
4	242	ЗУТ	209	ЗУТ	247	ЗУТ
5	306		203		272	
6	351		227		287	
7	306	МШ	235	МШ	240	МШ
8	299		235		221	
9	312		235		233	
10	302		270	216		
11	306		254	221		
12	312	ЗУТ	247	ЗУТ	238	ЗУТ
13	339		219		262	
14	330		260		360	
15	330	ОМ	260	ОМ	258	ОМ
16	248		258		242	
17	264		-		232	
18	254		-		222	
19	258		-		-	



Слика 4.21. Збирни дијаграм расподеле тврдоће



Слика 4.22. Дијаграми расподеле тврдоће

4.3.4. Одређивање ударне жилавости

Одређивање енергије лома и ударне жилавости изведено је на собној температури и то: на лицу шава-средина, лицу шава-линија стапања, лицу шава-ЗУТ, корен шава-средина, корен шава-линија стапања, корен шава-ЗУТ са по три узорка. Резултати ударне жилавости приказани су у табелама 4.21. до 4.26.

Табела 4.21. Енергија лома и ударна жилавост лица шава - средина на собној температури

Челик	Температура °C	Број узорка	Енергија иницијације J	Енергија ширења J	Енергија лома J	Ударна жилавост J/cm ²	Жилав лом %
S690 QL	+20	1.	3,86	20,31	24,17	30,21	23,64
		2.	13,36	32,17	45,53	56,91	22,38
		3.	13,79	20,87	34,66	43,32	21,55

Табела 4.22. Енергија лома и ударна жилавост лица шава - линија стапања на собној температури

Челик	Температура °C	Број узорка	Енергија иницијације J	Енергија ширења J	Енергија лома J	Ударна жилавост J/cm ²	Жилав лом %
S690 QL	+20	1.	23,28	119,79	143,25	179,06	97,59
		2.	22,04	120,97	143,00	178,76	95,43
		3.	29,86	129,86	159,72	199,65	96,29

Табела 4.23. Енергија лома и ударна жилавост лица шава - ЗУТ на собној

Челик	Температура °C	Број узорка	Енергија иницијације J	Енергија ширења J	Енергија лома J	Ударна жилавост J/cm ²	Жилав лом %
S690 QL	+20	1.	45,68	143,51	189,19	236,48	93,00
		2.	28,98	143,77	172,75	215,94	95,65
		3.	48,48	161,25	209,74	262,17	96,65

Табела 4.24. Енергија лома и ударна жилавост корена шава средина на собној температури

Челик	Температура °C	Број узорка	Енергија иницијације J	Енергија ширења J	Енергија лома J	Ударна жилавост J/cm ²	Жилав лом %
S690 QL	+20	1.	42,14	43,62	85,76	107,20	11,23
		2.	37,82	51,63	89,45	111,82	13,01
		3.	32,44	49,65	82,09	102,62	22,00

Табела 4.25. Енергија лома и ударна жилавост корена шава линија стапања на собној температури

Челик	Температура °C	Број узорка	Енергија иницијације J	Енергија ширења J	Енергија лома J	Ударна жилавост J/cm ²	Жилав лом %
S690 QL	+20	1.	70,83	121,83	192,67	240,84	93,16
		2.	58,71	123,56	182,27	227,83	98,43
		3.	60,12	123,21	183,33	229,16	92,42

Табела 4.26. Енергија лома и ударна жилавост корена шава ЗУТ на собној температури

Челик	Температура °C	Број узорка	Енергија иницијације J	Енергија ширења J	Енергија лома J	Ударна жилавост J/cm ²	Жилав лом %
S690 QL	+20	1.	75,74	160,61	236,35	295,43	97,27
		2.	47,81	203,35	251,16	313,95	98,76
		3.	78,39	163,73	242,11	302,64	99,58

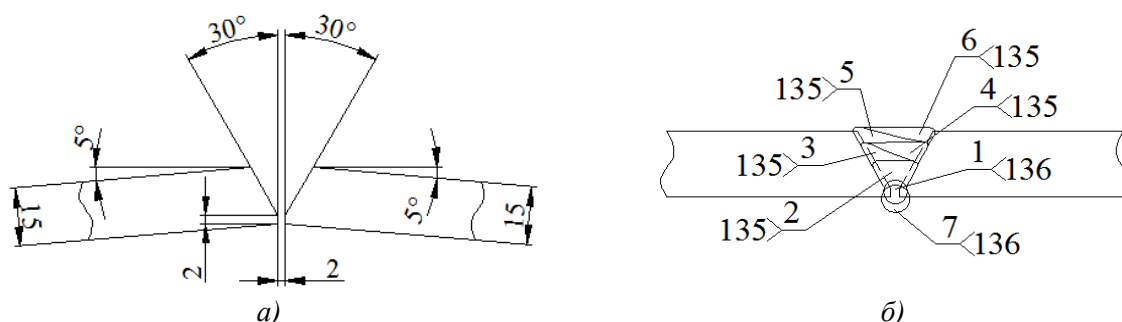
4.3.5. Испитивање затезањем

Испитивање затезањем није рађено.

4.4. Четврто експериментално испитивање – технологија МАГ/МАГ са коренским пролазима у заштити угљен-диоксида

Плоче су заварене коришћењем МАГ/МАГ технологије са пуњеном жицом А7 - FD пречника 1,2 mm (коренски пролаз) у заштитној атмосфери CO₂, (C1 – EN 14175), а за пролазе попуне коришћена је такође пуна жица МИГ 75 пречника 1,2 mm у заштити мешавине гасова Ar + 18% CO₂.

За време заваривања изведено је предгревање гасним грејачем на температуру $T_p = 200^\circ\text{C}$, а температура међупролаза (interpass) одржавана је у интервалу од $200 \div 225^\circ\text{C}$. Контрола ових температура вршена је бесконтактним термометром.



Слика 4.23. Припремна плоча за заваривање а) и распоред пролаза б)

Припрема жлеба плоча (слика 4.23.) извршена је машинским путем на глодалици. Пре почетка заваривања плоче су постављене под углом у циљу смањења деформација које настају при заваривању услед унете топлоте. Параметри заваривања (табела 4.27.) који су коришћени одабрани су тако да је унета количина енергије у препорученим границама.

Табела 4.27. Параметри заваривања

Завар број	Поступак	Додатни материјал / пречник - / mm	Струја А	Напон V	Брзина заваривања cm/min	Погонска енергија kJ/cm
1.	136	A7 - FD / 1,2	128	22	20,5	7,00
2.	135	MIG 75 / 1,2	143	26	33,9	4,94
3.	135	MIG 75 / 1,2	143	26	35,8	4,67
4.	135	MIG 75 / 1,2	143	26	36,3	4,61
5.	135	MIG 75 / 1,2	188	24	34,5	5,89
6.	135	MIG 75 / 1,2	188	24	35,3	5,75
7.	136	A7 - FD / 1,2	234	23	20,7	13,26

За коренски пролаз коришћен је додатни материјал према стандарду: EN ISO 17633 – A: 2006: T 18 8 Mn R C 3 и AWS A5.22 – 10: E307T0 – G, рутилно пуњена жица, трговачког назива A7 – FD, произвођач BÖHLER, Аустрија. Пречник коришћене пуњене жице је 1,2 mm.

Табела 4.28. Хемијски састав чистог метала шава у %

C	Si	Mn	Cr	Ni
0,1	0,7	6,5	18,5	8,8

Хемијски састав и механичке карактеристике чистог метала шава дате су у табелама 4.28. и 4.29.

Механичке карактеристике добијене су при испитивању завареног споја насталог у заштити мешавине гасова М21 (EN 14175) односно Ar + 18% CO₂.

Табела 4.29. Механичке карактеристике чистог метала шави

R _{p0,2} , МПа	R _m , МПа	A ₅ , %	KV (+20°C), J
420	630	39	60

Према препорукама из каталога произвођача ова жица се може користити и у заштити чистог угљен-диоксида, а проток заштитног гаса, у оба случаја, је 15 ÷ 18 l/min [9].

4.4.1. Испитивање макроструктуре

На узорцима нису откривене грешке типа заједа, непровара и прслина. Узорци задовољавају ниво квалитета „В“ према стандарду EN ISO 5817.

4.4.2. Испитивање микроструктуре

Испитивање микроструктуре код ове технологије рађено је светлосним микроскопом са увећањем 200× у свим карактеристичним зонама на два узорка (слике 4.24. и 4.25.).



ОМ - мартензитно-бејнитна структура



ЗУТ - међуфазна структура



Прелаз О. М. и материјал лица шави



МПИ - феритно-мартензитна структура са излученим карбидима

Слика 4.24. Микроструктура карактеристичних зона узорак - 1 (200×) /1

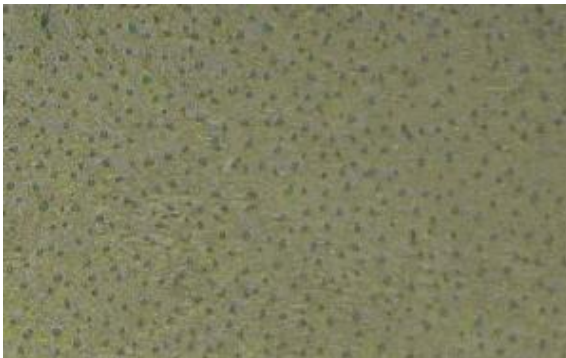


Прелаз О. М. и материјал корена шави

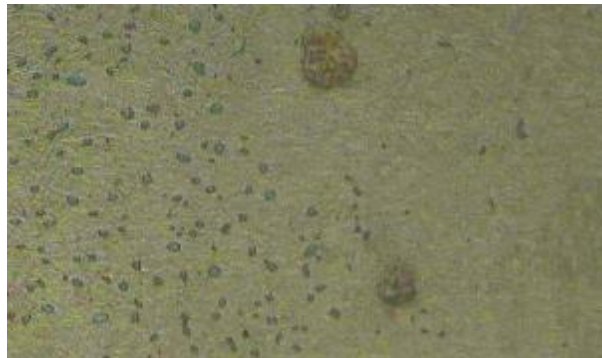


Корен МШ - аустенитно-феритна структура са финим карбидима

Слика 4.24. Микроструктура карактеристичних зона узорак - 1 (200×) /2



ОМ - мартензитно-бејнитна структура



ЗУТ - међуфазна структура



Прелаз О. М. и материјал лица шави



МШ - феритно-мартензитна структура са излученим карбидима

Слика 4.25. Микроструктура карактеристичних зона узорак - 2 (200×) /1



Прелаз О. М. и материјал корена шави



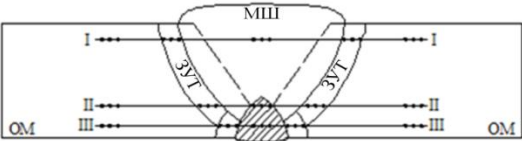
Корен МШ - аустенитно-феритна структура са финим карбидима

Слика 4.25. Микроструктура карактеристичних зона узорак - 2 (200×) /2

4.4.3. Мерење тврдоће

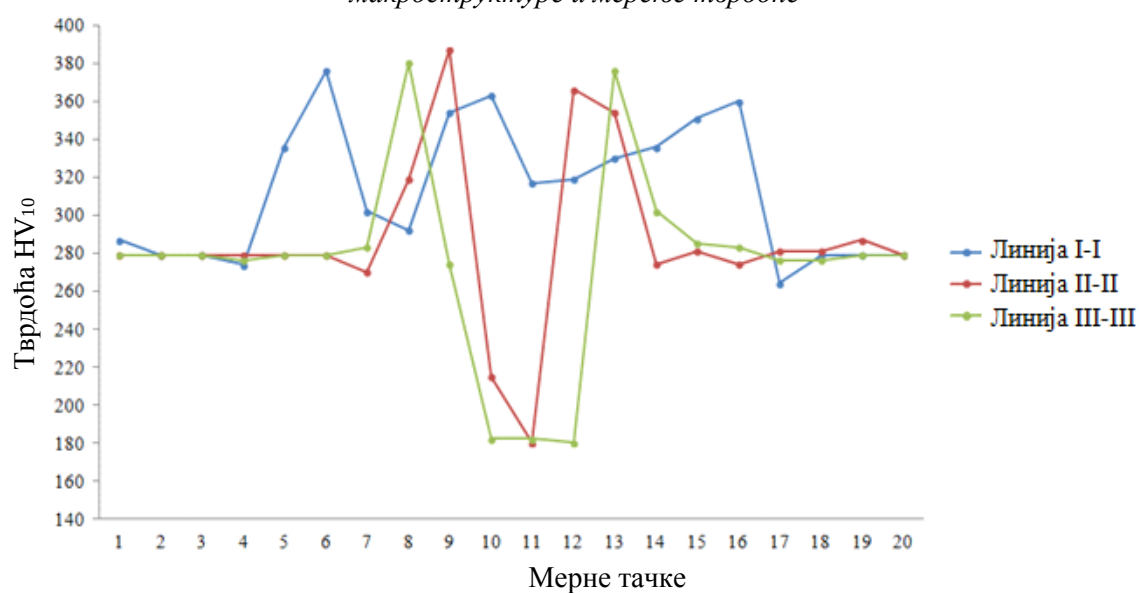
Мерење тврдоће вршено је на два узорка у три линије са двадесет тачака (слике 4.26. и 4.29). Тврдоћа је мерена методом Викерс. Резултати мерења приказани су у табели 4.30. и на сликама 4.27. до 4.31.

Табела 4.30. Вредности тврдоће узорка измерене методом Викерс (HV_{10})

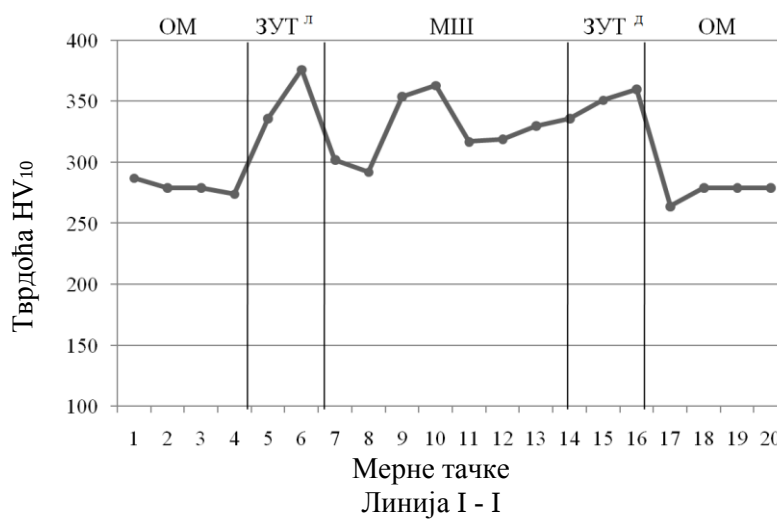
												Сучеоно заварени спој: дебљина 15 mm; тврдоћа мерена методом HV ₁₀	
Број мерне тачке	Технологија МАГ/МАГ												
	Узорак 1						Узорак 2						
	I-I		II-II		III-III		I-I		II-II		III-III		
1	287	ОМ	279	ОМ	279	ОМ	276	ОМ	281	ОМ	279	ОМ	
2	279		279		279		279		281		279		
3	279		279		279		279		281		276		
4	274		279		276		276		279		276		
5	336	ЗУТ	279	ОМ	279	ОМ	279	ЗУТ	279	ОМ	276	ОМ	
6	376	МШ	279		279		376		279		274		
7	302		270		283		363		253		383		
8	292		319		380		370		327		376		
9	354	МШ	387	МШ	274	МШ	370	МШ	376	ЗУТ	171	МШ	
10	363		215		182		387		281		179		
11	317		180		182		405		185		173		
12	319		366		180		405		228		194		
13	330	ЗУТ	354	ОМ	376	ОМ	401	ЗУТ	236	ОМ	387	ОМ	
14	336		274		302		380		287		268		
15	351		281		285		376		276		289		
16	360		274		283		380		279		283		
17	264	ОМ	281	ОМ	276	ОМ	287	ОМ	279	ОМ	289	ОМ	
18	279		281		276		292		279		283		
19	279		287		279		276		279		283		
20	279		279		279		279		279		281		



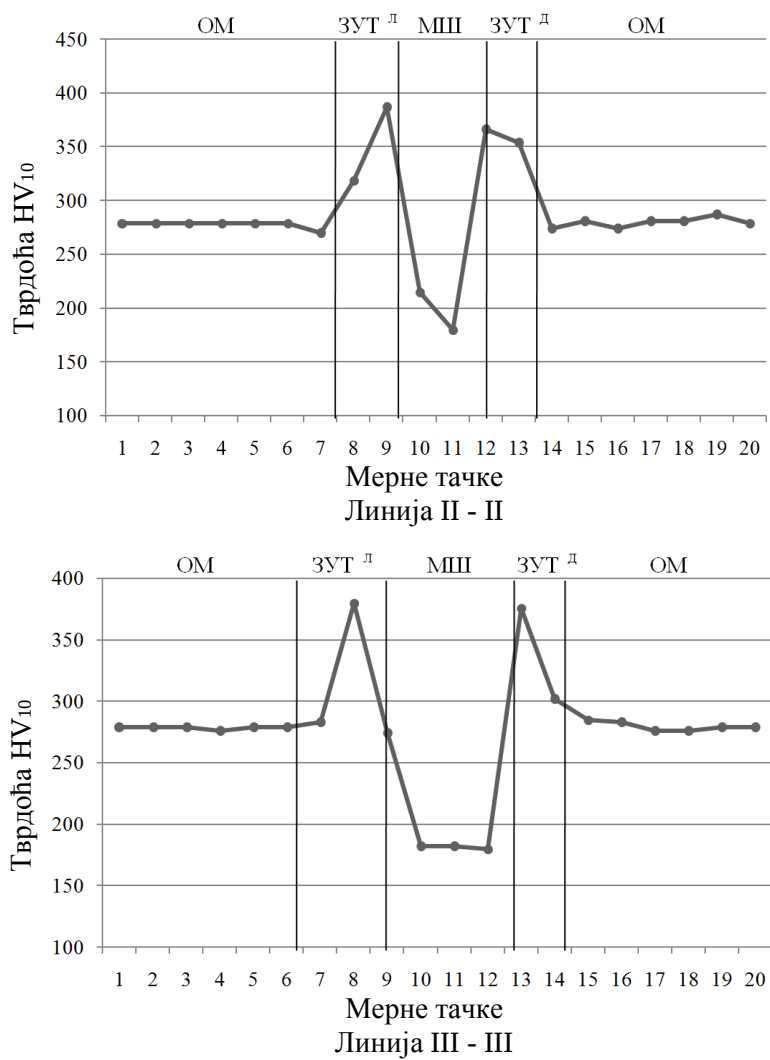
Слика 4.26. Металографски узорак - 1 за испитивање макроструктуре и мерење тврдоће



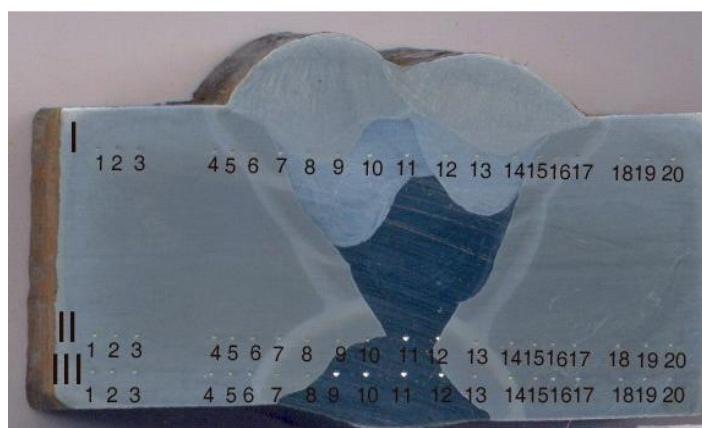
Слика 4.27. Збирни дијаграм расподеле тврдоће узорак - 1



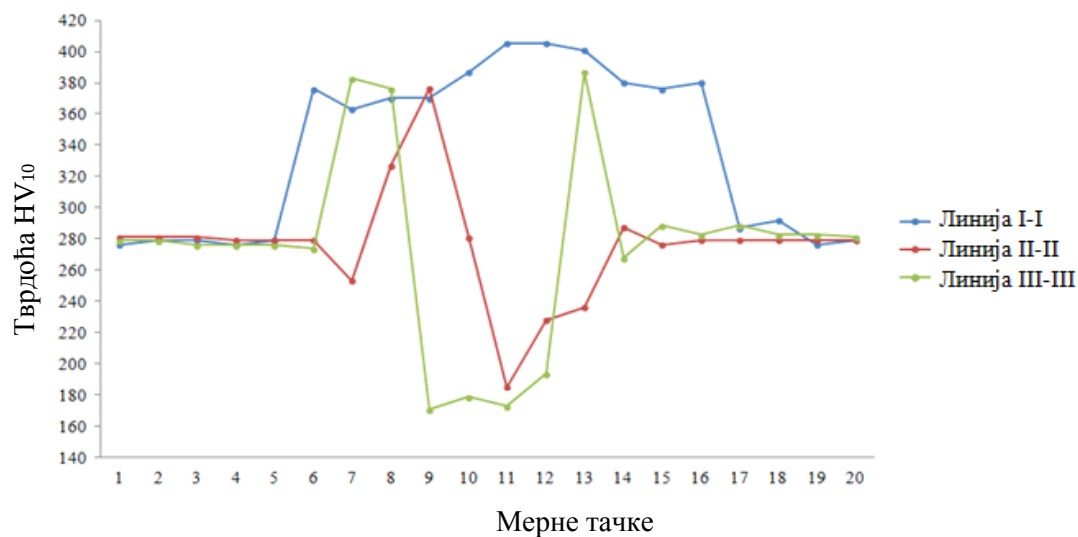
Слика 4.28. Дијаграми расподеле тврдоће узорак - 1 / 1



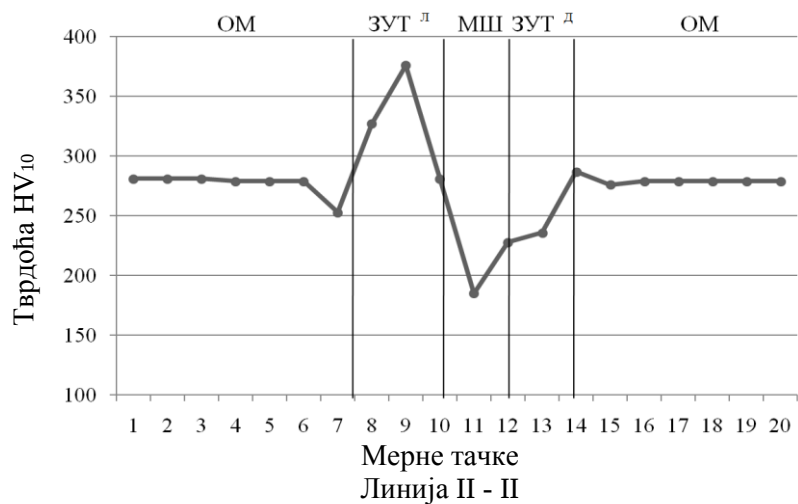
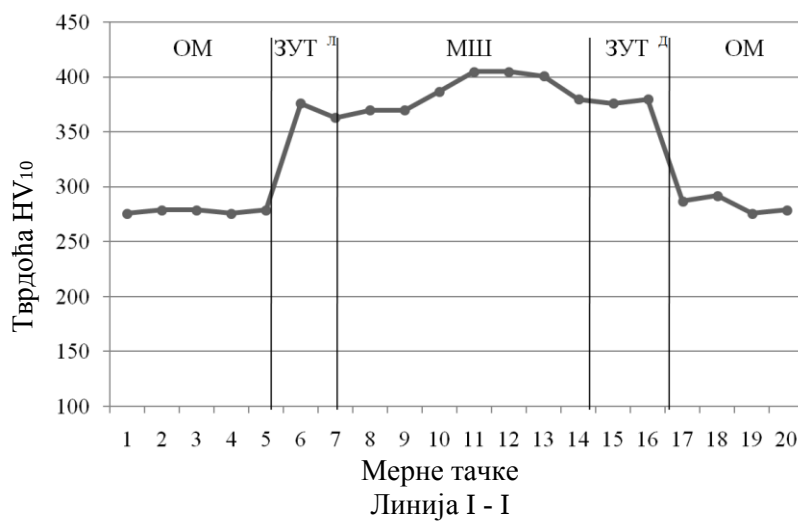
Слика 4.28. Дијаграми расподеле тврдоће узорак - 1 / 2



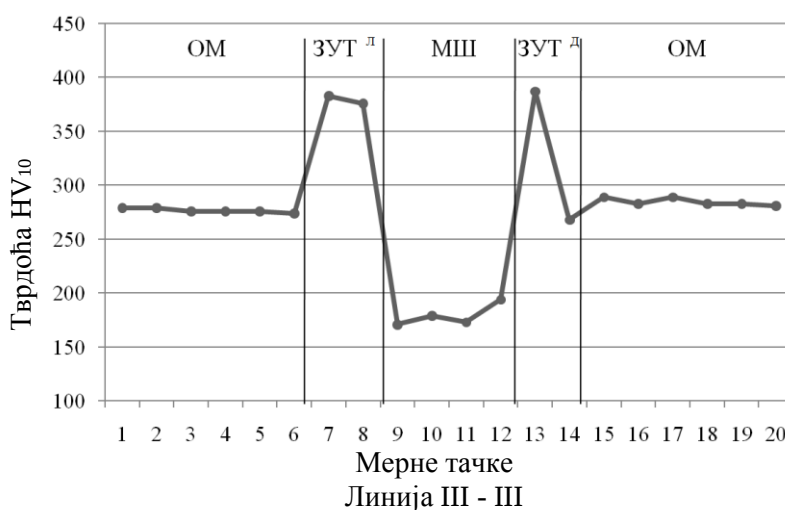
Слика 4.29. Металографски узорак - 2 за испитивање макроструктуре и мерење тврдоће



Слика 4.30. Збирни дијаграм расподеле тврдоће узорак - 2



Слика 4.31. Дијаграми расподеле тврдоће узорак - 2 / 1



Слика 4.31. Дијаграми расподеле тврдоће узорак - 2 / 2

4.4.4. Одређивање ударне жилавости

Одређивање енергије лома и ударне жилавости изведено је на собној температури и то: на лицу шава-средина - пет узорак, корен шава-средина - четири узорка и корен шава-линија стапања - пет узорак. Резултати су приказани у табелама 4.31. до 4.33.

Табела 4.31. Енергија лома и ударна жилавост лица шава-средина на собној температури

Челик	Температура °C	Број узорка	Енергија иницијације J	Енергија ширења J	Енергија лома J	Ударна жилавост J/cm ²	Жилав лом %
S690 QL	+20	1.	15,45	9,81	25,27	31,59	6,94
		2.	20,81	9,42	30,23	37,79	10,89
		3.	15,96	8,88	24,84	31,05	2,90
		4.	14,80	11,49	26,29	32,87	8,79
		5.	25,15	10,15	35,30	44,13	10,87

Табела 4.32. Енергија лома и ударна жилавост корена шава-средина на собној температури

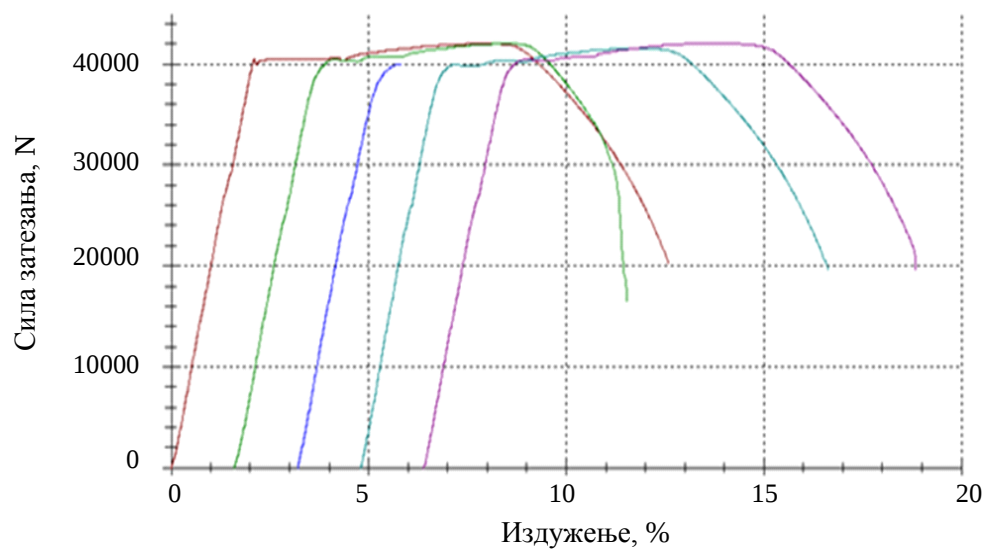
Челик	Температура °C	Број узорка	Енергија иницијације J	Енергија ширења J	Енергија лома J	Ударна жилавост J/cm ²	Жилав лом %
S690 QL	+20	1.	3,59	13,36	16,94	21,18	7,60
		2.	7,50	12,87	20,36	25,45	13,55
		3.	9,07	8,58	17,65	22,06	3,41
		4.	9,13	6,19	15,32	19,15	0,53

Табела 4.33. Енергија лома и ударна жилавост корен шава-линија стапања на собној температури

Челик	Температура °C	Број узорка	Енергија иницијације J	Енергија ширења J	Енергија лома J	Ударна жилавост J/cm ²	Жилав лом %
S690 QL	+20	1.	9,03	9,40	18,44	23,05	5,42
		2.	8,12	17,83	25,95	32,44	10,28
		3.	9,31	9,21	18,52	23,15	6,20
		4.	8,04	16,47	24,50	30,62	21,80
		5.	15,71	14,07	29,78	37,22	18,29

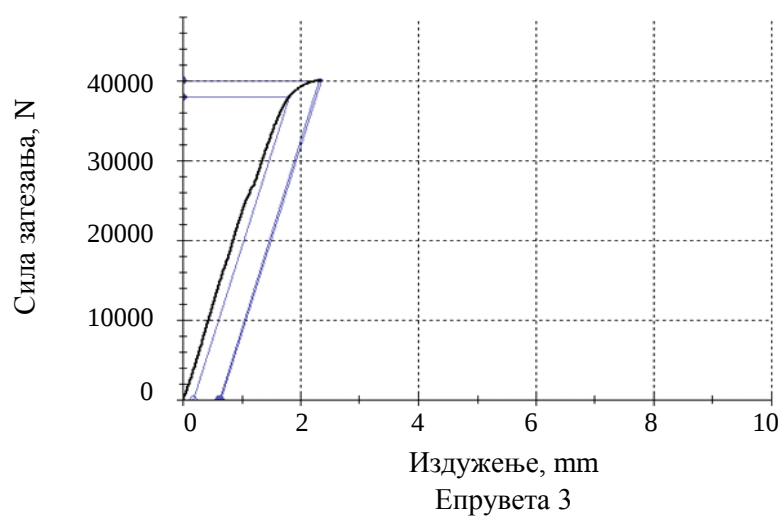
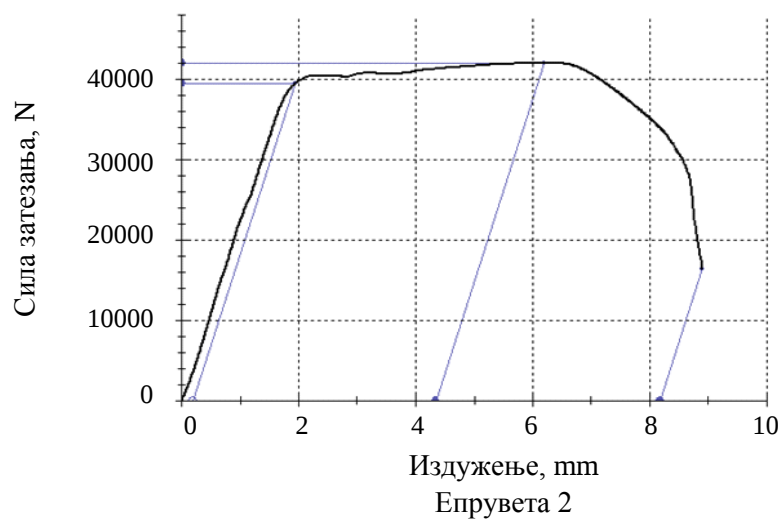
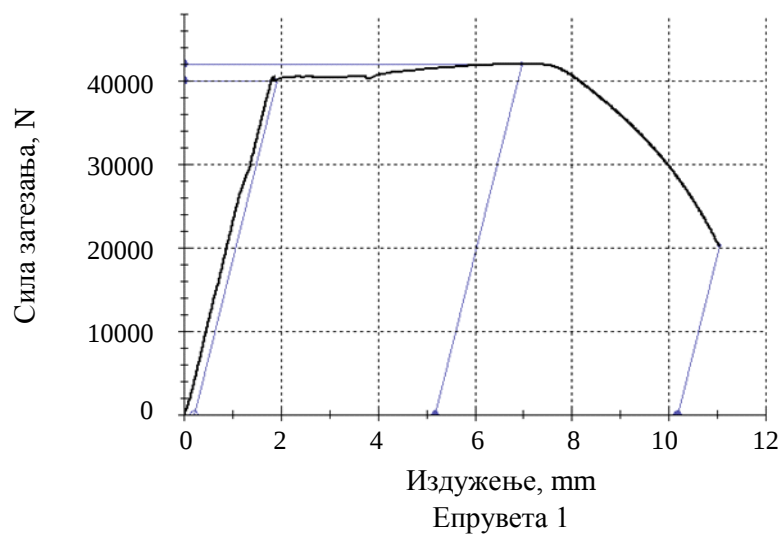
4.4.5. Испитивање затезањем

Испитивање затезањем завареног споја извршено је на пет узорак (слика 4.32. и слика 4.33.), а резултати су приказани у табели 4.34.

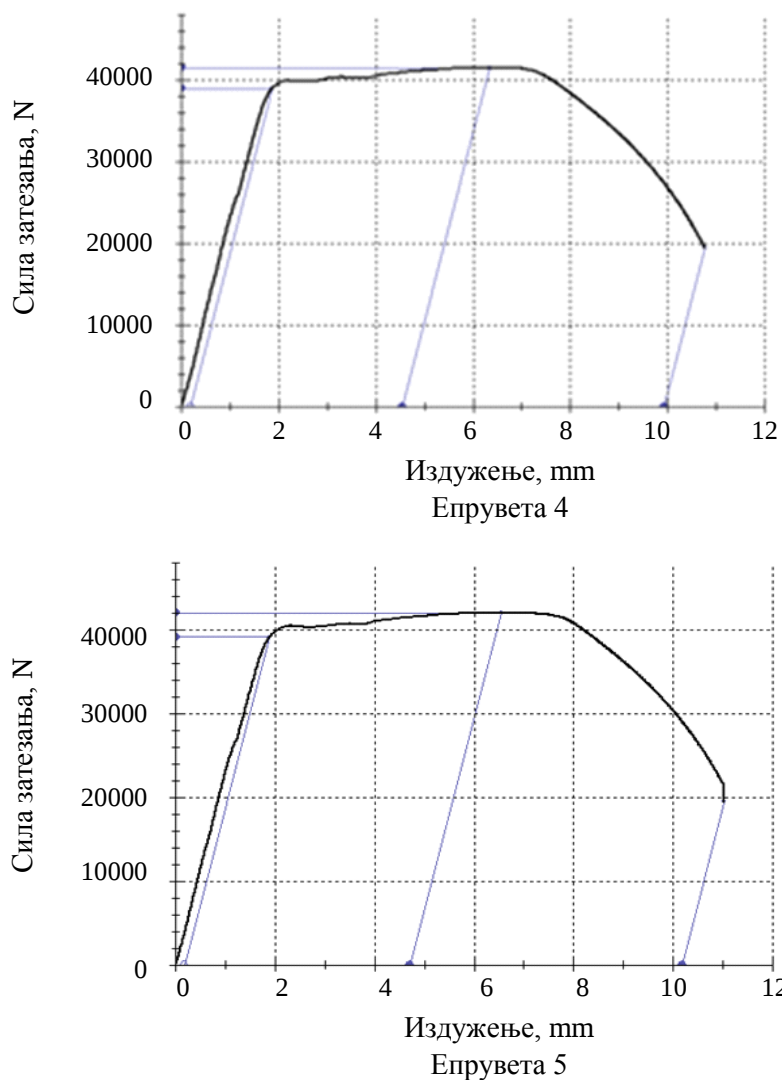
**Слика 4.32.** Збирни дијаграм затезања за пет епрувета – 3С**Табела 4.34.** Експериментални резултати испитивања затезањем – 3С

Број епрувете	l_0 , mm	S_0 , mm ²	$R_{p0,2}$, MPa	R_m , MPa	$A_{11,3}$, %
1.	87,63	50,39	794,10	834,36	11,59
2.	89,49	50,39	783,96	834,30	9,12
3.	89,26	50,01	759,19	800,00	0,72
4.	90,92	49,89	782,24	832,90	10,92
5.	88,75	50,27	778,61	837,26	11,48

У највећем броју случајева лом епрувета се дешавао у основном материјалу.



Слика 4.33. Дијаграми затезања за пет епрувета – 3С / 1



Слика 4.33. Дијаграми затезања за пет епрувета – 3C / 2

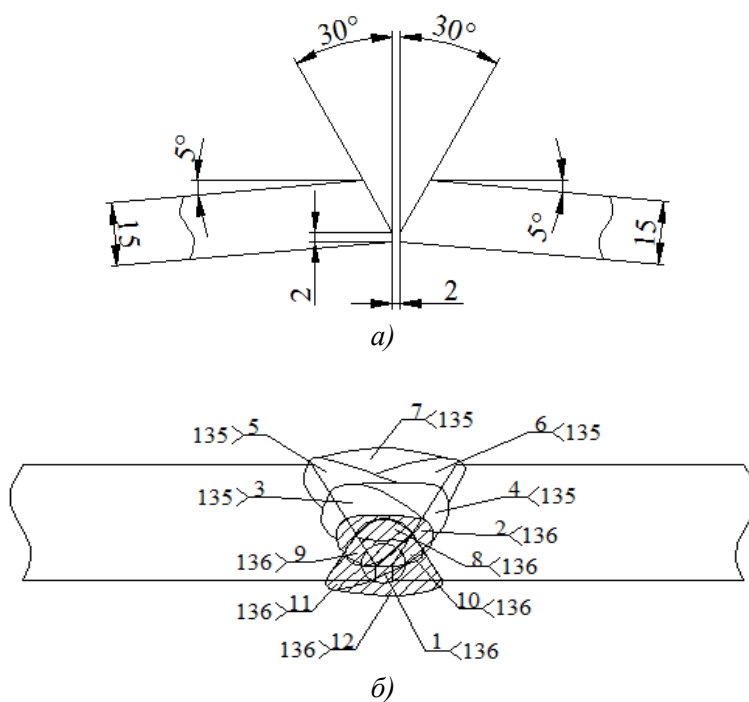
4.5. Пето експериментално испитивање – технологија МАГ/МАГ са коренским пролазима у заштити гасова $\text{Ar} + 18\% \text{CO}_2$

Друга комбинација МАГ/МАГ технологије са пуњеном жицом A7 - FD пречника 1,2 mm (коренски пролаз) израђена је у заштитној атмосфери $\text{Ar} + 18\% \text{CO}_2$, а за пролазе попуне коришћена је пуна жица MIG 75 пречника 1,2 mm у заштити мешавине гасова $\text{Ar} + 18\% \text{CO}_2$. За време заваривања изведено је предгревање гасним грејачима на температуру $T_p = 200^\circ\text{C}$, а температура међупролаза (interpass) одржавана је у интервалу од $200 \div 225^\circ\text{C}$. Контрола ових температура мерена је бесконтактним термометром.

Припрема жлебова (слика 4.34.), плоча за заваривање, извршена је машинским путем на глодалици. Пре почетка заваривања плоче су постављене под углом у циљу смањења деформација које настају при заваривању услед унете количине топлоте. Параметри заваривања (табела 4.35.) који су коришћени одабрани су тако да је унета количина енергије у препорученим границама.

Табела 4.35. Параметри заваривања

Завар број	Додатни материјал / пречник - / mm	I A	U V	t_{zav} s	v_{zav} cm/s	q_1 kJ/cm
1.	A7-FD / 1,2 (Ar/CO ₂ =82/18%)	145	27	48	0,73	4,568
2.	A7-FD / 1,2 (Ar/CO ₂ =82/18%)	145	27	47	0,74	4,497
3.	MIG 75 / 1,2 (Ar/CO ₂ =82/18%)	245	25	38	0,92	4,993
4.	MIG 75 / 1,2 (Ar/CO ₂ =82/18%)	245	25	44	0,8	5,742
5.	MIG 75 / 1,2 (Ar/CO ₂ =82/18%)	245	25	53	0,66	6,96
6.	MIG 75 / 1,2 (Ar/CO ₂ =82/18%)	245	25	41	0,85	5,404
7.	MIG 75 / 1,2 (Ar/CO ₂ =82/18%)	245	25	89	0,39	11,779
8.	A7-FD / 1,2 (Ar/CO ₂ =82/18%)	145	27	49	0,71	4,687
9.	A7-FD / 1,2 (Ar/CO ₂ =82/18%)	145	27	39	0,9	3,697
10.	A7-FD / 1,2 (Ar/CO ₂ =82/18%)	145	27	34	1,03	3,231
11.	A7FD / 1,2 (Ar/CO ₂ =82/18%)	145	27	54	0,65	5,12
12.	A7FD / 1,2 (Ar/CO ₂ =82/18%)	145	27	48	0,73	4,558



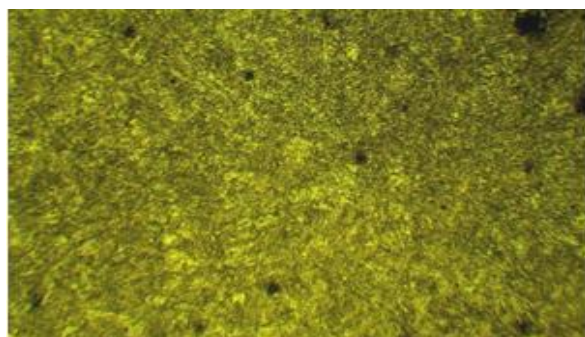
Слика 4.34. Припрема плоча за заваривање а) и распоред пролаза б)

4.5.1. Испитивање макроструктуре

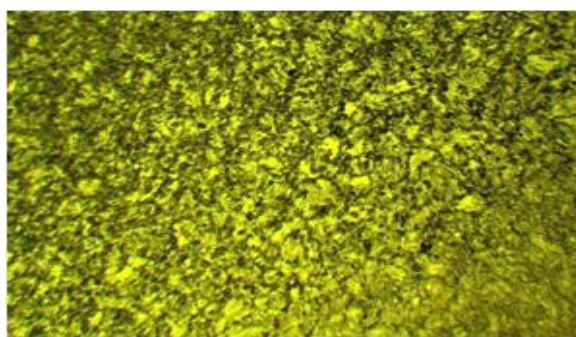
Макропрегледом пресека завареног споја нису откривене грешке типа укључака, прслина и непроварених места, односно узорци су у потпуности у складу са стандардом SRPS EN 5817. Метода испитивања је сагласна стандарду SRPS EN 1321.

4.5.2. Испитивање микроструктуре

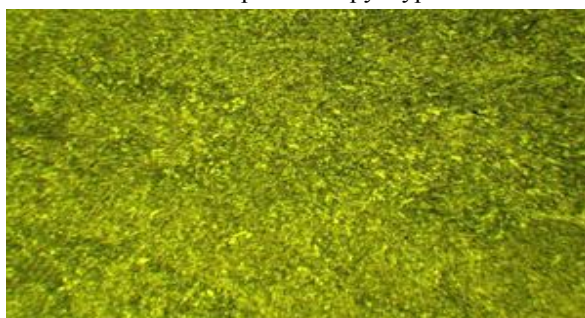
Испитивање микроструктуре код ове технологије рађено је светлосним микроскопом са увећањем $200\times$ у свим карактеристичним зонама на једном узорку (слика 4.35.).



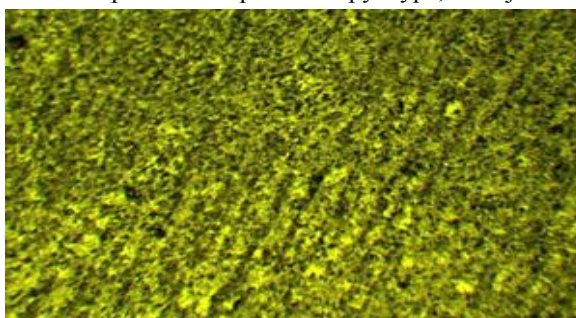
ОМ - сорбитна структура



ЗУТ - сорбитно - перлитна структура, линија I - I



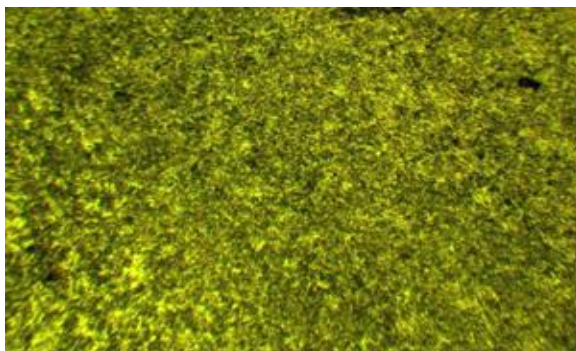
МШ - међуфазна структура, линија I - I



ЗУТ - сорбитно - перлитна структура линија II-II



МШ - међуфазна структура, линија II - II



ЗУТ - сорбитно - перлитна структура
линија III-III

Слика 4.35. Микроструктурно испитивање ($200\times$)

4.5.3. Мерење тврдоће

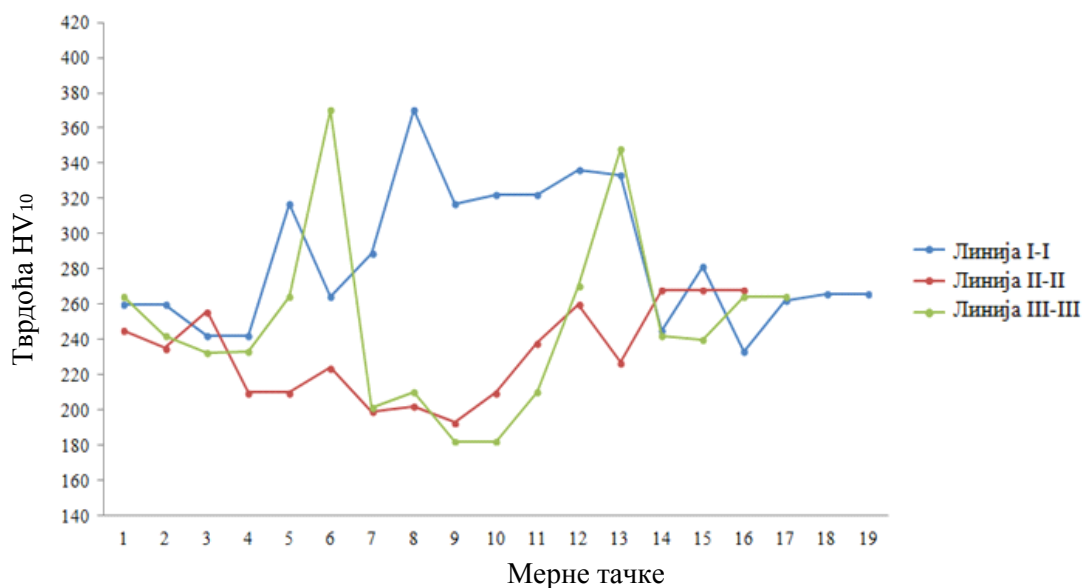
Мерење тврдоће рађено је на једном узорку у три линије са двадесет тачака (слика 4.36.). Тврдоћа је мерена методом Викерс. Резултати мерења тврдоће приказани су у табели 4.36. и на сликама 4.37. и 4.38.

Табела 4.36. Вредности тврдоће узорка измерене методом Викерс (HV_{10})

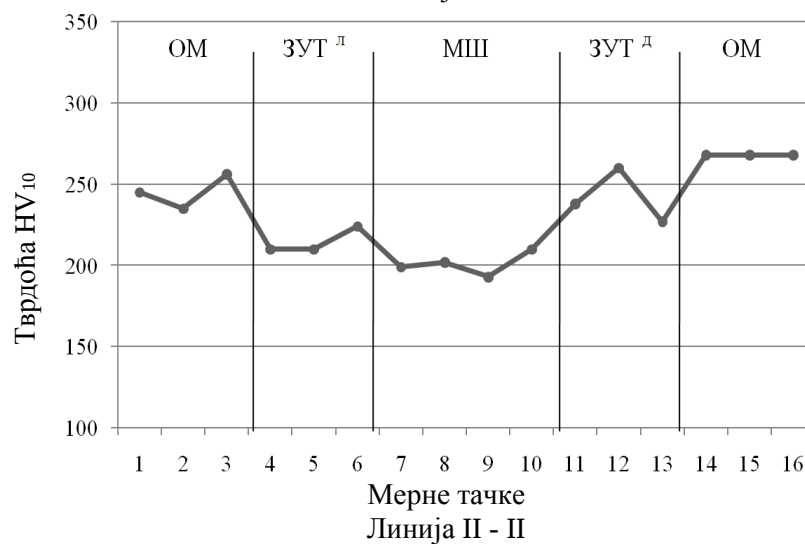
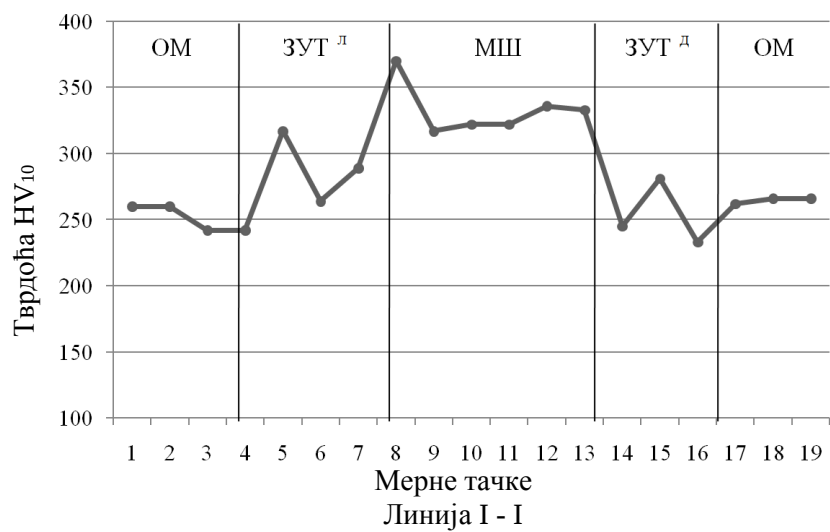
Број мерне тачке		Технологија МАГ/МАГ				
		I-I		II-II		III-III
1	260	ОМ	245	ОМ	264	ОМ
2	260		235		242	
3	242		256		232	
4	242	ЗУТ	210	ЗУТ	233	ЗУТ
5	317		210		264	
6	264		224		370	
7	289	МШ	199	МШ	201	МШ
8	370		202		210	
9	317		193		182	
10	322	ЗУТ	210	ЗУТ	182	ЗУТ
11	322		238		210	
12	336		260		270	
13	333	ОМ	227	ОМ	348	ОМ
14	245		268		242	
15	281		268		240	
16	233	ОМ	-	ОМ	264	ОМ
17	262		-		264	
18	266		-		-	
19	266		-		-	



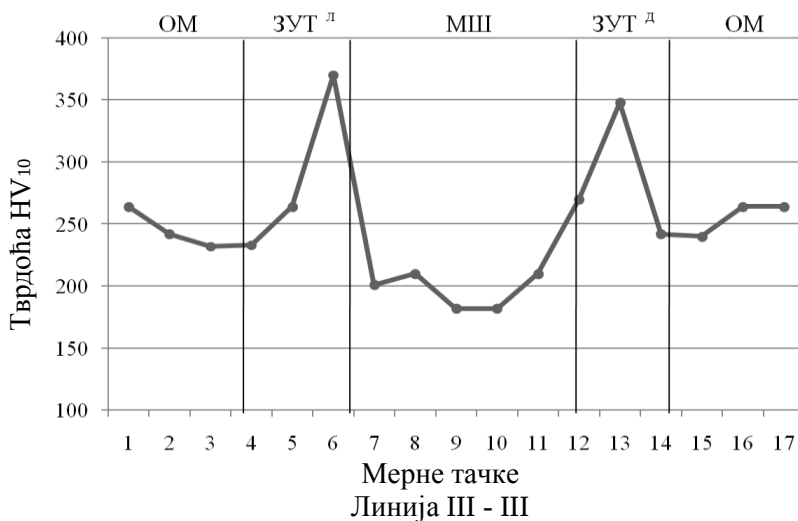
Слика 4.36. Металографски узорак за испитивање макроструктуре и мерење тврдоће



Слика 4.37. Збирни дијаграм расподеле тврдоће



Слика 4.38. Дијаграми расподеле тврдоће / I



Слика 4.38. Дијаграми расподеле тврдоће / 2

4.5.4. Одређивање ударне жилавости

Одређивање енергије лома и ударне жилавости изведено је на собној температури и то: на лицу шава-средина, лицу шава-линија стапања, лицу шава-ЗУТ, корен шава-средина, корен шава-линија стапања и корен шава-ЗУТ по три узорка. Вредности енергије лома и ударне жилавости приказане су у табелама 4.37. до 4.42.

Табела 4.37. Енергија лома и ударна жилавост лица шава-средина на собној температури

Челик	Температура °C	Број узорка	Енергија иницијације J	Енергија ширења J	Енергија лома J	Ударна жилавост J/cm ²	Жилав лом %
S690 QL	+20	1.	18,43	17,05	35,49	44,36	53,60
		2.	19,40	16,46	35,86	44,82	35,06
		3.	26,94	14,21	41,15	51,43	42,83

Табела 4.38. Енергија лома и ударна жилавост лица шава-линија стапања на собној температури

Челик	Температура °C	Број узорка	Енергија иницијације J	Енергија ширења J	Енергија лома J	Ударна жилавост J/cm ²	Жилав лом %
S690 QL	+20	1.	32,98	190,19	223,18	278,97	97,09
		2.	41,66	210,03	251,68	314,61	99,38
		3.	37,44	213,90	251,33	314,17	99,41

Табела 4.39. Енергија лома и ударна жилавост лица шава-ЗУТ на собној температури

Челик	Температура °C	Број узорка	Енергија иницијације J	Енергија ширења J	Енергија лома J	Ударна жилавост J/cm ²	Жилав лом %
S690 QL	+20	1.	58,19	180,00	238,20	297,74	99,01
		2.	33,23	192,44	225,67	282,09	99,46
		3.	33,41	202,45	235,86	294,82	99,81

Табела 4.40. Енергија лома и ударна жилавост корена шава-средина на собној температури

Челик	Температура °C	Број узорка	Енергија иницијације J	Енергија ширења J	Енергија лома J	Ударна жилавост J/cm ²	Жилав лом %
S690 QL	+20	1.	21,50	31,16	52,67	65,83	13,18
		2.	21,25	29,99	51,24	64,05	16,73
		3.	22,50	31,60	54,10	67,63	20,62

Табела 4.41. Енергија лома и ударна жилавост корена шава-линија стапања на собној температури

Челик	Температура °C	Број узорка	Енергија иницијације J	Енергија ширења J	Енергија лома J	Ударна жилавост J/cm ²	Жилав лом %
S690 QL	+20	1.	56,23	126,16	182,39	227,98	99,45
		2.	64,76	113,96	178,72	223,39	99,06
		3.	49,91	137,18	187,09	233,86	98,64

Табела 4.42. Енергија лома и ударна жилавост корена шава-ЗУТ на собној температури

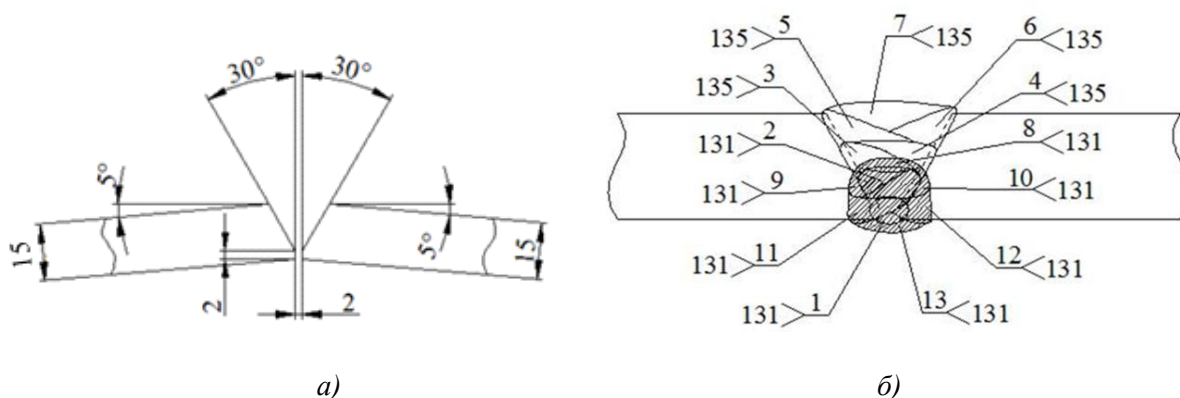
Челик	Температура °C	Број узорка	Енергија иницијације J	Енергија ширења J	Енергија лома J	Ударна жилавост J/cm ²	Жилав лом %
S690 QL	+20	1.	69,77	222,64	292,42	365,52	99,27
		2.	70,61	139,34	209,96	262,45	98,94
		3.	59,01	136,77	195,78	244,72	98,56

4.5.5. Испитивање затезањем

Испитивање затезањем није рађено.

4.6. Шесто експериментално испитивање – технологија МИГ/МАГ са коренским пролазима у заштити 97,5% Ar + 2,5% CO₂

Припремљене плоче заварене су коришћењем МИГ/МАГ технологије са пуњеном жицом А7 – FD пречника 1,2 mm (коренски пролаз) у заштитној атмосфери 97,5%/2,5% – Ar/CO₂, (M11 – EN 14175), а за пролазе попуне коришћена је пуна жица МИГ 75 пречника 1,2 mm у заштити мешавине Ar + 18% CO₂.



Слика 4.39. Припрема плоча за заваривање а) и распоред пролаза б)

Табела 4.43. Параметри заваривања

Завар број	Поступак	Додатни материјал / пречник - / mm	Струја А	Напон V	Брзина заваривања cm/min	Погонска енергија kJ/cm
1.	131	A7 – FD / 1,2	175	27	0,484	8,06
2.	131	A7 – FD / 1,2	170	27	0,597	6,54
3.	135	MIG 75 / 1,2	245	25	0,742	6,19
4.	135	MIG 75 / 1,2	248	25	0,630	7,38
5.	135	MIG 75 / 1,2	252	25	0,667	7,08
6.	135	MIG 75 / 1,2	255	25	0,730	6,55
7.	135	MIG 75 / 1,2	235	25	0,676	6,52
8.	131	A7 – FD / 1,2	175	27	1,045	3,84
9.	131	A7 – FD / 1,2	170	27	1,122	3,48
10.	131	A7 – FD / 1,2	180	27	0,868	4,76
11.	131	A7 – FD / 1,2	285	27	0,687	9,52
12.	131	A7 – FD / 1,2	285	27	0,821	7,97
13.	131	A7 – FD / 1,2	270	25	0,719	7,98

За време заваривања изведено је предгревање гасним грејачем на температуру $T_p = 200^\circ\text{C}$, а температура међупролаза одржавана је у интервалу од $200 \div 225^\circ\text{C}$. Контрола ових температура вршена је бесконтактним термометром.

Припрема жлеба плоча извршена је машинским путем на глодалици. Пре почетка заваривања плоче су постављене под углом (слика 4.39.) у циљу смањења деформација које настају при заваривању услед унете количине топлоте. Параметри заваривања (табела 4.43.) који су коришћени одабрани су тако да је унета количина енергије у препорученим границама.

За коренски пролаз коришћен је додатни материјал према стандарду: EN ISO 17633 – A: 2006: T 18 8 Mn R M 3 и AWS A5.22 – 10: E307T0 – G, рутилно пуњена жица, трговачког назива A7 – FD, произвођач BÖHLER. Коришћена пуњена жица имала је пречник 1,2 mm.

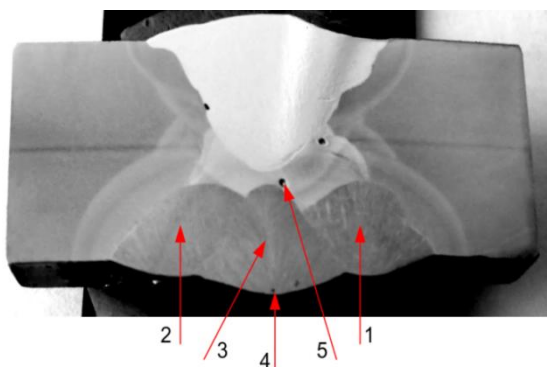
Хемијски састав и механичке карактеристике додатног материјала дати су у предходним поглављима.

4.6.1. Испитивање макроструктуре

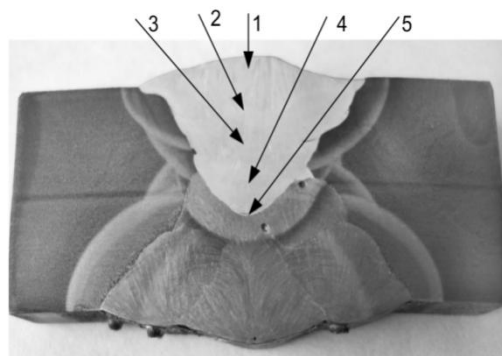
Макропрегледом пресека завареног споја откривене су грешке типа гасних мехура, односно узорци нису у складу са стандардом SRPS EN 5817. Метода испитивања је сагласна стандарду SRPS EN 1321.

4.6.2. Испитивање микроструктуре

На узорцима за испитивање макроструктуре и тврдоће (слике 4.40. и 4.41.), рађено је и испитивање микроструктуре. Означена места представљају места фотографисања изгледа микроструктуре завареног споја.

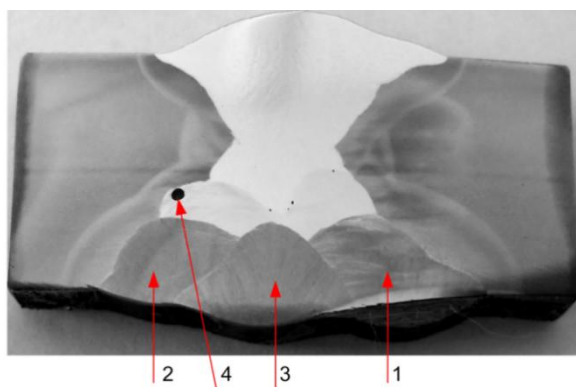


а) нагрижен раствором нитала

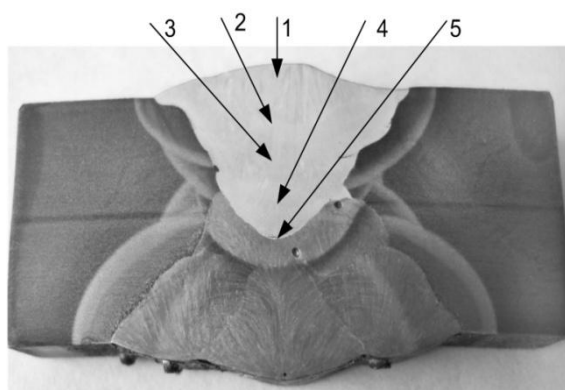


б) нагрижен раствором пикрала

Слика 4.40. Узорак за испитивање микроструктуре 1

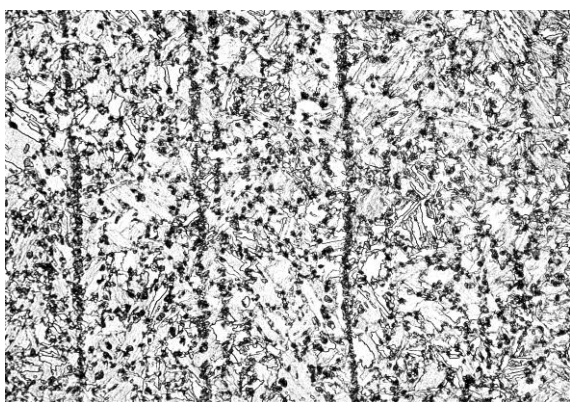


а) нагрижен раствором нитала

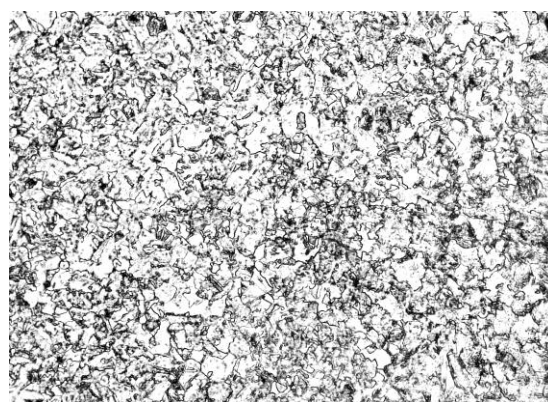


б) нагрижен раствором пикрала

Слика 4.41. Узорак за испитивање микроструктуре 2



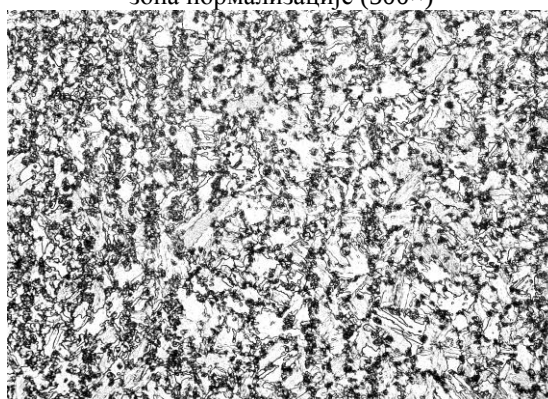
ЗУТ - феритно-перлитно-бејнитна структура, зона непотпуне нормализације (200×)



ЗУТ - ситнозрна феритно-бејнитна структура, зона нормализације (500×)

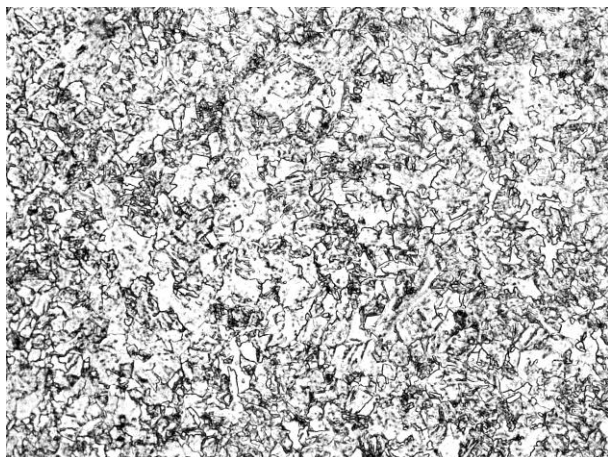


ЗУТ - крупнозрна структура, трагови бејнита, зона прегревања (200×)



ЗУТ - феритно-перлитно-бејнитна структура, зона непотпуне нормализације (200×)

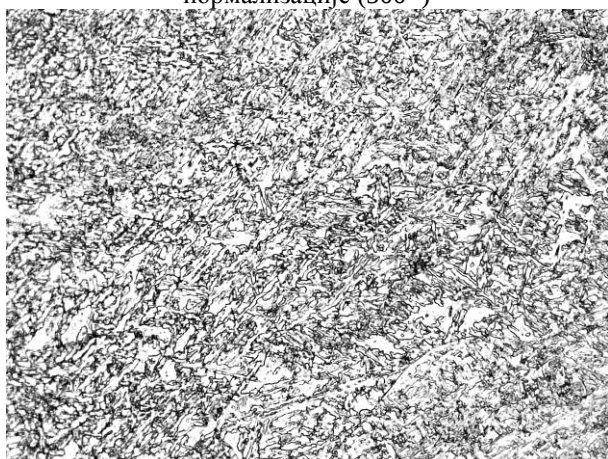
Слика 4.42. Микроструктурно испитивање, узорак 1 / 1



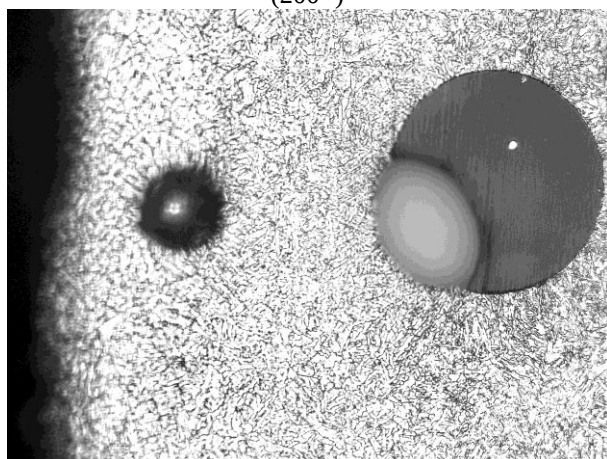
ЗУТ - ситнозрна феритно-бејнитна структура, зона нормализације (500×)



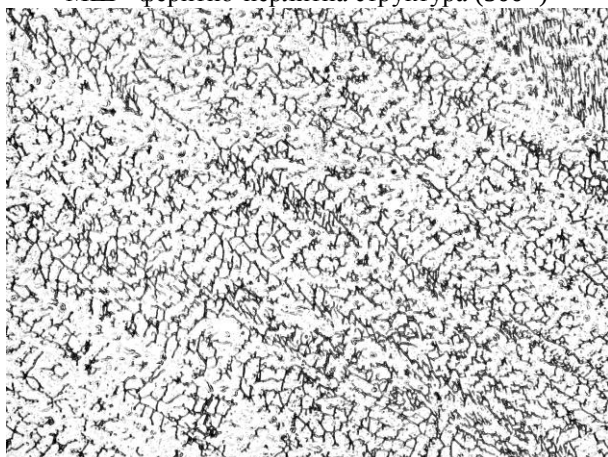
ЗУТ - бејнитна структура (200×)



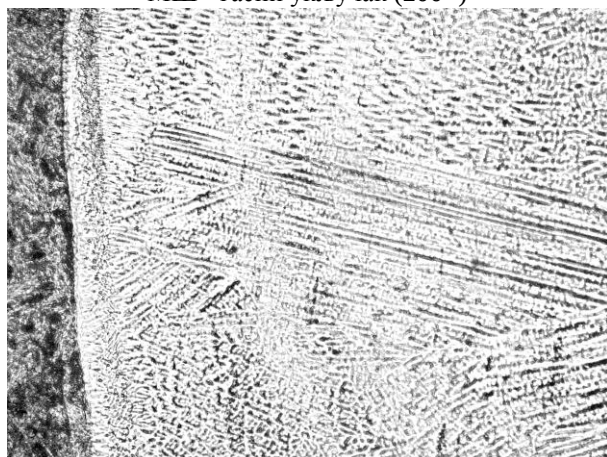
МШ - феритно-перлитна структура (500×)



МШ - гасни укључак (200×)



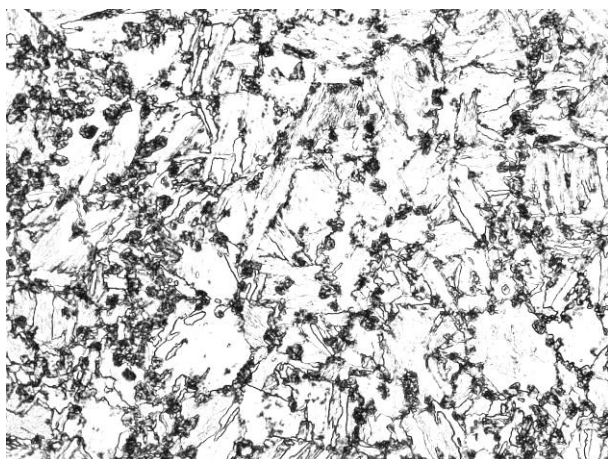
МШ - аустенитна структура (200×)



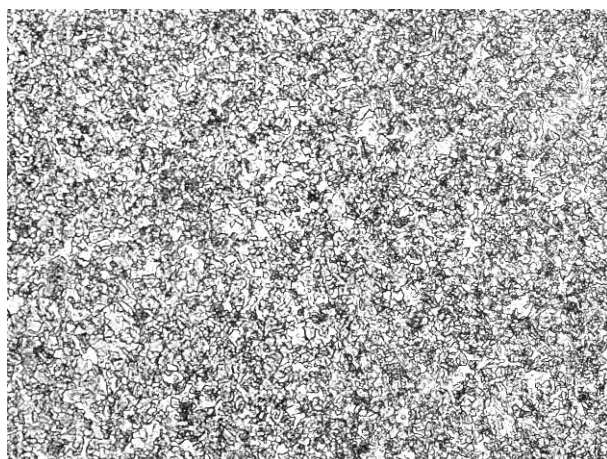
МШ - Зона стапања - аустенитна структура (200×)

Слика 4.42. Микроструктурно испитивање, узорак 1 / 2

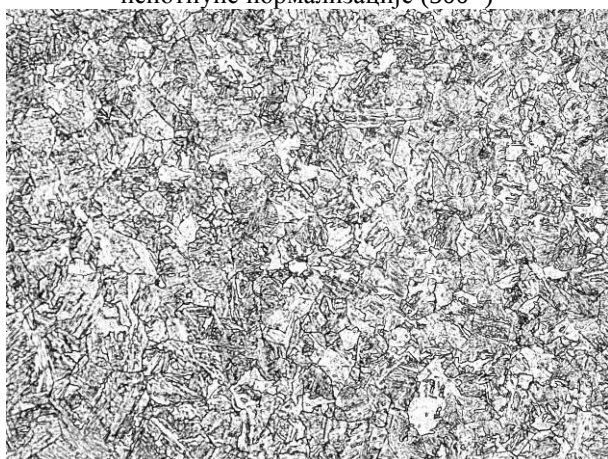
Испитивање микроструктуре код ове технологије рађено је светлосним микроскопом са увећањем 200x и 500x у свим карактеристичним зонама на два узорка (слике 4.42. и 4.43.).



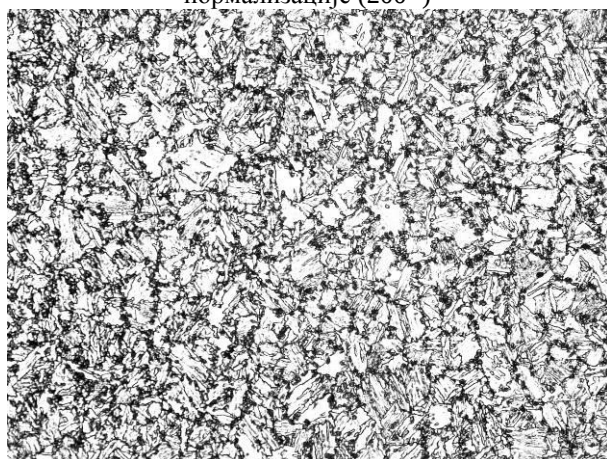
ЗУТ - феритно-перлитно-бејнитна структура, зона непотпуне нормализације (500×)



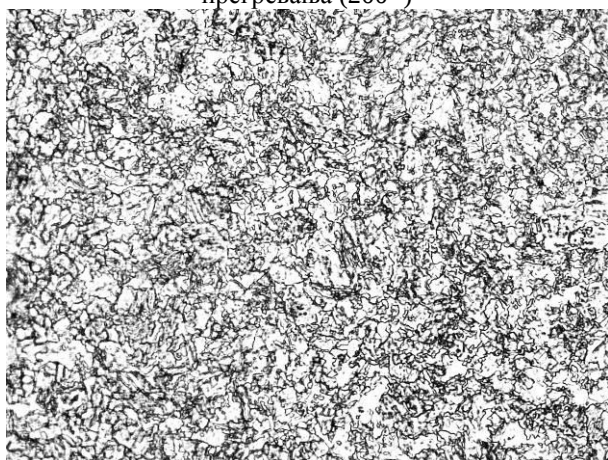
ЗУТ - ситнозрна феритно-бејнитна структура, зона нормализације (200×)



ЗУТ - крупнозрна структура, трагови бејнита, зона прегревања (200×)



ЗУТ - феритно-перлитно-бејнитна структура, зона непотпуне нормализације (200×)

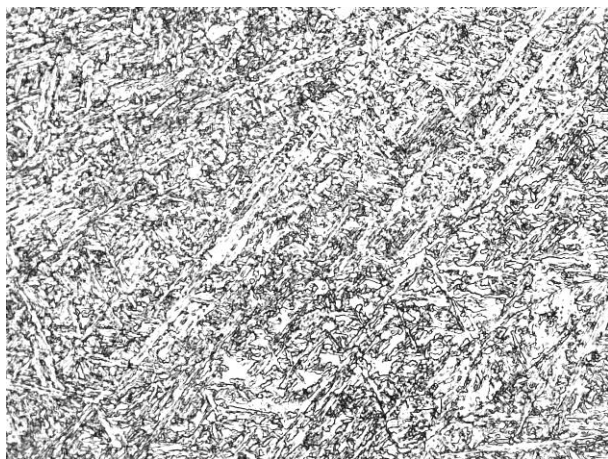


ЗУТ - ситнозрна феритно-бејнитна структура, зона нормализације (500×)

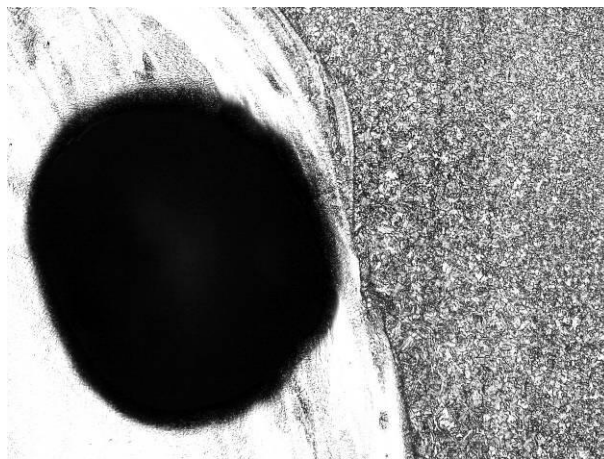


ЗУТ - бејнитна структура (200×)

Слика 4.43. Микроструктурно испитивање, узорак 2 / 1



МШ - феритно-перлитна структура (500×)



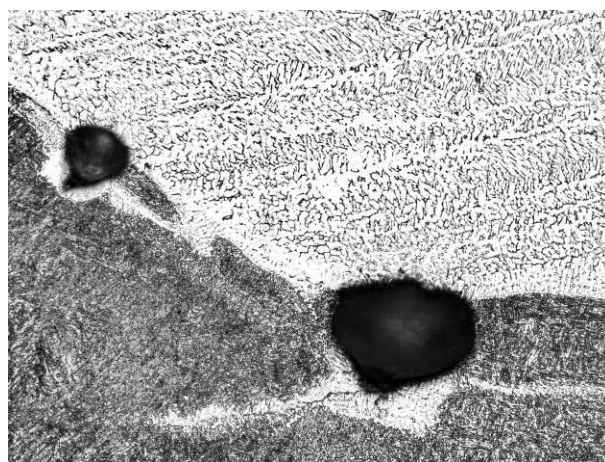
МШ - гасни укључак (50×)



МШ - аустенитна структура (500×)



МШ - Зона стапања - аустенитна структура (200×)



МШ - гасни укључак (200×)

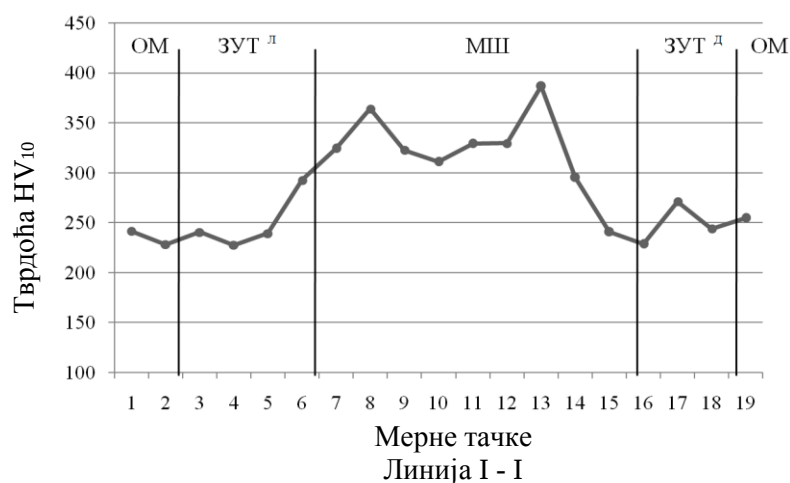
Слика 4.43. Микроструктурно испитивање, узорак 2 / 2

4.6.3. Мерење тврдоће

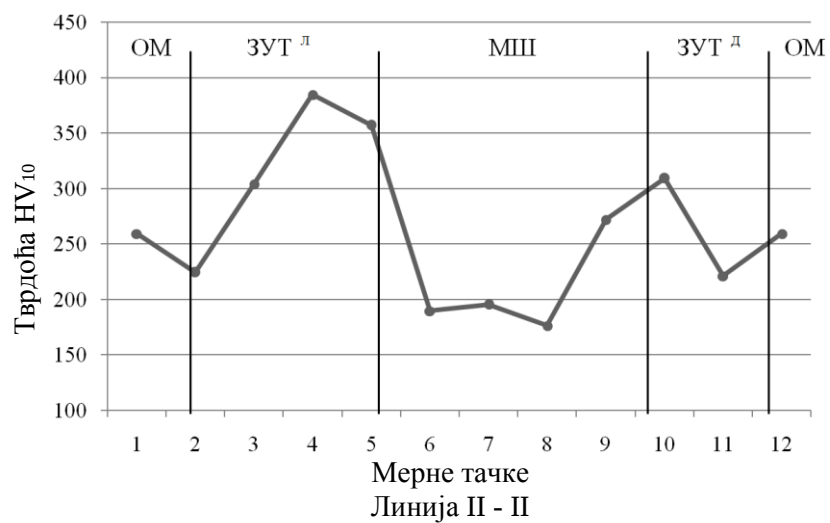
Мерење тврдоће извршено је на два узорка у две линије са по деветнаест и дванаест мерних тачака на првом узорку и петнаест и једанаест мерних тачака на другом узорку, табела 4.44. Тврдоћа је мерена методом Викерс. Вредности тврдоће у мерним тачкама приказани су на сликама 4.44. и 4.45.

Табела 4.44. Вредности тврдоће узорка измерене методом Викерс (HV_{10})

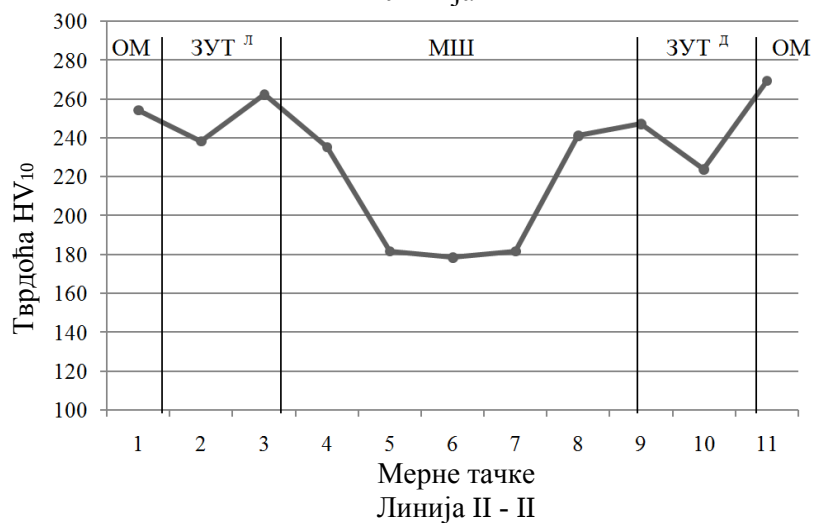
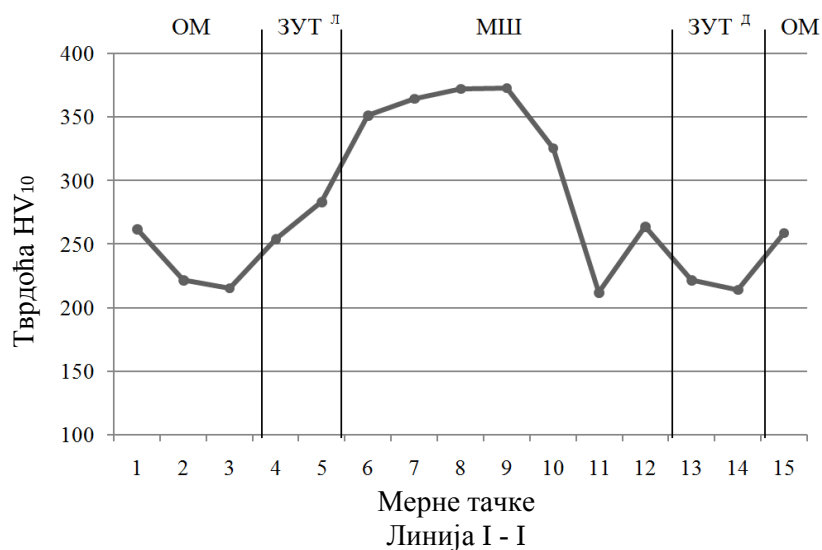
Број мерне тачке	Технологија МИГ/МАГ							
	Узорак 1				Узорак 2			
	I-I		II-II		I-I		II-II	
1.	241,6	ОМ	259,4	ОМ	262,1	ОМ	254,5	ОМ
2.	228,3		224,6		221,8		238,5	
3.	240,5	ЗУТ	-	ЗУТ	215,6	ЗУТ	262,5	ЗУТ
4.	227,7		303,9		254,1		235,5	
5.	239,5		384,6		283,6		-	
6.	292,5	МШ	357,1	МШ	351,6	МШ	-	МШ
7.	324,3		-		-		-	
8.	364		189,7		364,7		181,8	
9.	322,7		195,4		372,5		178,5	
10.	311		176,5		373,1		181,8	
11.	329,2		-		325,9		-	
12.	329,4	ЗУТ	-	ЗУТ	-	ЗУТ	-	ЗУТ
13.	386,7		-		-		-	
14.	295,3		-		-		-	
15.	240,9	ОМ	-	ОМ	211,9	ОМ	-	ОМ
16.	228,7		272,1		264		241,2	
17.	271,2	ЗУТ	309,3	ЗУТ	221,8	ЗУТ	247,2	ЗУТ
18.	244		221,2		214,4		224	
19.	254,8		259,2		259		269,6	



Слика 4.44. Дијаграм расподеле тврдоће, узорак 1 / 1



Слика 4.44. Дијаграм расподеле тврдоће, узорак 1 / 2



Слика 4.45. Дијаграм расподеле тврдоће, узорак 2

4.6.4. Одређивање ударне жилавости

Одређивање енергије лома и ударне жилавости изведено је на собној температури и то: на лицу шава-средина, лицу шава-линија стапања, лицу шава-ЗУТ, корен шава-средина, корен шава-линија стапања и корен шава-ЗУТ по три узорка. Вредности енергије лома и ударне жилавости приказани су у табелама 4.45. до 4.50.

Табела 4.45. Енергија лома и ударна жилавост лица шава средина на собној температури

Врста материјала	Температура °C	Број узорка	Енергија иницијације J	Енергија ширења J	Енергија лома J	Ударна жилавост J/cm ²	Жилав лом %
S690 QL	+20	1.	10,10	36,62	46,71	58,39	14,59
		2.	11,42	28,67	40,09	50,12	31,14
		3.	12,90	18,93	31,84	39,80	31,85

Табела 4.46. Енергија лома и ударна жилавост лица шава линија стапања на собној температури

Врста материјала	Температура °C	Број узорка	Енергија иницијације J	Енергија ширења J	Енергија лома J	Ударна жилавост J/cm ²	Жилав лом %
S690 QL	+20	1.	30,84	215,46	246,30	307,87	38,23
		2.	28,96	195,78	224,74	280,92	37,12
		3.	33,77	201,89	235,66	294,58	49,98

Табела 4.47. Енергија лома и ударна жилавост лица шава ЗУТ на собној температури

Врста материјала	Температура °C	Број узорка	Енергија иницијације J	Енергија ширења J	Енергија лома J	Ударна жилавост J/cm ²	Жилав лом %
S690 QL	+20	1.	20,94	223,24	244,18	305,22	38,03
		2.	28,96	199,38	228,35	285,43	32,49
		3.	29,86	220,59	250,45	313,06	48,97

Табела 4.48. Енергија лома и ударна жилавост корена шава средина на собној температури

Врста материјала	Температура °C	Број узорка	Енергија иницијације J	Енергија ширења J	Енергија лома J	Ударна жилавост J/cm ²	Жилав лом %
S690 QL	+20	1.	21,97	31,42	52,38	66,73	10,08
		2.	21,36	39,87	61,23	76,54	10,12
		3.	21,16	36,79	57,95	72,44	8,42

Табела 4.49. Енергија лома и ударна жилавост корена шава линија стапања на собној температури

Врста материјала	Температура °C	Број узорка	Енергија иницијације J	Енергија ширења J	Енергија лома J	Ударна жилавост J/cm ²	Жилав лом %
S690 QL	+20	1.	54,54	128,55	183,09	228,87	24,55
		2.	52,46	107,50	159,96	199,95	18,21
		3.	40,24	154,85	195,09	243,86	16,64

Табела 4.50. Енергија лома и ударна жилавост корена шава ЗУТ на собној температури

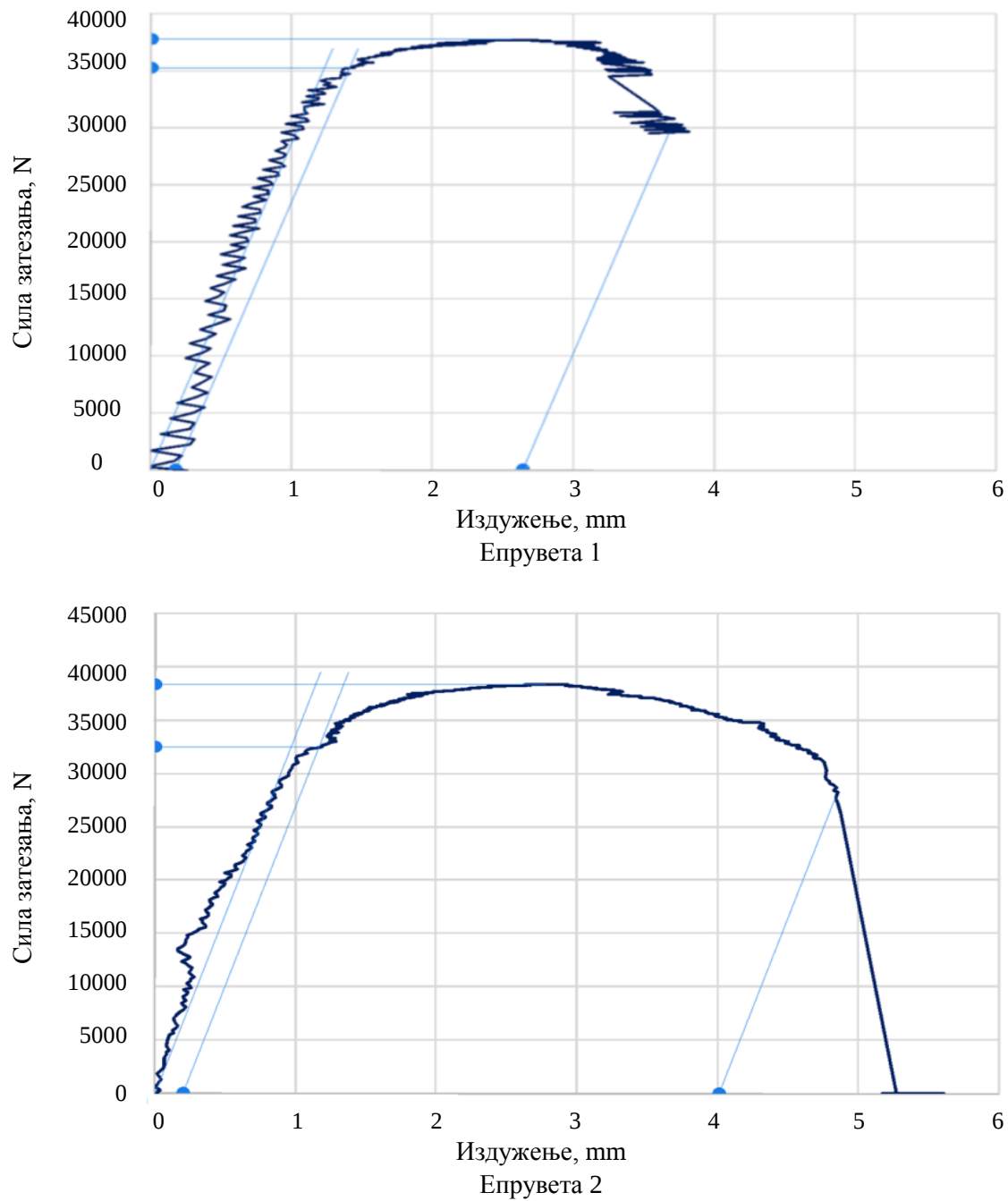
Врста материјала	Температура °C	Број узорка	Енергија иницијације J	Енергија ширења J	Енергија лома J	Ударна жилавост J/cm ²	Жилав лом %
S690 QL	+20	1.	71,05	159,73	230,78	288,48	41,83
		2.	61,93	151,20	213,13	266,42	34,75
		3.	59,14	158,32	217,46	271,82	37,87

4.6.5. Испитивање затезањем

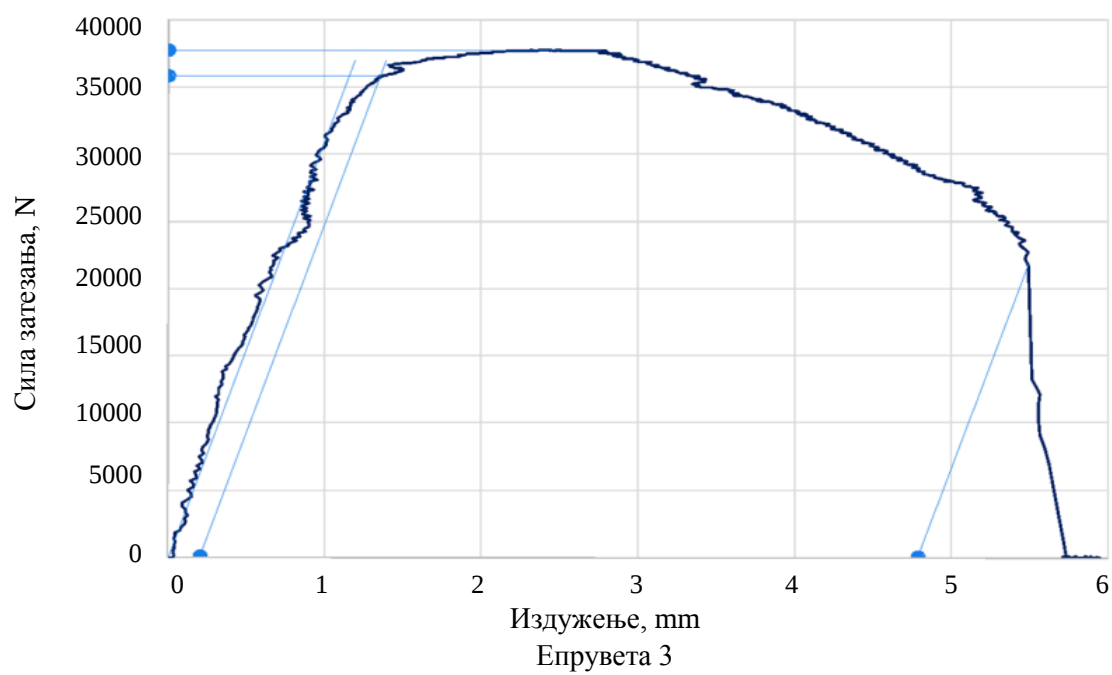
Испитивање затезањем завареног споја извршено је на три узорка (слика 4.46.), а резултати су приказани у табели 4.51.

Табела 4.51. Експериментални резултати испитивања затезањем

Број епрувете	l_0 , mm	S_0 , mm ²	$R_{p0,2}$, MPa	R_m , MPa	$A_{11,3}$, %
1.	89,35	50,25	700,89	751,23	2,97
2.	89,17	49,76	693,94	763,23	4,49
3.	89,40	50,28	712,01	754,55	5,37



Слика 4.46. Дијаграми затезања за три епрувете / 1



Слика 4.46. Дијаграми затезања за три епрувете / 2

5. КОМЕНТАР ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ ИСПИТИВАЊА ЗАВАРЉИВОСТИ ЧЕЛИКА S690 QL

Експериментална испитивања су изведена у циљу избора најповољније технологије заваривања уз услов да конструкција буде отпорна на ударна оптерећења. У претходном поглављу приказани су резултати испитивања заварених спојева технологијама РЕЛ/МАГ, МАГ/МАГ и МИГ/МАГ. У првом експерименталном испитивању дати су резултати за основни материјал.

5.1. Основни материјал

Измерена тврдоћа основног материјала (S690 QL) у испитивању узорка изведених РЕЛ/МАГ технологијом са седам пролаза првог узорка кретала се од 260 (линија I – I, тачке 1, 2 и 3) – 281 HV (линија II – II, тачка 4). Код другог узорка кретала се од 258 (линија II – II, тачка 16) – 281 HV (линија I – I, тачка 1, линија II – II, тачка 17 и линија III – III, тачка 18, табела 4.14.).

Измерена тврдоћа основног материјала при испитивању узорка изведених РЕЛ/МАГ технологијом са осамнаест пролаза кретала се од 222 (линија III – III, тачка 18) – 270 HV (линија II – II и III – III, тачка 3, табела 4.20.).

Измерена тврдоћа основног материјала при испитивању узорка изведених МАГ/МАГ технологијом са коренским пролазима у заштити CO₂ код првог узорка кретала се од 264 (линија I – I, тачка 17) – 287 HV (линија I – I, тачка 1 и линија II – II, тачка 19). Код другог узорка кретала се од 276 (вредност седам тачака у ОМ) – 292 HV (линија I – I, тачка 18, табела 4.30.).

Измерена тврдоћа основног материјала при испитивању узорка изведених МАГ/МАГ технологијом са коренским пролазима у заштити гасова Ar + 18 % CO₂ кретала се од 232 (линија III – III, тачка 3) – 268 HV (линија II – II, тачке 14, 15 и 16, табела 4.36.).

Измерена тврдоћа основног материјала при испитивању узорка изведених МИГ/МАГ технологијом кретала се од 214 (узорак 2, линија I – I, тачка 18) – 270 HV (узорак 2, линија II – II, тачка 19).

Разлика између енергије ширења и енергије иницијације код основног материјала износила је од 113 – 147 J на собној температури (табела 5.1.).

Табела 5.1. Разлика између енергије ширења и енергије иницијације код основног материјала

Место испитивања	Енергија иницијације, J	Енергија ширења, J	Разлика, J (е.ш. - е.и.)
Основни материјал на 20 °C	51,87	183,30	131,43
	53,45	168,99	115,54
	43,79	190,88	147,09
	55,59	168,43	112,84
	53,61	172,58	118,97
	52,34	198,55	146,21

Измерена вредност енергије лома основног материјала на собној температури кретала се од 222 (табела 4.6.) – 251 J (табела 4.7.)

Измерена вредност енергије лома основног материјала на температури -40°C кретала се од 179 (табела 4.6.) – 238 J (табела 4.7.)

Вредност жилавог лома код ОМ на собној температури кретала се од 91,04 – 96,02 % (табела 4.6.), а на температури -40°C од 78,50 (табела 4.6.) – 95,70 % (табела 4.7.).

Код основног материјала измерене вредности напона на граници течења ($R_{p0,2}$) кретале су се од 782 – 812 МПа (табела 4.8.).

Напон на граници кидања (затезна чврстоћа) измерен код основног материјала износио је од 797 – 842 МПа (табела 4.8.).

Измерено издужење $A_{11,3}$ код основног материјала било је од 9,98 – 14,19 % (табела 4.8.).

5.2. Технологија РЕЛ/МАГ са седам пролаза

Испитивањем микроструктуре је установљено да узорак има мартензитно-бејнитну структуру, лице метала шава феритно-мартензитну структуру са карбидима, а корен метала шава има аустенитно-феритну структуру са излученим финим карбидима. Изостанком последњег пролаза по средини шава са стране лица и са стране корена дошло је до укрупњавања зрна што је уочено испитивањем микроструктуре.

Код РЕЛ / МАГ технологије у металу шава измерене вредности тврдоће кретале су се од 166 (узорак 1, линија III-III, тачка 11) – 390 HV (узорак 2, линија I – I, тачка 11), а у ЗУТ-у вредност тврдоће кретала се од 236 (узорак 2, линија II-II, тачка 15) – 351 HV (узорак 2, линија I – I, тачка 17, табела 4.14.).

Табела 5.2. Разлика између енергије ширења и енергије иницијације

Место испитивања	Енергија иницијације, J	Енергија ширења, J	Разлика, J (е.ш. - е.и.)
Корен шава – средина	21,08	9,59	-11,49
	15,48	11,85	-3,63
	14,77	30,26	15,49
	14,52	11,60	-2,92
Корен шава – линија стапања	15,53	34,99	19,46
	8,41	19,88	11,47
	19,41	15,43	-3,98
	13,28	21,38	8,10
	17,82	17,12	-0,70
Лице шава – средина	34,63	9,92	-24,71
	32,09	19,96	-12,13
	27,15	20,16	-6,99
	33,05	16,16	-16,89
	24,58	11,37	-13,21

Код ове технологије у корену шава је мања енергија ширења од енергије иницијације, на линији стапања тај однос се мења у корист енергије ширења, док на лицу шава опет добија негативне вредности (табела 5.2.).

Енергија лома код лица шава средина кретала се од 36 – 52 J (табела 4.15.). Енергија лома у корену шава – средина, на собној температури, се кретала од 26 – 45 J (табела 4.16.), а у корену шава на линији стапања од 28 – 50 J (табела 4.17.).

Вредност жилавог лома код лица шава средина кретала се од 1,08 – 13,58 % (табела 4.15.). Вредност жилавог лома у корену шава – средина кретала се од 0,64 – 27,53 % (табела 4.16.), а у корену шава на линији стапања од 2,34 – 21,67 % (табела 4.17.).

Средње вредности ударне жилавости дате су у табели 5.3.

Табела 5.3. Средње вредности ударне жилавости

Место испитивања	Средња вредност ударне жилавости, J
Корен шава	40,36
Корен шава - линија стапања	45,81
Лице шава	57,27

Код завареног споја добијене вредности $R_{p0,2}$ су се кретале у границама од 740 – 809 МПа (табела 4.18.).

Напон на граници кидања R_m је од 804 – 840 МПа (табела 4.18.).

Измерено издужење $A_{11,3}$ било је од 5,38 – 11,30% (табела 4.18.).

5.3. Технологија РЕЛ/МАГ са осамнаест пролаза

Макроструктурно испитивање јасно указује на издвојене зоне које су заварене различитим додатним материјалима. Линија I – I пролази кроз део шава који је заварен пуном, „јаком“, жицом, а линије II – II и III – III кроз део шава који је заварен „меким“, нерђајућим додатним материјалом.

Анализа микроструктуре је извршена по правцима у којима су мерене тврдоће и то у основном материјалу, ЗУТ-у и металу шава.

У металу шава добијена вредност тврдоће кретала се од 216 (линија III-III, тачка 10) – 339 HV (линија I – I, тачка 13). У ЗУТ-у вредност тврдоће кретала се од 203 (линија II-II, тачка 5) – 360 HV (линија III-III, тачка 14, табела 4.20.).

Разлика између енергије ширења и енергије иницијације у корену и на лицу шава је најмања у средини, нешто већа на линији стапања, док највише вредности има у ЗУТ-у. (табела 5.4.).

Измерена енергија лома у корену шава – средина се кретала од 82 – 89 J (табела 4.24.). У корену шава на линији стапања од 182 – 192 J (табела 4.25.), а код корена шава у ЗУТ-у од 236 – 251 J (табела 4.26.).

Измерена енергија лома на лицу шава – средина кретала се од 24 – 45 J (табела 4.21.). На лицу шава на линији стапања од 143 – 159 J (табела 4.22.), а код лица шава у ЗУТ-у од 172 – 209 J (табела 4.23.).

Проценат жилавог лома кретао се у границама од 11,23 (табела 4.24.) – 99,58 % (табела 4.26.).

Табела 5.4. Разлика између енергије ширења и енергије иницијације

Место испитивања	Енергија иницијације, J	Енергија ширења, J	Разлика, J (е.ш. - е.и.)
Корен шава – средина	42,14	43,62	1,48
	37,82	51,63	13,81
	32,44	49,65	17,21
Корен шава – линија стапања	70,83	121,83	51,00
	58,71	123,56	64,85
	60,12	123,21	63,09
Корен шава – ЗУТ	75,74	160,61	84,87
	47,81	203,35	155,54
	78,39	163,73	85,34
Лице шава – средина	3,86	20,31	16,45
	13,36	32,17	18,81
	13,79	20,87	7,08
Лице шава – линија стапања	23,28	119,79	96,51
	22,04	120,97	98,93
	29,86	129,86	100,00
Лице шава – ЗУТ	45,68	143,51	97,83
	28,98	143,77	114,79
	48,48	161,25	112,77

Средње вредности ударне жилавости дате су у табели 5.5.

Табела 5.5. Средње вредности ударне жилавости

Место испитивања	Средња вредност ударне жилавости, J
Корен шава - средина	107,21
Корен шава - линија стапања	232,61
Корен шава - ЗУТ	304,01
Лице шава - средина	43,48
Лице шава - линија стапања	185,82
Лице шава - ЗУТ	238,2

5.4. Технологија МАГ/МАГ са коренским пролазима у заштити CO₂

Микроструктурним испитивањем је установљено да узорак има мартензитно-бејнитну структуру, лице метала шава феритно-мартензитну структуру са карбидима, а корен метала шава има аустенитно-феритну структуру са финим карбидима. Прегледом је уочено на појединим местима укрупњавање зрна проузроковано изостанком последњег пролаза по средини шава.

Код ове технологије у металу шава вредност тврдоће измерена је од 171 (узорак 2, линија III-III, тачка 9) – 405 HV (узорак 2, линија I – I, тачке 11 и 12). У ЗУТ-у код МАГ/МАГ технологије од 236 (узорак 2, линија II – II, тачка 13) – 387 HV (узорак 2, линија III-III, тачка 13, табела 4.30.).

У корену шава однос енергије ширења и енергије иницијације има негативне вредности (табела 5.6.).

Табела 5.6. Разлика између енергије ширења и енергије иницијације

Место испитивања	Енергија иницијације, J	Енергија ширења, J	Разлика, J (е.ш. - е.и.)
Корен шава – средина	3,59	13,36	9,77
	7,50	12,87	5,37
	9,07	8,58	-0,49
	9,13	6,19	-2,94
Корен шава – линија стапања	9,03	9,40	0,37
	8,12	17,83	9,71
	9,31	9,21	-0,10
	8,04	16,47	8,43
	15,71	14,07	-1,64
Лице шава – средина	15,45	9,81	-5,64
	20,81	9,42	-11,39
	15,96	8,88	-7,08
	14,80	11,49	-3,31
	25,15	10,15	-15,00

Енергија лома у корену шава – средина на собној температури кретала се од 15 – 20 J (табела 4.32.), а у корену шава на линији стапања од 18 – 29 J (табела 4.33.). Енергија лома лица шава – средина кретала се од 25 – 35 J (табела 4.31.).

Вредност жилавог лома у корену шава – средина кретала се од 0,53 – 13,55 % (табела 4.32.), а у корену шава на линији стапања од 5,42 – 21,80 % (табела 4.33.). Вредност жилавог лома код лица шава – средина кретала се од 2,90 – 10,89 % (табела 4.31.).

Средње вредности ударне жилавости дате су у табели 5.7.

Табела 5.7. Средње вредности ударне жилавости

Место испитивања	Средња вредност ударне жилавости, J
Корен шава	21,96
Корен шава - линија стапања	29,30
Лице шава	35,49

На овој плочи резултати напона на граници течења $R_{p0,2}$ су били од 760 – 794 МПа (табела 5.34.).

Напон на граници кидања R_m је у границама до 800 – 837 МПа (табела 4.34.).

Измерено издужење $A_{11,3}$ је од 9,12 – 11,59 % (табела 4.34.). Вредност $A_{11,3}$ треће епрувете није узета у обзир.

5.5. Технологија МАГ/МАГ са коренским пролазима у заштити 82 % Ar + 18 % CO₂

Макроструктурним испитивањем уочавају се издвојене зоне које су заварене различитим додатним материјалима. Линија I – I пролази кроз део шава који је заварен

пуном, „јаком“, жицом, а линије II – II и III – III кроз део шава који је заварен „меким“, нерђајућим додатним материјалом.

Микроструктурно испитивање је извршено на узорцима добијеним из обе заварене плоче. Анализа је урађена по правцима у којима су мерене тврдоће и то у основном материјалу, ЗУТ-у и металу шава.

Код ове технологије у металу шава вредност тврдоће измерена је од 193 (линија II-II, тачка 9) – 370 HV (линија I – I, тачка 8). У ЗУТ-у код МАГ/МАГ технологије вредност тврдоће била је од 210 (линија II-II, тачке 4 и 5) – 370 HV (линија III-III, тачка 6, табела 4.36.).

Разлика између енергије ширења и енергије иницијације има скоковите вредности. Најмање вредности су на средини корена и лица шава (на лицу шава – средина су негативне вредности), док је код кореног пролаза разлика највећа у ЗУТ-у, а на лицу шава на линији стапања (табела 5.8.).

Енергија лома на лицу шава – средина се кретала од 35 – 41 J (табела 4.37.). На лицу шава на линији стапања од 223 – 251 J (табела 4.38.), а код лица шава у ЗУТ-у од 225 – 238 J (табела 4.39.).

Табела 5.8. Разлика између енергије ширења и енергије иницијације

Место испитивања	Енергија иницијације, J	Енергија ширења, J	Разлика, J (е.ш. - е.и.)
Корен шава – средина	21,50	31,16	9,66
	21,25	29,99	8,74
	22,50	31,60	9,10
Корен шава – линија стапања	56,23	126,16	69,93
	64,76	113,96	49,20
	49,91	137,18	87,27
Корен шава – ЗУТ	69,77	222,64	152,87
	70,61	139,34	68,73
	59,01	136,77	77,76
Лице шава – средина	18,43	17,05	-1,38
	19,40	16,46	-2,94
	26,94	14,21	-12,73
Лице шава – линија стапања	32,98	190,19	157,21
	41,66	210,03	168,37
	37,44	213,90	176,46
Лице шава – ЗУТ	58,19	180,00	121,81
	33,23	192,44	159,21
	33,41	202,45	169,04

Енергија лома у корену шава – средина се кретала од 51 – 54 J (табела 4.40.). У корену шава на линији стапања од 178 – 187 J (табела 4.41.), а код корена шава у ЗУТ-у од 195 – 292 J (табела 4.42.).

Проценат жилавог лома се кретао од 13,18 (табела 4.40.) – 99,81 % (табела 4.39.).

Средње вредности ударне жилавости дате су у табели 5.9.

Табела 5.9. Средње вредности ударне жилавости

Место испитивања	Средња вредност ударне жилавости, J
Корен шава - средина	65,84
Корен шава - линија стапања	228,41
Корен шава - ЗУТ	290,9
Лице шава - средина	46,87
Лице шава - линија стапања	302,58
Лице шава - ЗУТ	291,55

5.6. Технологија МИГ/МАГ са коренским пролазима у заштити 97,5 % Ar + 2,5 % CO₂

Макроструктурним испитивањем уочавају се издвојене зоне које су заварене различитим додатним материјалима. Линија I – I пролази кроз део шава који је заварен пуном, „јаком“, жицом, а линија II – II кроз део шава који је заварен „меким“, нерђајућим додатним материјалом.

Табела 5.10. Разлика између енергије ширења и енергије иницијације код технологије МИГ/МАГ

Место испитивања	Енергија иницијације, J	Енергија ширења, J	Разлика, J (е.ш. - е.и.)
Корен шава – средина	21,97	31,42	9,45
	21,36	39,87	18,51
	21,16	36,79	15,63
Корен шава – линија стапања	54,54	128,55	74,01
	52,46	107,50	55,04
	40,24	154,85	114,61
Корен шава – ЗУТ	71,05	159,73	88,68
	61,93	151,20	89,27
	59,14	158,32	99,18
Лице шава – средина	10,10	36,62	26,52
	11,42	28,67	17,25
	12,90	18,93	6,03
Лице шава – линија стапања	30,84	215,46	184,62
	28,96	195,78	166,82
	33,77	201,89	168,12
Лице шава – ЗУТ	20,94	223,24	202,30
	28,96	199,38	170,42
	29,86	220,59	190,73

Микроструктурно испитивање је извршено на узорцима добијеним из заварене плоче. Анализа је урађена по правцима у којима су мерене тврдоће и то у основном материјалу, ЗУТ-у и металу шава.

Код ове технологије у металу шава вредност тврдоће измерена је од 176 (узорак 1, линија II-II, тачка 10) – 386 HV (узорак 1, линија I – I, тачка 13). У ЗУТ-у код МИГ/МАГ технологије вредност тврдоће била је од 212 (узорак 2, линија I-I, тачка 15) – 384 HV (узорак 1, линија II-II, тачка 5, табела 4.44.).

Разлика између енергије ширења и енергије иницијације има скоковите вредности. Најмање вредности су на средини корена и лица шава док је код кореног пролаза разлика највећа на линији стапања, а на лицу шава у ЗУТ-у (табела 5.10.).

Енергија лома у корену шава – средина се кретала од 52 – 61 J (табела 4.48.). У корену шава на линији стапања од 160 – 195 J (табела 4.49.), а код корена шава у ЗУТ-у од 213 – 230 J (табела 4.50.).

Енергија лома на лицу шава – средина се кретала од 31 – 46 J (табела 4.45.). На лицу шава на линији стапања од 224 – 246 J (табела 4.46.), а код лица шава у ЗУТ-у од 228 – 250 J (табела 4.47.).

Проценат жилавог лома се кретао од 8,42 (табела 4.48.) – 49,98 % (табела 4.46.).

Средње вредности ударне жилавости дате су у табели 5.11.

Табела 5.11. Средње вредности ударне жилавости

Место испитивања	Средња вредност ударне жилавости, J
Корен шава - средина	71,90
Корен шава - линија стапања	224,23
Корен шава - ЗУТ	268,91
Лице шава - средина	49,44
Лице шава - линија стапања	294,46
Лице шава - ЗУТ	301,24

На овој плочи резултати добијени за напон течења ($R_{p0,2}$) су били од 693 – 712 МПа (табела 4.51.).

Затезна чврстоћа, R_m је била у границама до 751 – 763 МПа (табела 4.51.).

Измерено издужење $A_{11,3}$ је било у границама од 2,97 – 5,37 % (табела 4.51.).

5.7. Упоредивање добијених резултата

5.7.1. Упоредивање добијених резултата испитивања макроструктуре

На узорцима, код свих технологија, на којима је рађено испитивање макроструктуре нису уочене грешке типа укључака, прслина и непроварених места, осим на узорцима заварених технологијом МИГ/МАГ, где су уочени гасни укључци.

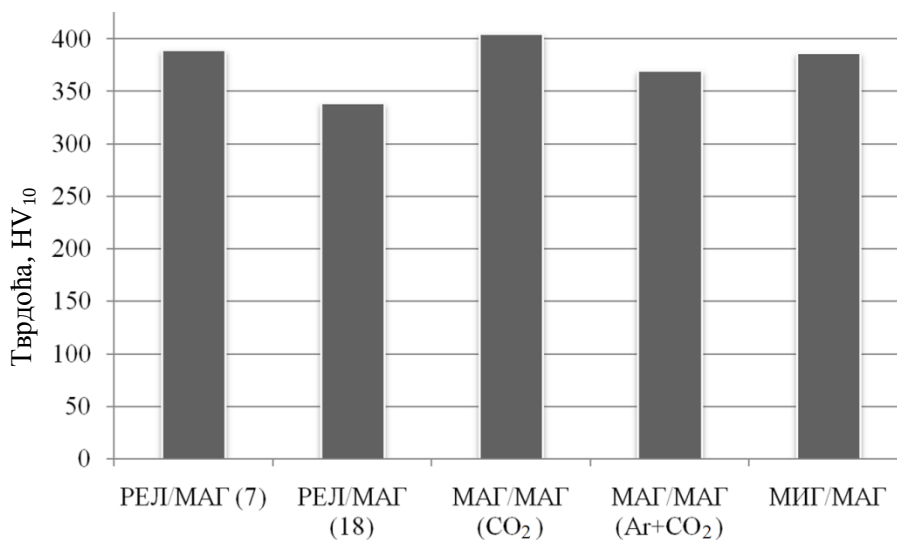
5.7.2. Упоредивање добијених резултата испитивања микроструктуре

Основни услов, који је проистекао из постављених захтева у којима се део експлоатише, био је да заварени спој буде отпоран на ударна оптерећења, што је

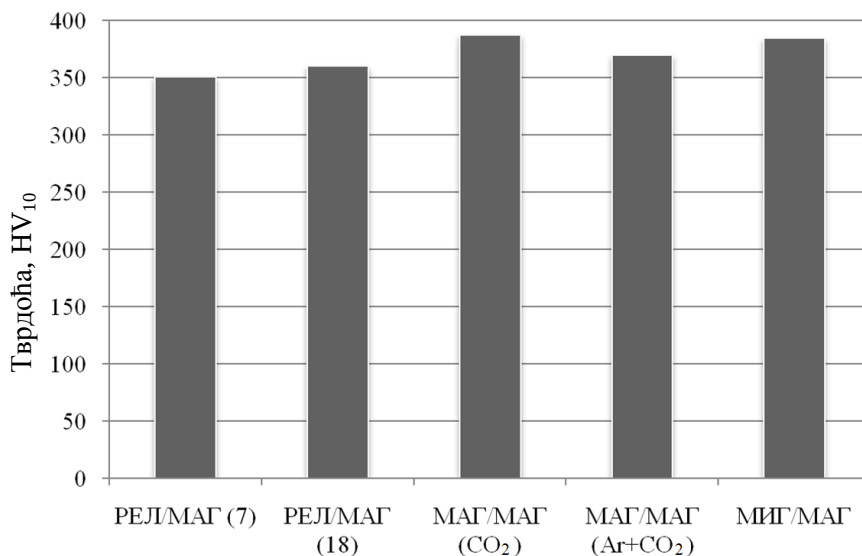
подразумевало заваривање коренског пролаза аустенитним додатним материјалом. Анализом резултата добијених испитивањем микроструктуре код свих пет технологија тај услов је испуњен. У коренима метала шава добијена је аустенитна и аустенитно-феритна структура.

5.7.3. Упоређивање добијених резултата одређивања тврдоће

Упоредном анализом максималних вредности тврдоће метала шава и ЗУТ-а установљено је да највише вредности има узорак заварен технологијом МАГ/МАГ са коренским пролазима у заштитној атмосфери гаса CO_2 (слике 5.1. и 5.2.).



Слика 5.1. Максималне вредности тврдоће у металу шава



Слика 5.2. Максималне вредности тврдоће у ЗУТ-у

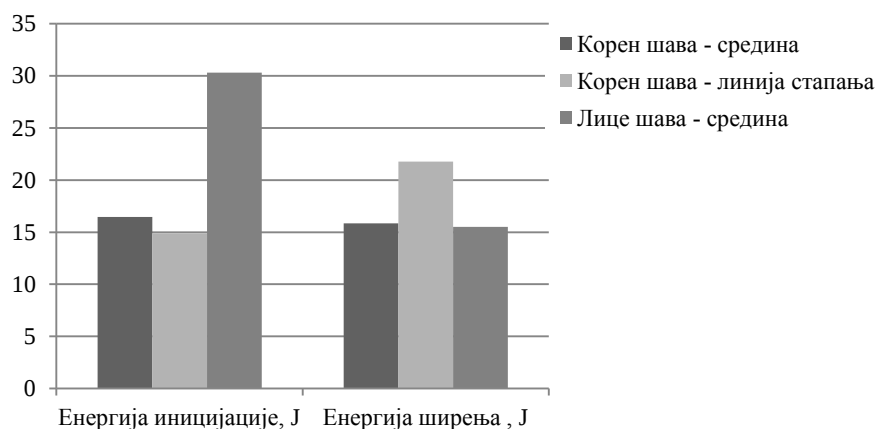
5.7.4. Упоређивање добијених резултата одређивања ударне жилавости

Да би резултати били што реалнији у обзир су узете средње вредности енергије иницијације и енергије ширења на местима која су испитивана у свих пет технологија, а то су: корен шава – средина, корен шава – линија стапања и лице шава – средина (табела 5.12.).

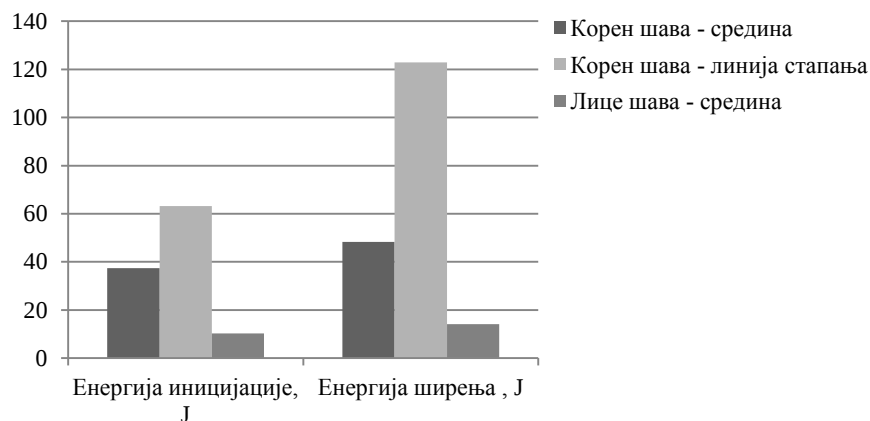
Корен шава – ЗУТ, лице шава – линија стапања и лице шава – ЗУТ као места испитивања нису рађена у свим испитивањима па стога нису рађене ни средње вредности енергије иницијације и енергије ширења за упоредна приказивања у овој табели.

Табела 5.12. Средње вредности енергије иницијације и енергије ширења, J

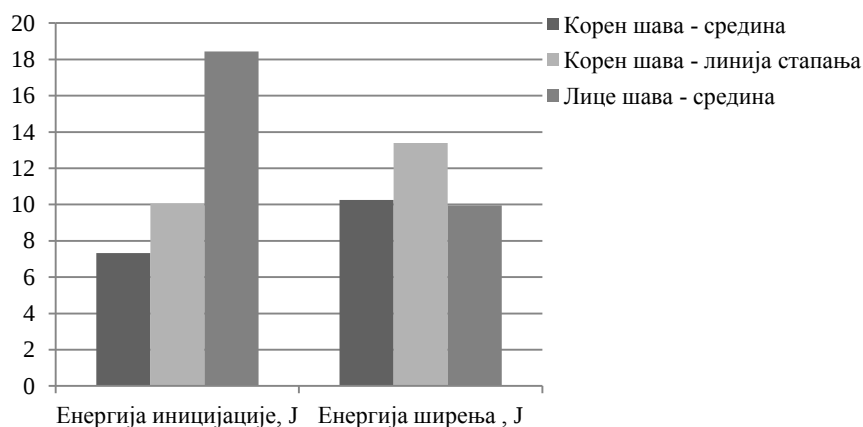
Место испитивања	Средње вредности	Технологије заваривања				
		РЕЛ/МАГ (7)	РЕЛ/МАГ (18)	МАГ/МАГ (CO ₂)	МАГ/МАГ (Ar+CO ₂)	МИГ/МАГ
Корен шава - средина	Ен. иницијације	16,46	37,47	7,32	21,75	21,49
	Ен. ширења	15,83	48,30	10,25	30,92	30,03
	Разлика (еш. - еи.)	-0,63	10,83	2,93	9,17	8,54
Корен шава - линија стапања	Ен. иницијације	14,89	63,22	10,04	56,97	49,08
	Ен. ширења	21,76	122,87	13,40	125,77	130,30
	Разлика (еш. - еи.)	6,87	59,65	3,36	68,80	81,22
Лице шава - средина	Ен. иницијације	30,30	10,34	18,43	21,59	11,47
	Ен. ширења	15,51	24,45	9,95	15,91	28,07
	Разлика (еш. - еи.)	-14,79	14,11	-8,48	-5,68	16,60



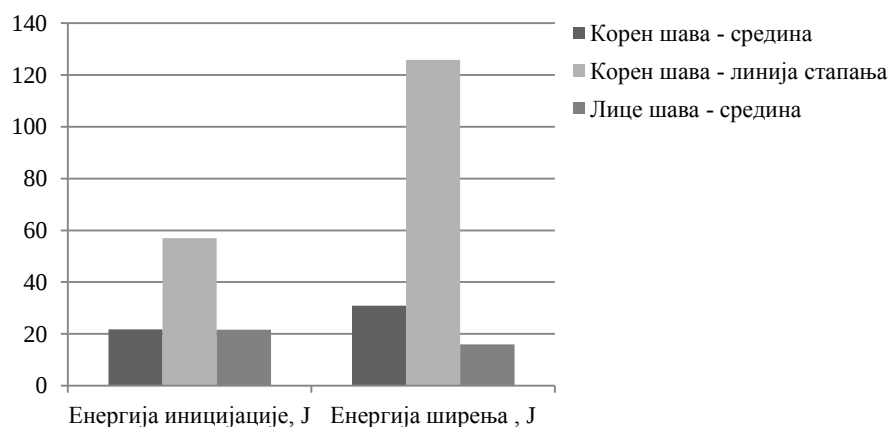
Слика 5.3. Средње вредности енергије иницијације и енергије ширења за технологију РЕЛ/МАГ са седам пролаза



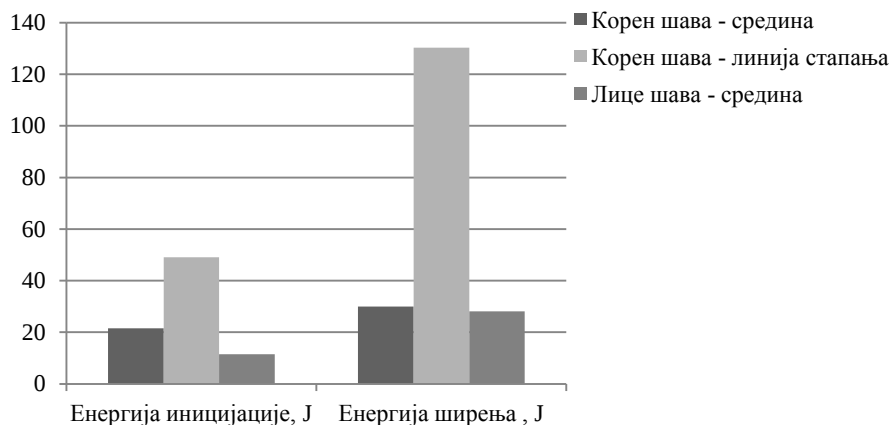
Слика 5.4. Средње вредности енергије иницијације и енергије ширења за технологију РЕЛ/МАГ са осамнаест пролаза



Слика 5.5. Средње вредности енергије иницијације и енергије ширења за технологију МАГ/МАГ у заштити CO₂



Слика 5.6. Средње вредности енергије иницијације и енергије ширења за технологију МАГ/МАГ у заштити мешавине гасова Ar + CO₂



Слика 5.7. Средње вредности енергије иницијације и енергије ширења за технологију МИГ/МАГ

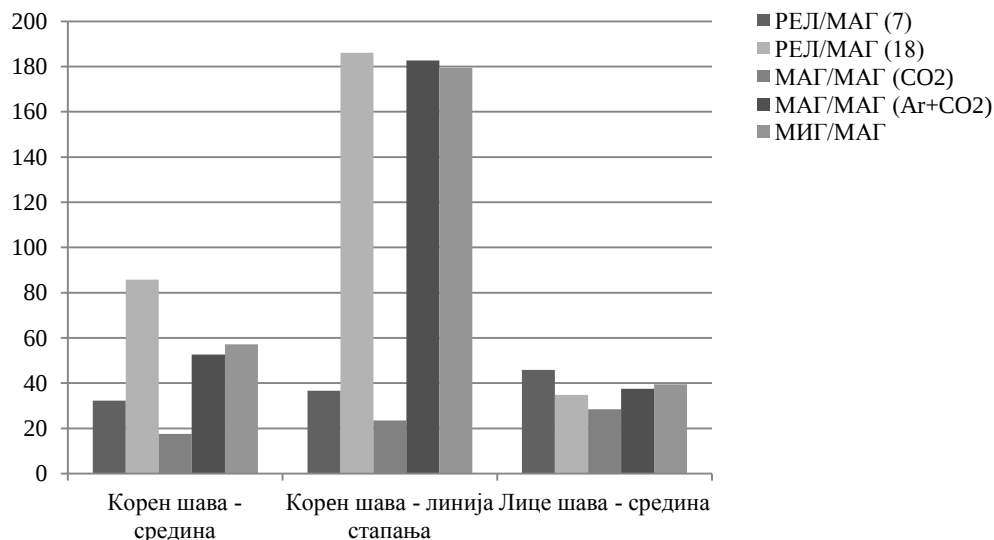
Анализом средњих вредности енергије иницијације и енергије ширења (слике 5.3. до 5.7.) на месту испитивања – корен шава средина, установљено је да је најбоља технологија РЕЛ/МАГ са осамнаест пролаза, али МАГ/МАГ (Ar + CO₂) и МИГ/МАГ имају блиске вредности, док су технологије РЕЛ/МАГ са седам пролаза и МАГ/МАГ (CO₂) знатно испод њих.

Анализом средњих вредности енергије иницијације и енергије ширења (слике 5.3. до 5.7.) на месту испитивања – корен шава линија стапања, установљено је да је најбоља технологија МИГ/МАГ, док су МАГ/МАГ (Ar + CO₂) и РЕЛ/МАГ са осамнаест пролаза, са блиским вредностима, а технологије РЕЛ/МАГ са седам пролаза и МАГ/МАГ (CO₂), опет, далеко испод њих.

Анализом средњих вредности енергије иницијације и енергије ширења (слике 5.3. до 5.7.) на месту испитивања – лице шава средина, установљено је да је најбоља технологија МИГ/МАГ. Блиске вредности има РЕЛ/МАГ са осамнаест пролаза. Ниске вредности су имали: МАГ/МАГ (Ar + CO₂), РЕЛ/МАГ са седам пролаза и МАГ/МАГ (CO₂).

Табела 5.13. Средње вредности енергије лома, J

Место испитивања	Технологије заваривања				
	РЕЛ/МАГ (7)	РЕЛ/МАГ (18)	МАГ/МАГ (CO ₂)	МАГ/МАГ (Ar+CO ₂)	МИГ/МАГ
Корен шава - средина	32,29	85,77	17,57	52,67	57,19
Корен шава - линија стапања	36,65	186,09	23,44	182,73	179,38
Лице шава - средина	45,81	34,79	28,39	37,50	39,55

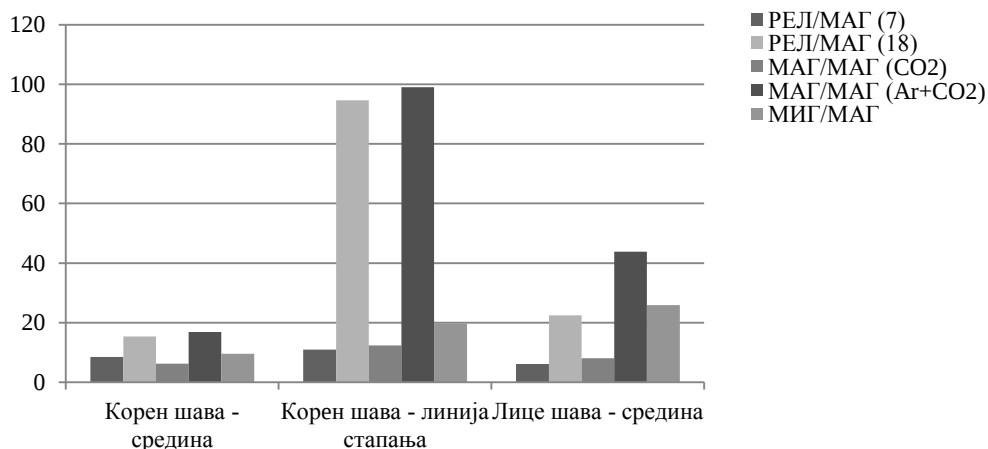


Слика 5.8. Средње вредности енергије лома изражене у J

Највише средње вредности енергије лома у корену шав – средина и корен шав – линија стапања (слика 5.8.) имала је технологија РЕЛ/МАГ са осамнаест пролаза. На месту лице шав – средина највишу средњу вредност енергије лома имала је технологија РЕЛ/МАГ са седам пролаза.

Табела 5.14. Средње вредности жилавог лома %

Место испитивања	Технологије заваривања				
	РЕЛ/МАГ (7)	РЕЛ/МАГ (18)	МАГ/МАГ (CO ₂)	МАГ/МАГ (Ar+CO ₂)	МИГ/МАГ
Корен шав - средина	8,49	15,41	6,27	16,84	9,54
Корен шав - линија стапања	10,95	94,67	12,39	99,05	19,80
Лице шав - средина	6,18	22,52	8,08	43,83	25,86



Слика 5.9. Средње вредности жилавог лома изражене у %

Иако МАГ/МАГ (Ar+CO₂) технологија има највиши проценат жилавог лома, због лоших резултата у осталим испитивањима ударне жилавости требало би истаћи да технологија РЕЛ/МАГ са осамнаест пролаза има задовољавајуће вредности (слика 5.9.).

5.7.5. Упоредивање добијених резултата испитивања затезањем

Приликом испитивања затезних карактеристика завареног споја у односу на основни материјал, у свим експериментима у којима је изведено ово испитивање, добијене су вредности веома сличне вредностима основног материјала, што је задовољавајуће. Затезне карактеристике епрувета за испитивање затезањем завареног споја су веома блиске или веће од вредности основног материјала. Сви ломови епрувета су се догодили ван зоне завареног споја, изузев једног (епрувета бр. 3 код технологије МАГ/МАГ у заштитној атмосфери CO₂) који је преломљен у металу шава – разлог је постојање укључка. Из аспекта јачине, додатни материјал је правилно одабран.

6. ЗАКЉУЧАК

Сва експериментална испитивања изведена на основном материјалу била су у складу са каталожним вредностима за челик S690 QL, трговачког назива WELDOX 700, произвођача – железаре Oxelösund из Шведске.

На основу испитивања макроструктуре и микроструктуре, као и мерењем тврдоће, није било могуће да се одреди која је од ових технологија најповољнија.

Карактеристика челика класе S690 QL је да је енергија иницијације далеко нижа од енергије ширења.

Технологија МИГ/МАГ је дала најбоље резултате из аспекта одређивања енергије иницијације и енергије ширења чије су разлике имале највише вредности, а нешто лошије резултате дала је технологија РЕЛ/МАГ са осамнаест пролаза.

Пролази попуне у свим експериментима изведени су МАГ поступком у заштитној атмосфери смеше гасова ($\text{Ar} + \text{CO}_2$). Резултати испитивања енергије иницијације и енергије ширења показују велика одступања у добијеним резултатима, што наводи на закључак да оне не зависе од одабране технологије, већ од параметара заваривања, услова радне средине и обучености заваривача.

Према стандарду EN 10025-6 за челик S690 QL може се закључити да је вредност енергије лома на температури $+20^\circ\text{C}$ око 45 J што је у границама дефинисаним стандардима.

У корену шава, као једном од најважнијих задатих критеријума, најбоље резултате енергије лома дале су технологије РЕЛ/МАГ са осамнаест пролаза (85,77 J) и технологија МИГ/МАГ (57,19 J).

Испитивање затезањем, на узорцима заварених плоча није изведено у технологијама РЕЛ/МАГ са осамнаест пролаза и МАГ/МАГ у заштитној атмосфери ($\text{Ar} + \text{CO}_2$). На основу добијених резултата могло би да се очекује, што се технологија заваривања тиче, да сви ломови епрувета настану у основном материјалу.

Коначан закључак ових експеримената може да се изведе само на основу заједничких показатеља добијених резултата и параметара заваривања за ова испитивања.

У испитивањима, технологија РЕЛ/МАГ са осамнаест пролаза је дала боље резултате од технологије РЕЛ/МАГ са седам пролаза.

МАГ/МАГ технологија се показала боља при заваривању коренских пролаза са смешом заштитних гасова (82 % $\text{Ar} + 18\%$ CO_2), него са чистим угљен-диоксидом.

Технологије са РЕЛ/МАГ и МИГ/МАГ поступцима могле би да буду примењене без додатних испитивања.

На основу ових испитивања МАГ/МАГ технологија не би могла да се препоручи за заваривање челика S690 QL без додатних побољшања и испитивања.

Број пролаза, као и наизменично заваривање обе стране шава, очигледно имају значајну улогу при заваривању челика S690 QL.

Даља истраживања заварљивости челика S690 QL би могла да се изводе на примени нових додатних материјала због добијених вредности ударне жилавости и жилавог лома, које су мање од очекиваних код средине лица и корена шава у овим експерименталним испитивањима.

За овако захтевне челике, да би се вредности параметара додатног материјала подударале са стандардним и каталожним подацима, требало би проучити и утицај

обучености радника, као и услове радне средине у којима се заваривање изводи, што код ових испитивања није урађено.

То су само нека од питања која су се наметнула при изради овог рада и могу да буду полазна основа за евентуална будућа испитивања.

Челици повишене јачине класе S690 QL заслужују да им се посвети посебна пажња како због свог квалитета, тако и све веће примене, релативно ниске цене, као и због ограниченог искуства у њиховом заваривању, али и због могућности даљег истраживања.

7. ЛИТЕРАТУРА

- [1] **М. Јовановић, В. Лазих:** *Упутство за заваривање челика повишене јачине*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2008.
- [2] **Д. Арсић:** *Оцена заварљивости и избор најповољније технологије челика класе S690 QL*, Мастер рад, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2013.
- [3] **Д. Ђорђевић:** *Оцена технолошко - металуршке заварљивости челика повишене јачине - специјалистички рад*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2010.
- [4] **М. Јовановић, Д. Адамовић, В. Лазих:** *Технологија заваривања - приручник*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2011.
- [5] **А. Живковић, В. Милановић, В. Лазих:** *Повећање продуктивности заваривања челика WELDOX 700*, Заваривање и заварене конструкције, 2015, Број 2, Бр. стр. 53-60.
- [6] **В. Милановић:** " Оцена заварљивости челика повишене јачине на примеру челика S690 QL", Завршни рад, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2013.
- [7] **SRPS EN 1321**, Макроскопско и микроскопско испитивање заварених спојева.
- [8] **ISO 6507-1**, Испитивање тврдоће материјала методом Викерс.
- [9] **SRPS EN 875**, Испитивање са разарањем металних материјала.
- [10] **SRPS EN 895**, Испитивање са разарањем заварених спојева металних материјала - Попречно испитивање затезањем.
- [11] **EN 10025-6**, Hot rolled products of structural steels.
- [12] **EN ISO 15608**, Grouping system of steel.
- [13] **EN 15614-1**, Specification and qualification of welding procedures for metallic materials.
- [14] **www.elektrode.sl**, април 2015.
- [15] **www.kskct.cz/images/materialy/en/bohler.pdf**, април 2015.