

**Факултет инжењерских наука
Универзитета у Крагујевцу**



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Производне технологије II/Технологија заваривања

Број индекса: 736/2011

Владимир М. Милановић

**ОЦЕНА ЗАВАРЉИВОСТИ ЧЕЛИКА ПОВИШЕНЕ
ЈАЧИНЕ НА ПРИМЕРУ ЧЕЛИКА S690 QL**

завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

- 1. Проф. Др Вукић Лазих – ментор**
2. _____
3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог мастер рада кандидат треба да:

- 1) Наведе и опише врсте челика повишене јачине као и њихов развој, примену и поступак производње.
- 2) Укаже на заварљивост челика повишене јачине, и да на одређеном примеру, челику класе S690QL, експериментално и теоријски одреди његову заварљивост и да предложи поступак, додатни материјал и оптималну технологију заваривања.
- 3) На крају рада, студент треба да укаже на методе контроле заварених спојева, предложи најповољнију контролу за разматрани челик и да прикаже резултате спроведене контроле како би заварена конструкција у експлоатацији била поуздана.

Препоручена литература:

[1] **Јовановић М., Лазих В.:** *Упутство за заваривање челика повишене јачине*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2008.

[2] **Ђорђевић Д.:** *Оцена технолошко – металуршке заварљивости челика повишене јачине – специјалистички рад*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2010.

[3] **Јовановић М., Адамовић Д., Лазих В.:** *Технологија заваривања – приручник*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 1996.

[4] **Арсић Д.:** *Оцена заварљивости и избор најповољније технологије заваривања челика повишене јачине класе S690QL – мастер рад*, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац 2013.

Крагујевац, 2013.

ментор:
Др Вукић Лазих, ред. проф.

Резиме: У овом раду се разматрају челици повишене јачине, посебно нисколегирани побољшани челици. У теоријском делу рада утврђена је методологија за оцену заварљивости ових челика, оцењена је заварљивост разматраног челика и изабрани су параметри заваривања за две предложене технологије. На крају је предложена и најповољнија технологија заваривања и оптималан режим заваривања РЕЛ / МАГ и МАГ / МАГ поступцима заваривања овог челика. Оптимална технологија је изабрана на основу обимних експерименталних резултата. Верификација изабране технологије је извршена одређеном контролом изведених заварених спојева, на посебно ригорозним тестовима испитивања заварених конструкција.

Кључне речи: Челици повишене јачине, заварљивост, челик S690 QL, температура предгревања, додатни материјал, микроструктура, тврдоћа, контрола.

Abstract: This work is considering high strength steel weldability, with special emphasis on advanced low alloyed Q + T steels. In theoretical part of this work the methodology of evaluation of high strength steel weldability is determined, weldability of considered steel is estimated and welding parameters for the two proposed welding technologies are selected. At the end, the optimal welding technology and optimal welding regime of REL / MAG and MAG / MAG proceeding for welding of this steel are recommended. The optimal technology is chosen based on experimental tests. Verification of the chosen technology is preformed by the destructive and non-destructive tests of some of the welded joints. Those tests belong to a group of especially rigorous control tests of welded constructions.

Key words: High strength steel, weldability, steel S690 QL, preheating temperature, filler materials, microstructure, hardness, control.

САДРЖАЈ

Предговор

1. УВОД.....	1
2. ЧЕЛИЦИ ПОВИШЕНЕ ЈАЧИНЕ.....	3
2.1. УГЉЕНИЧНИ ЧЕЛИЦИ.....	3
2.1.1. Утицај угљеника на структуру и својства угљеничних челика	4
2.1.2. Примесе у угљеничним челицима	4
2.1.3. Конструкциони челици.....	5
2.1.3.1. Конструкциони челици с ниским садржајем перлита или без перлита.....	5
2.2. ЛЕГИРАНИ ЧЕЛИЦИ.....	6
2.2.1. Легирајући елементи и њихов утицај на особине челика.....	7
2.3. ФИНОЗРНИ МИКРОЛЕГИРАНИ ЧЕЛИЦИ.....	12
2.3.1. Микролегирани нормализовани ситнозрни челици.....	15
2.3.2. Побољшани ситнозрни челици.....	18
2.4. МОГУЋНОСТИ ПОВЕЋАЊА ЈАЧИНЕ ЧЕЛИКА.....	19
2.4.1. Металуршки поступци повећања напона течења.....	19
2.4.1.1. Деформације кристалне структуре.....	19
2.4.1.1.1. „Нултодимензионалне“ или тачкасте неправилности.....	20
2.4.1.1.2. „Једнодимензионалне“ или линијске неправилности.....	20
2.4.1.1.3. „Дводимензионалне“ или површинске неправилности.....	21
2.4.1.1.4. „Тродимензионалне“ или запреминске неправилности.....	21
2.4.1.2. Основни металуршки процеси повећања јачине челика.....	22
2.4.1.2.1. Преципитационо ојачавање челика.....	22
2.4.1.2.2. Ојачавање челика уситњавањем зрна.....	23
2.4.2. Термомеханички поступци повећања напона течења	24
3. ОЦЕНА ЗАВАРЉИВОСТИ ЧЕЛИКА ПОВИШЕНЕ ЈАЧИНЕ.....	26
3.1. МЕТАЛУРШКИ И ТЕХНОЛОШКИ ПРОБЛЕМИ ЗАВАРЉИВОСТИ.....	26

3.1.1. Топле прслине.....	28
3.1.2. Хладне прслине.....	30
3.1.3. Ламеларне прслине.....	33
3.1.4. Прслине жарења.....	34
3.1.5. Испитивање механичко-технолошких особина заварљивости.....	35
3.2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНЕ МЕТОДЕ ЗА ОЦЕНУ ЗАВАРЉИВОСТИ.....	38
3.2.1. Методе за оцену склоности ка појави топлих прслина.....	39
3.2.2. Методе за оцену склоности ка појави хладних прслина.....	39
3.2.3. Методе за оцену склоности ка појави ламеларног лома.....	40
3.2.4. Методе Механике лома.....	40
3.3. ПРОБЛЕМИ ЗАВАРЉИВОСТИ ЧЕЛИКА ПОВИШЕНЕ ЈАЧИНЕ.....	40
3.3.1. Проблеми заварљивости микролегираних (финозрних – ТМ) челика.....	42
3.3.2. Проблеми заварљивости нисколегираних челика повишене јачине.....	43
3.3.2.1. Бејнитни челици.....	43
3.3.2.2. Нисколегирани побољшани челици (Q+T челици).....	44
3.4. ЗАВАРЉИВОСТ ЧЕЛИКА ПОВИШЕНЕ ЈАЧИНЕ S690 QL (WELDOX 700).....	45
3.4.1. Педгревање и међупролазна (interpass) температура.....	47
3.4.2. Количина унете топлоте.....	48
3.4.3. Додатни материјал.....	48
3.4.4. Заштитни гас.....	49
3.4.5. Редослед заваривања и величина зазора у споју.....	50
4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСПИТИВАЊА.....	51
4.1. ТЕХНОЛОГИЈА ЗАВАРИВАЊА ЧЕЛИКА ПОВИШЕНЕ ЈАЧИНЕ S690 QL (WELDOX 700) ГОША ФОМ – СМЕДЕРЕВСКА ПАЛАНКА.....	51
4.1.1. Основни материјал.....	51
4.1.2. Избор поступка и технологије заваривања.....	51
4.1.3. Додатни материјал.....	52
4.1.3.1. Електрода.....	52
4.1.3.2. Пуна жица.....	52
4.1.4. Припрема позиција и жлебова за заваривање.....	53
4.1.5. Температура предгревања и међупролазна температура.....	54
4.1.6. Количина унете енергије.....	54
4.1.7. Параметри заваривања.....	54

4.1.8. Контрола процеса заваривања.....	55
4.1.9. Контрола заварених спојева.....	56
4.1.10. Коментар.....	58

4.2. ПРВО ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСПИТИВАЊЕ ЗАВАРЕНИХ

УЗОРАКА	60
4.2.1. Припрема и заваривање испитних плоча.....	60
4.2.1.1. Прва испитна плоча.....	60
4.2.1.2. Друга испитна плоча.....	61
4.2.2. Испитивање заварених плоча.....	61
4.2.2.1. Испитивање без разарања.....	61
4.2.2.2. Испитивање са разарањем.....	61
4.2.2.2.1. Испитивање затезањем.....	63
4.2.2.2.2. Испитивање ударне жилавости.....	72
4.2.2.2.3. Испитивање тврдоће.....	80
4.2.2.2.4. Макоструктурно испитивање.....	92
4.2.2.2.5. Испитивање микроструктуре.....	92

4.3. ДРУГО ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСПИТИВАЊЕ.....

4.3.1. Припрема и заваривање испитних плоча.....	97
4.3.1.1. Прва заварена плоча.....	97
4.3.1.2. Друга заварена плоча.....	98
4.3.2. Испитивање заварених плоча.....	99
4.3.2.1. Испитивање без разарања.....	99
4.3.2.2. Испитивање са разарањем.....	99
4.3.2.2.1. Испитивање тврдоће.....	100
4.3.2.2.2. Испитивање макроструктуре.....	105
4.3.2.2.3. Испитивање микроструктуре.....	105

5. КОМЕНТАР ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ ИСПИТИВАЊА

ЗАВАРЉИВОСТИ ЧЕЛИКА WELDOX 700.....

5.1. КОМЕНТАР ПРВОГ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНОГ ИСПИТИВАЊА.....

5.1.1. Испитивање затезањем.....	108
5.1.2. Испитивање тврдоће.....	108
5.1.3. Испитивање микроструктуре.....	109
5.1.4. Испитивање ударне жилавости.....	109
5.1.5. Закључно разматрање.....	110

5.2. КОМЕНТАР ДРУГОГ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНОГ ИСПИТИВАЊА.....	110
5.2.1. Испитивање тврдоће.....	111
5.2.2. Испитивање микроструктуре.....	111
5.2.2.1. Варијанта 1 – плоча заварена коришћењем РЕЛ / МАГ технологије.....	111
5.2.2.2. Варијанта 2 – плоча заварена коришћењем МАГ / МАГ технологије.....	111
5.2.3. Испитивање ударне жилавости.....	111
5.2.4. Закључно разматрање.....	112
 6. ЗАКЉУЧАК.....	 113
 7. ПРИЛОГ.....	 114
 8. ЛИТЕРАТУРА.....	 119

ПРЕДГОВОР

У савременом, технички развијеном свету, присутна је тежња за израдом што лакших носећих конструкција којима се постижу различите погодности, као што су: уштеде материјала и времена у производњи, смањење утрошка енергије у експлоатацији код тешко покретних конструкција типа железничких и шинских возила, дизалица, бродова, смањење тежине конструкција, боља антикорозиона својства, мање загађивање околине, бољи квалитет, сигурност и поузданост производа.

Развој и производња челика повишене јачине и високо чврстих челика и достигнућа у погледу њихових својстава, отворили су путеве њиховој примени у изградњи мостова, дизалица, возила, разних конструкција у грађевинарству, ценовода и паровода, цистерни. Међутим, поред свих техно – економских предности ових челика они нису нису нашли ширу примену код нас. Посебно је уочљив недостатак препорука и стандарда који се односе на прописивање технологије заваривања споменутих челика.

Циљ аутора је да кроз овај рад, теоријско – експерименталног типа, истражи наведену проблематику и дефинише технолошко – металуршку заварљивост, прикаже избор оптималних параметара заваривања челика повишене јачине класе S690 QL, као и да објави резултате добијене испитивањима изведених заварених спојева. С друге стране, добијени резултати се могу применити и у управљању интегритетом и квалитетом конструкција израђених од челика повишене јачине са посебним акцентом на челик класе S690 QL.

Овом приликом желим да се захвалим ментору проф. др Вукићу Лазићу на одвојеном времену и свестраној и несебичној помоћи пруженој при изради овог рада.

1. УВОД

У литератури постоји неколико дефиниција челика. Европске нормe дефинишу челик као железни материјал погодан за топлу прераду. Такође челик се може дефинисати као легура гвожђа и угљеника ($C < 2,11\%$), са или без легирајућих елемената. У свету је 2011. године произведено милијарду и пет стотина милиона тона челика.

Челик је деформабилна железна легура која поред угљеника садржи и одређене примесе (Mn, Si) и нечистоће (P, S) које могу бити корисне или штетне.

Велика употреба челика првенствено произилази из његових употребних својстава, односно могућности постизања добре комбинације чврстоће, жилавости, издужења, обликовања деформисањем, промене састава легирањем, термичком обрадом итд. основна својства челика зависе од хемијског састава, микроструктуре, стања, облика и димензија готовог производа. Због економичнијег начина производње (у односу на друге металне материјале) и повољних механичких својстава, челик може послужити за разноврсну примену. Као материјал се користи у свим гранама индустрије, саобраћају, грађевинарству, пољопривреди, као и свим другим делатностима.

С обзиром на степен напретка на подручју развоја нових врста челика и на подручју металуршке производње и термичке обраде, већина различитих врста произведених челика у свету припада групи специјалних челика. Специјалним челицима тако припадају сви племенити и велика већина квалитетних челика. Данас се у свету производи преко 3000 врста челика.

Шездесетих година прошлог века, претпоставка је била да ће се примена челика драматично смањити, у корист обојених метала и полимерних материјала. Ово се није остварило, а главни разлог је супериорност челика у односу на друге материјале у погледу односа квалитет/цена. На развој челика, у протеклих више од сто година, су паралелно утицала два правца: развој и освајање знања из физичке металургије и развој опреме и технологије за производњу челика.

Као пример сталног развоја нових врста челика, може се навести настанак и развој микролегираних челика. Концепт микролегираних челика, код којих се жељене механичке карактеристике остварују хлађењем челика на ваздуху, тако да се не захтева накнадна термичка обрада, започет је у Немачкој раних седамдесетих година прошлог века. Истраживања су настављена у Великој Британији и САД-у, што је довело до великог напретка у механичким карактеристикама микролегираних челика и ширења подручја њихове примене. Како ови челици јачају хлађењем на ваздуху, повољна комбинација својстава као што су жилавост и затезна чврстоћа се лако остварују. Елиминација накнадне термичке обраде, огледа се у нижој цени челика, смањеном броју корака прераде челика као и у потпуној елиминацији прслина које би могле да настану услед каљења или његовим побољшањем. Развој ових челика активно напредује и у данашње време. Додатком микролегирајућих елемената, велике могућности и разноликости поступака прераде, изванредне механичке карактеристике и релативно ниска цена добијања, учинили су да се данас ови челици лако развијају и за специфичне намене.

Упоредо са развојем процеса добијања ових челика ишло се и са развојем њихових технологија заваривања. Технолошка решења за заваривање усмерена су пре свега на спречавање настанка хладних прслина и одређивање услова заваривања за добијање

захтеваних особина (тврдоће и жилавости) ЗУТ-а које обезбеђују сигурност завареног споја у експлоатацији.

Технолошка решења зависе од врсте челика, примењеног поступка ваљања, хемијског састава (укључујући и микролегирање), примењеног поступка хлађења и отпуштања по завршетку ваљања, механичко – технолошких особина челика и захтева за механичко – технолошким особинама ЗУТ-а завареног споја.

Челици повишене јачине су свој развој започели пре тридесетак година када се појавила потреба за израдом одговорних челичних конструкција које су изложене посебним условима оптерећења. Делови транспортних и конструкција за дизалице, мостови, процесна опрема, цевоводи, судови под притиском, требало је да буду смањене тежине, побољшаних експлоатационих карактеристика, са што дужим радним веком, побољшаним технолошким особинама, отпорни на корозију и сниженим трошковима израде и експлоатације.

Захваљујући микролегирајућим елементима, који омогућавају добијање финозрне микроструктуре у процесу ливења и специфичном процесу израде у ваљаоницама, 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. На овај начин добијени су материјали повишене јачине који имају високе механичке особине и на ниским температурама, као и повишену отпорност на деформације и хабање.

Карактеристично за ове челике је да се у односу на угљеничне одликују повећаним својствима јачине и поред ниског садржаја угљеника ($C < 0,22\%$). Ово повећање јачине резултат је позитивног дејства малих количина легирајућих елемената који не погоршавају заварљивост, за разлику од угљеничних челика код којих повећан садржај угљеника утиче на пораст својства јачине, али погоршава заварљивост. Технологија микролегирања омогућила је производњу нове категорије челика, који су у ствари конвенционални угљенични челици са микро додацима легирајућих елемената (мање од $0,50\%$), у циљу повећања напона течења, затезне чврстоће и тврдоће.

Челици повишене јачине поседују повишену затезну чврстоћу, напон течења, издужење и жилавост, а ове особине задржавају и при ниским температурама уз одличан однос тежине и цене, па су стога изузетно погодни за израду одговорних челичних конструкција. Прихваћени су као општи конструкциони материјал за индустријску примену.

Не сматрају се легираним челицима, иако се њихова посебна механичка својства постижу додавањем малих количина легирајућих елемената. Због тога су сврстани у посебну групу која је слична ваљаним средњеугљеничним челицима са побољшаним механичким својствима додавањем малих количина легирајућих елемената. Издвајање у посебну групу је оправдано и због тога што је цена ближа цени угљеничних челика него цени легираних челика. Повећање својстава отпорности ових челика остварује се као резултат различитих механизма ојачања.

Основни циљ при избору основног материјала за заварене конструкције је да материјал буде што јефтинији, а да при томе задовољи тражена механичка својства. Економичност примене ових челика у завареним конструкцијама новијег датума произилази из чињенице да задовољавају све те захтеве. У ове челике сврставају се сви челици са напоном течења већим од 360 МПа.

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, надеутектоидни, 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 веома 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 термосталност.

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 – $R_{p0,2}$, 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,
- 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, $R_{p0,2} < 250 \text{ MPa}$,
2. челици средње чврстоће, $250 \text{ MPa} < R_{p0,2} < 750 \text{ MPa}$,
3. челици високе чврстоће, $750 \text{ MPa} < R_{p0,2} < 1550 \text{ MPa}$ и
4. челици ултрависоке чврстоће, $R_{p0,2} > 1550 \text{ MPa}$.

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 микролегирање ниобијумом или ванадијумом ради повећања јачине. Ниобијум и ванадијум због високог афинитета према угљенику и азоту стварају током хлађења челика фино распоређене честице карбонитрида (таб. 2.1.).

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

челик	Хемијски састав, %				
	C	Si	Mn	Nb	V
S355J2G3	0,16 – 0,20	0,10 – 0,55	1,20 – 1,50	–	–
Сиромашан перлитом	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

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°C до 40°C) итд.

2.2. ЛЕГИРАНИ ЧЕЛИЦИ

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

Према броју легирајућих елемената, челици се деле на једнострукто и вишеструкто 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 (таб. 2.2.).

Табела 2.2. Минимални садржај легирајућих елемената у челицима

елемент	Si	Mn	Cr	Ni	W	Mo	V	Co	Ti	Cu	Al
мин. сад. %	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.

Никал (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 никал 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 додаје челику 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)

- $T_r = 3410^\circ\text{C}$.
- 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 прокаљивост, 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 црвеног лома.

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 пропагација 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 уситњавање 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 прслине.

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 $R_{p0,2}/R_m$ 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 штетене 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 је штетан при ливењу челика.

Дифузионо жарчење, 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 напон 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 уситавање 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, у циљу да се после $\gamma \rightarrow \alpha$ трансформације постигне оптимална феритна структура.

Иако су микролегирани челици пронашли широку примену и већ низ година се налазе у производњи и експлоатацији, њихова употребна својства се стално проучавају ради усавршавања технологије производње и прераде, као и проширења могућности њихове 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 (таб. 2.3.).

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

Микролегирајући елементи		Al	B	Nb	Te	Ti	V	Zr
	O	++	+			++	+	++
	S				(+)	++		++
	N	+	+	+		++	+	++
	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.

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.

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.

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.

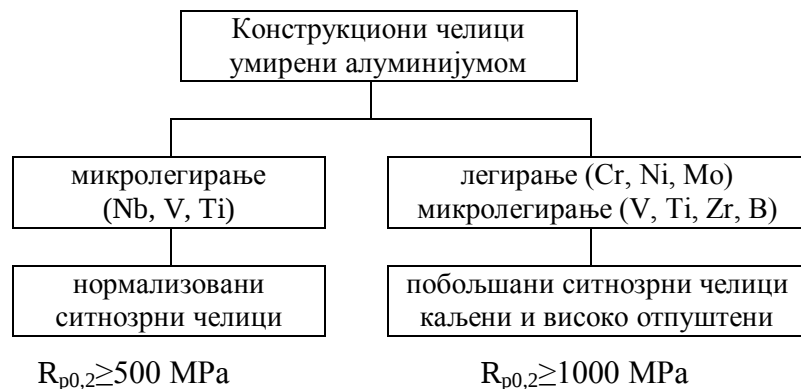
При додатку ванадијума узрок повећања границе течења је излучивање врло ситних честица ванадијумовог карбонитрида за време хлађења кроз α -подручје, јер је ово излучивање лакше и брже од излучивања AlN.

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 сегрегира 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 (сл. 2.1.).



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.

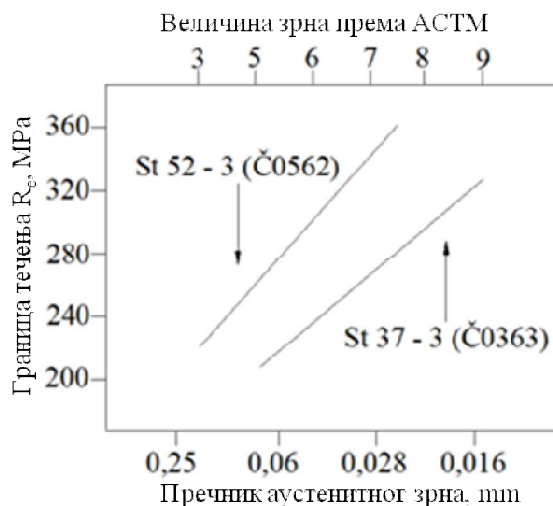
У зависности од постигнуте границе течења приликом добијања, разликују се три групе микролегираних челика:

- 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, никал 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 (сл. 2.2.).



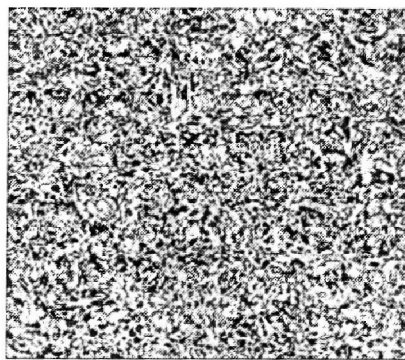
Слика 2.2. Зависност границе течења од величине аустенитног зрна

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°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 добијеног 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 (сл. 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.

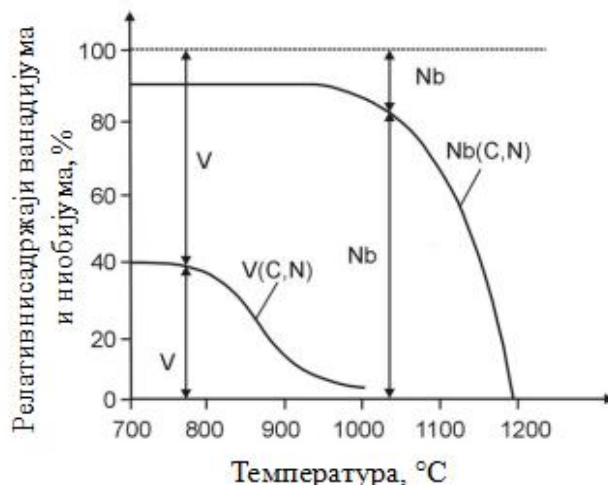
Микролегирајући елементи углавном делују стварањем карбида (NbC и VC), нитрида (NbN и VN) и карбонитрида [$\text{V}(\text{C},\text{N})$ и $(\text{Nb},\text{V})(\text{C},\text{N})$] који спречавају раст аустенитног зрна. Наведени преципитати су довољно густо дисперговани, ситни, термички отпорни и тврди 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 (таб. 2.4.).

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 (таб. 2.4.).

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	+

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 инкоherentности у аустениту већи, па им је и утицај мањи (сл. 2.4.).



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 A_{r3} после хлађења микроструктура таквог челика је грубозрна. Да би се постигло уситњење зрна и омогућило ојачавање по Хал-Печовом механизму 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 диспергује у аустениту. Настале честице алуминијум-нитрида представљају клице кристализације перлитно-феритних зрна.

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 утицај 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.

Табела 2.5. Деловање истопљеног и преципитираног ванадијума и ниобијума

[M] _γ (растопљено у аустениту)		MX (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

Величина, распоред и утицај карбида, нитрида и карбонитрида микролегирајућих елемената зависи од тренутка и температуре њиховог настанка (таб. 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; $\sim 10^4 \mu\text{m}$	Излучивање пре или за време очвршћавања	TiN; ZrN
Грубе честице; $\sim 10^2 \mu\text{m}$	Излучивања на границама зрна	NbC; TiC
Ситне честице; $\sim 10^1 \mu\text{m}$	Излучивања индукована обликовањем	NbC
Ситне честице сврстане у низове; $\sim 10^1 \mu\text{m}$	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 прокаљеност ($> 90\%$ 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.

2.4. МОГУЋНОСТИ ПОВЕЋАЊА ЈАЧИНЕ ЧЕЛИКА

Повећање јачине челика може да се постигне металуршким и термомеханичким поступцима. Разликујемо два начина (технологије) производње микролегираних челика. Један начин је тзв. контролисано ваљање у одређеном температурском интервалу уз одређени “план” смањења дебљине, а други представља комбинацију ваљања и термичке обраде (тзв. термомеханичка обрада).

2.4.1. Металуршки поступци повећања напона течења

2.4.1.1. Деформације кристалне структуре

Карактеристично својство свих материјала је њихово унутрашње уређење, односно распоред суседних атома, тј. структура која може бити кристална или аморфна. Формирањем чврсте фазе при кристализацији атоми морају да заузму строго одређене положаје, јер сваки елемент или једињење у нормалним условима кристалише на исти начин. После потпуне кристализације појављује се кристални материјал састављен од много међусобно спојених малих кристалита.

Сваки реалан кристал садржи грешке или неправилности (нпр. недостаје атом, или је убачен неки страни атом/примеса, и др.). То значи да је идеална периодичност структуре остварена само делимично. Грешке у кристалној структури називамо неправилности решетке. Многа макроскопска својства кристала, поготово механичка, као и процеси дифузије, који су најдиректније повезани с фазним трансформацијама материјала, могу се једино објаснити постојањем и променом концентрације грешака у кристалима.

У ширем смислу појам неправилности решетке обухвата две велике групе: динамичке (настају побуђивањем кристалне решетке) и статичке грешке.

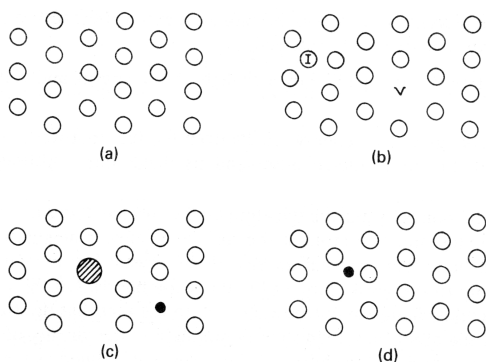
Статичке грешке су неправилности геометријске структуре кристала, настале при конструкцији кристалне решетке или каснијим поступцима (механичким деформацијама, грејањем, зрачењем...)

Статичке грешке се класификују према својим димензијама на:

- "нултодимензионалне" или тачкасте неправилности: празнине, супституцијски или интерстицијски атоми,
- "једнодимензионалне" или линијске неправилности: дислокације, одговорне за механичка својства,
- "дводимензионалне" или површинске неправилности: границе зрна и површине кристала,
- "тродимензионалне" или запреминске неправилности: пукотине, рупе у кристалу, страна тела, инклузије.

2.4.1.1.1. „Нултодимензионалне“ или тачкасте неправилности

Најједноставнији поремећај идеалне (сл.2.5.а).а, кристалне решетке се добија ако је регуларно место кристалне решетке празно. Неправилност се зове празнина („ваканција (сл.2.5.б). Ако се на месту регуларног атома у решетки нађе страни атом, зове се супституцијска примеса или супституцијски атом (сл.2.5.ц), односно ако се налази на месту решетке које није регуларно, неправилност се зове интерстицијска примеса, (сл.2.5.д) или интерстицијски атом (у принципу су то увек атоми који су много мањи од атома решетке, на пример угљеник). У случају да интерстицијски положај заузима властити атом, грешка се зове властити интерстицијски атом.



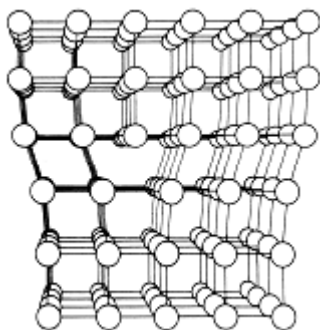
Слика 2.5. „Нултодимензионалне“ или тачкасте неправилности

2.4.1.1.2. „Једнодимензионалне“ или линијске неправилности

Пошто је установљено да су метали и легуре кристалне структуре и да се еластично и пластично деформишу, врло брзо је уочено, да прелазом границе еластичности материјал остаје трајно деформисан по престанку деловања силе (пластична деформација), а да се при томе не мења ни густина материјала ни почетна структура, дакле не долази до промене распореда и међусобних растојања атома. Значи да деформација материјала, поготово метала и легура, који су се највише испитивали, може да настане само помоћу клизања читавог слоја атома дуж једне равни. Детаљнијом анализом оптичким

микроскопом уочене су на површини "степенице" које су се могле објаснити претпоставком да се један део узорка померио – клизнуо дуж једне кристалне равни, названом раван клизања.

На основу тога, може се применити врло једноставан модел за разумевање границе еластичности. Ако се посматрају два реда атома дводимензионалног модела монокристала, где се атоми међусобно додирују, и где је горњи ред атома смештен у „удубљења“ доњег реда врло једноставно се објашњава случај еластичне и пластичне деформације. Напрезање уздиже све атоме горњег реда према врховима доњих атома и чим напрезање престаје атоми се враћају назад у „удубљења“ (еластична деформација). Ако дођу до „врха“, они су у нестабилној равнотежи. Мало повећање напрезања гура атоме у суседно „удубљење“ без могућности повратка (пластична деформација). Граница еластичности одговара минималном напрезању потребном да „попне“ атоме на врхове доњег реда атома, одакле могу „спасти“ на другу страну и проузроковати неповратну деформацију. Ово је у ствари, на атомски ниво пресликана макроскопска деформација која се зове смицање. Механизам пластичне деформације дуж равни у кристалу се одвија помоћу линијске неправилности решетке назване дислокација (сл.2.6.).



Слика 2.6. Схематски приказ дислокације

У случају решетке без дислокација за померање целе равни за једно атомско растојање потребно је „прекинути“ симултано међуатомске везе свих атома горње и доње равни и опет их успоставити. Међутим, помоћу дислокације треба „прекинути“ међуатомске везе само атомима који чине дислокацијску линију. Линија дислокације обично није права, већ цик-цак линија, тако да се број атома којима треба истовремено прекинути и успоставити међуатомске везе још више смањује. Дислокација се услед деловања спољашње силе напрезања креће (клизи) дуж неке равни кроз кристал. Ствара се од самог почетка кристализације и на местима великог напрезања. Да би се спречила пластична деформација кристала, мора се у ствари спречити кретање дислокација.

2.4.1.1.3. „Дводимензионалне“ или површинске неправилности

Када се прекид савршене периодичности кристалне решетке деси унутар кристала, говоримо о дводимензионалним неправилностима. У принципу разликујемо три врсте дводимензионалних грешака:

1. грешке у редоследу мрежних равни,
2. дислокацијски зидови,

3. границе кристалита – подразумевамо границу која раздваја два кристалита различите кристалографске оријентације. Ако су исте структуре и хемијског састава називају се границе зрна, а у случају кристалита различите структуре и хемијског састава зову се фазне границе или међуфазне границе.

2.4.1.1.4. „Тродимензионалне“ или запреминске неправилности

Иако би једна фаза унутар друге требало да буде запреминска неправилност то се обично не сматра грешком већ је реч о преципитацијама, или о дво и трофазном материјалу.

Запреминске неправилности могу бити пукотине, рупе у кристалу, страна тела, инклузије, заостали мехурићи ваздуха приликом очвршћавања или ослобођени гас при излагању материјала великим дозама зрачења.

2.4.1.2. Основни металуршки процеси повећања јачине челика

Постојање грешака (дислокација) у структури основни је разлог што метали немају ону јачину коју би им омогућиле високе силе раздвајања у кристалној решетки. Дислокације, иако снижавају теоријску јачину, омогућавају пластично деформисање при одређеном оптерећењу. Стога је за повећање отпорности према промени облика (напон течења, затезна чврстоћа) потребно отежати померање дислокација, али га не и потпуно онемогућити јер би се тада изгубила способност материјала за промену облика (ударна живавост, издужење, сужење).

Недостатак овог механизма је што је за брзо ојачавање потребно додати велике количине легирајућих елемената, што није оправдано технички и економски.

Ојачавање дислокацијама (као линијским грешкама) темељи се на повећању густине дислокација, које онда постојећим дислокацијама у материјалу отежавају кретање. Нове дислокације се уносе у материјал пластичном деформацијом, каљењем и термомеханичком обрадом. Овај механизам је високо продуктиван у погледу износа ојачавања, али ако се при уношењу нових дислокација њихова густина приближи граничној, наступиће концентрација напрезања што може довести до прелина и лома.

2.4.1.2.1. Преципитационо ојачавање челика

Повећање границе течења механизмом преципитације зависи од метално-физичке интеракције дислокација и преципитата, која се може описати помоћу два процеса: обилажењем и пресецањем преципитата.

Субмикроскопске честице пречника од 5 до 15 nm на међусобној удаљености 15-45 nm ефикасно заустављају померање дислокација уколико је тврдоћа тих честица довољно висока. На слици 2.7. приказана је дислокацијска линија која се креће у смеру означеном стрелицом. Дислокациона линија се у случају наилаaska на тврде преципитате (сл.2.7.а), “завлачи” у радијус

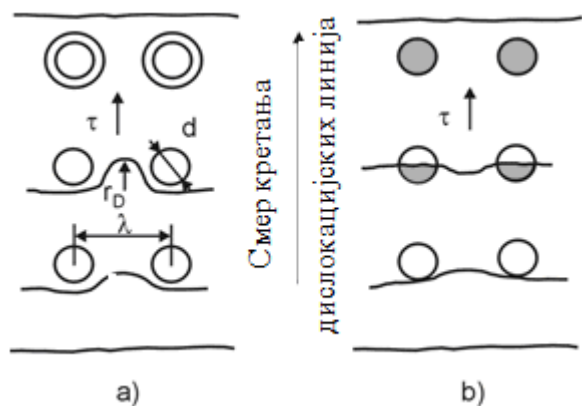
$$r_D = \frac{(\lambda - d)}{2},$$

између две честице преципитата. У том случају долази до значајног ојачавања, тзв. Оровановог напрезања.

У случају меких преципитата (сл.2.7.б), долази до продирења дислокационе линије у преципитате и до њиховог пресецања и слабијег ојачавања у односу на тврде

преципитате. Запремински удео преципитата обично износи 2-6% укупне запремине. Повољно деловање у циљу преципитације довољно чврстих, ситних и диспергованих честица (преципитата) имају посебно елементи као што су: титан, ванадијум и ниобијум који с угљеником и азотом стварају карбиде, нитриде и карбонитриде.

При довољно високој температури карбиди и нитриди микролегирајућих елемената се делимично или потпуно растварају. Хлађењем до температуре трансформације $\gamma \rightarrow \alpha + \text{карбид}$, преципитати ће проузроковати пораст јачине челика. Запремински удео преципитата као и резултујуће ојачавање зависиће од величине аустенитног засићења (суперзасићења) с микролегирајућим елементом, угљеником и азотом, што зависи од температуре и састава челика (сл.2.7.).



Слика 2.7. Схематски приказ Орованаовог механизма ојачавања преципитатима:

а) тврди преципитати и $d > 3 \text{ nm}$; дислокација “обилази” честице (јако ојачавање),

б) меки преципитати или $d < 3 \text{ nm}$; пресецање честица, слабије ојачавање

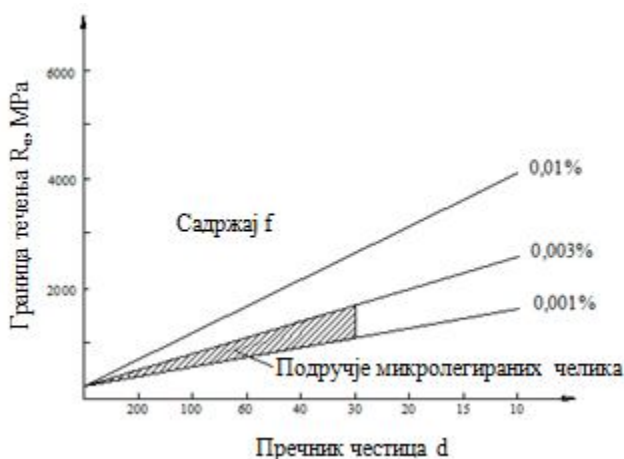
d – пречник преципитата, nm;

λ – размак између преципитата, nm

2.4.1.2.2. Ојачавање челика уситњавањем зрна

Ојачавање уситњавањем зрна темељи се на чињеници да ситнија кристална структура има већи број граница зрна чиме је потребно веће напрезање како би се изазвала пластична деформација. У реалним условима тежња је да се постигне ситније аустенитно зрно, јер оно предодређује величину феритног зрна.

Са применом ојачавања челика помоћу преципитације (Орованаов механизам) треба бити опрезан, јер се уз повишење границе течења смањује и прелазна температура жилавог у крти лом (сл.2.8.).



Слика 2.8. Повећање границе течења због механизма обиласка честица различитих пречника и запреминских удела

Осим додатком алуминијума уситњавање зрна се може постићи и:

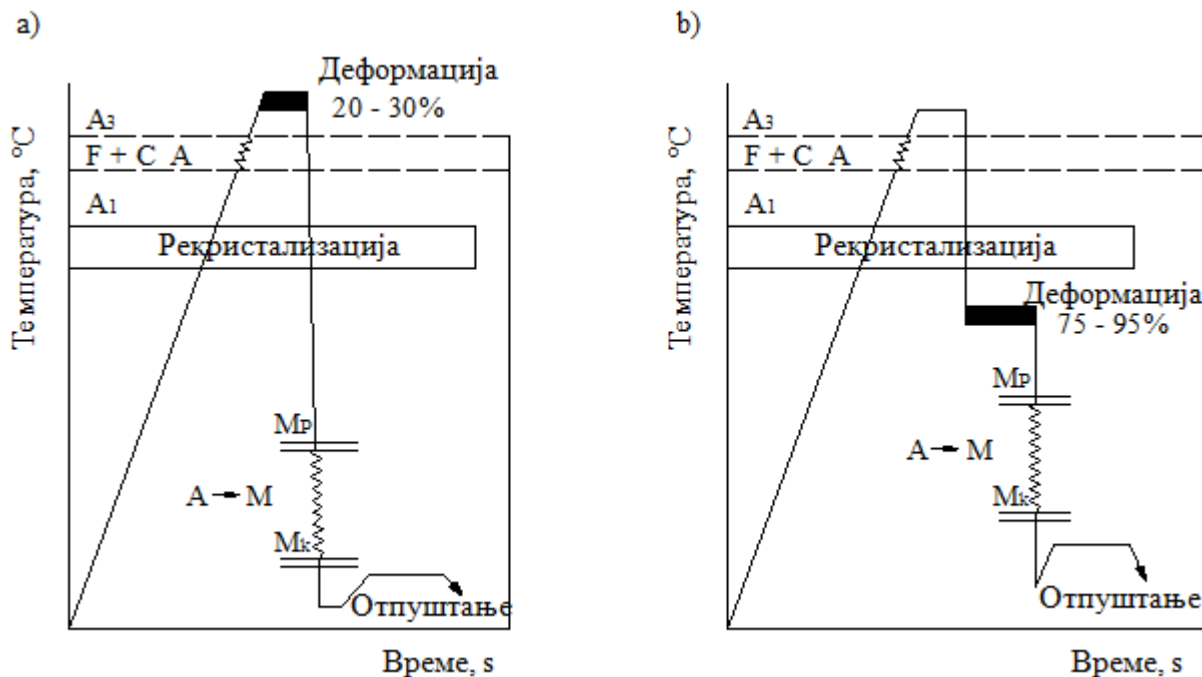
- деловањем елемената Nb, V и Ti (појединачно или комбиновано) с циљем да ти елементи реагују с угљеником и азотом градећи карбиде, нитриде и/или карбонитриде и тако појачају деловање AlN. Притом углавном настају NbC, NbN, VC, VN, Nb(C, N), V(C, N) и (Nb, V)(C, N) који спречавају раст зрна,
- снижењем завршне температуре ваљања како би се уз већ створене карбиде и нитриде отежала рекристализација аустенита, па тако добио уситњен аустенит који ће се испод температуре A_{T1} претворити у ситни перлит/ферит. Једињења ванадијума углавном проузрокују ојачавање по Оровановом механизму, док једињења ниобијума уситњавају зрно и узрокују ојачавање по Хал-Печовом механизму.

Величина зрна утиче и на јачину материјала, али је тај утицај мањи него на границу течења, па зато са ситнијим зрном расте и однос $R_{p0,2} / R_m$. Главна предност Хал-Печовог механизма односно уситњења зрна је истовремено повећање границе течења и снижење прелазне температуре жилавости.

2.4.2. Термомеханички поступци повећања напона течења

Процес термичке обраде којим се челик загрева до температура изнад тачке $A_{с3}$, држи на тој температури одређено време, а затим добијени аустенит пластично деформише на одређен степен деформације и касније хлади критичном брзином у циљу добијања мартензитне структуре, назива се термомеханичка обрада.

Разликују се два начина термомеханичке обраде: високотемпературска термомеханичка обрада (ВТМО) и нискотемпературска термомеханичка обрада (НТМО).



Слика 2.9. Схематски приказ процеса термомеханичких обрада: (а) ВТМО; (б) НТМО

У процесу ВТМО (сл.2.9.а) челик се загрева до температуре изнад тачке A_{C3} и касније се пластично деформише на тој температури, а затим се кали и ниско отпушта.

У процесу НТМО (сл.2.9.б) челик се загрева до температуре изнад тачке A_{C3} , хлади до температуре на којој је аустенит још релативно стабилан, али ниже од температуре рекристализације, пластично деформише на тој температури, затим кали и ниско отпушта.

Са ВТМО може се обрађивати било који челик (угљенични, легирани), док се са НТМО обрађују само челици са високом стабилношћу потхлађеног аустенита (легирани челици).

После термомеханичке обраде добијена механичка својства челика су изразито добра у поређењу са својствима добијеним после термичке обраде каљења и отпуштања ($R_m = 2000 \div 2200$ МПа, а издужење $A_{5,65} = 3 \div 4\%$). Највећа чврстоћа се постиже после НТМО - затезна чврстоћа $R_m = 2800 \div 3300$ МПа, а издужење $A_{5,65} = 5 \div 7\%$. После ВТМО - затезна чврстоћа $R_m = 2200 \div 2600$ МПа, а издужење $A_{5,65} = 7 \div 8\%$. Овде је врло важно уочити да, после термомеханичке обраде, поред високих вредности затезне чврстоће, челик задржава и задовољавајућу пластичност.

Висока механичка својства челика после термомеханичке обраде објашњавају се повећањем густине дислокација у мартензиту, дробљењем његових кристала на субзрна величине делова микрометара, са великом узајамном разоријентисаношћу од $10 \div 15^\circ$. Дислокациона структура која је формирана у аустениту при деформацији остаје после каљења и отпуштања у мартензиту.

3. ОЦЕНА ЗАВАРЉИВОСТИ ЧЕЛИКА ПОВИШЕНЕ ЈАЧИНЕ

3.1. МЕТАЛУРШКИ И ТЕХНОЛОШКИ ПРОБЛЕМИ ЗАВАРЉИВОСТИ

У првој половини прошлог века приступило се систематичном изучавању фактора који потпомажу да се појам заварљивости једнозначно дефинише. У различитим периодима дефиниције заварљивости су биле комплексније или једноставније, али се и данас прихвата да је то сложен проблем под којим се подразумева скуп технолошких особина основног метала преко којих се оцењује подобност основног и додатног материјала да уз примену одговарајуће технологије заваривања дају заварени спој захтеваног квалитета.

Дефиниција заварљивости, коју је Међународни институт за заваривање (МИЗ) дао у документу IIW/IIS – 22 – 59 гласи: – Метал се сматра заварљивим када се коришћењем одређеног поступка заваривања и технологије, постиже хомоген заварени спој који одговара постављеним захтевима у погледу механичких особина, а уједно задовољава као саставни део читаве конструкције.

Из наведене дефиниције се запажа да би за оцену заварљивости требало увек узимати у обзир узајамну везу конструкције, материјала и технологије. С обзиром на комплексност појма заварљивости направљена је подела на уже појмове чиме се олакшава проучавање.

Металуршка заварљивост изучава физичко-хемијске промене у металу у процесу заваривања, а испитује се преко посебно заварених спојева уз познат режим заваривања или симулацијом режима заваривања на основном металу. Зависи од хемијског састава, структуре, начина производње материјала, садржаја гасова, неметалних укључака, и обухвата све металуршке промене у материјалу које настају због унете топлоте при заваривању.

У току процеса заваривања може доћи до недозвољеног погоршања, односно снижења механичких и технолошких својстава споја. Код материјала лоше заварљивости могу настати и промене хемијског састава, прслине, тврде и крте структурне компоненте. Метали и легуре металуршки су незаварљиви, ако се њихови саставни хемијски елементи не растварају у чврстом агрегатном стању (не граде једињења типа чврстих раствора), већ образују тврда и крта једињења (карбиде). Металуршки су заварљиви сви хомогени метални материјали који стварају чврсте растворе.

Физичка заварљивост се бави способношћу материјала да образује хомогене спојеве при било ком поступку заваривања. Такву заварљивост имају практично све техничке легуре и чисти метали, а и велики број комбинација метал – неметал.

Конструкциона заварљивост показује утицај дебљине, врсте, броја и распореда спојева, величине шавова и њихове расподеле на решење заваривања елемената конструкције.

Технолошка заварљивост изучава техничко – економске показатеље и дефинише под којим се условима може добити заварени спој траженог квалитета, од датог материјала уз коришћење расположивих техничких поступака и најмањи утрошак рада и

времена. Због изузетно важног практичног значаја појам технолошке заварљивости се све више изједначава са појмом заварљивости, па се и интензивно изучава.

Технолошка заварљивост обухвата утицај технолошких параметара као што су: додатни материјал, начин и поступак заваривања, линијска енергија заваривања, брзина хлађења итд. на заварени спој. При томе се процењује да ли се поступак заваривања изводи без тешкоћа или се морају применити посебне мере (предгревање, жарење, рад у специјалној атмосфери), а оцена се даје на основу предузетих мера и других радних услова.

У суштини појам заварљивости скоро равноправно зависи од материјала, услова производње заварених конструкција и од конструкционих решења, односно посредно од подобности материјала за заваривање, могућности заваривања и поузданости заварене конструкције.

Напредак у технологији заваривања, увођење нових поступака заваривања, и програмираних термичких режима многе материјале лоше заварљивости превео је у материјале задовољавајуће заварљивости, али остаје чињеница да уколико је материјал квалитетнији, то је број података који одређују заварљивост већа, а њихове међусобне корелације сложеније.

Квалитет заварених спојева у великој мери одређује експлоатациону сигурност и економичност конструкције. Присуство грешака у завареним спојевима, неиспуњење тражених особина, облика и хомогености шавова, односно особине и хомогености метала у зони утицаја топлоте (ЗУТ), може пореметити јачину и друге експлоатационе карактеристике. У условима израде заварене конструкције грешке настају доста често. Њихов број је реални показатељ рационалности примењеног технолошког процеса, погодности и услова коришћења материјала који се заварује, стручности кадра, постојања неопходних услова које захтева радно место заваривача, оптималности и техничке спремности опреме и простора, односно општег техничког нивоа производње.

У зависности од узрока појављивања, грешке се могу поделити у три групе:

- Грешке везане за металуршке, термичке и хидродинамичке појаве, које прате процес топљења, формирања и кристализације истопљеног метала и очвршћавање завареног споја.

То су кристалizacione и хладне напрслине у металу шавова и у зони под утицајем топлоте, поре, троска, неспојене површине, одступање од захтеване јачине и пластичности метала шавова и завареног споја, а такође и нежељене промене особина метала у зони под утицајем топлоте.

- Грешке формирања шавова чине неповари, зарези, налепљивање, прегоривање, кратери, несиметрично постављање угаоних шавова, смањење димензија шавова и др. Настајање ових грешака је обично условљено неправилним технолошким поступком, нарушавањем режима рада, неисправношћу опреме, ниском стручношћу извршилаца, лошом припремом, неправилним конструкционим састављањем и припајањем, неприступачношћу места заваривања и неправилним попуњавањем жлеба.

- У грешке заварене конструкције често се убрајају трајне деформације, односно поремећај задатих димензија.

Методe испитивања које би комплексно окарактерисале појам заварљивости не постоје, већ се за оцену заварљивости користи низ испитивања од којих свако одређује једну или другу страну овог појма.

Истраживање отпорности метала шава према кристалizacionим прслинама је први задатак испитивања заварљивости. У процесу кристализације метала шава под утицајем затежућих напона насталих при заваривању могу настати кристалizacione прслине, које су једна од најчешћих грешака заварених спојева.

Одређивање отпорности метала у зони под утицајем топлоте према образовању прслина је други задатак испитивања заварљивости. Под дејством унете топлоте долази до промене структуре основног материјала који се граничи са шавом. Ове промене заједно са присутним напонима затезања могу да доведу до образовања кристалizacionих и хладних прслина у зони под утицајем топлоте.

Испитивања отпорности основног метала, метала у зони под утицајем топлоте, метала шава као и завареног споја у целини према прелазу у крто стање представља треће подручје испитивања заварљивости.

За процену склоности заварених спојева ка најопаснијим грешкама – прслинама развијене су рачунске методе, технолошке пробе и лабораторијска испитивања укључујући и Механику лома. При оцени опште (глобалне) заварљивости методе се међусобно допуњују, јер је појединачна процена непоуздана.

Као најважнији критеријум за оцену заварљивости јесте непрекидност, тј. метални континуитет завареног споја, који може бити нарушен појавом прслина одређене величине и распореда. Према механизму настајања прслине могу бити:

- топле (вруће),
- хладне,
- ламеларне и
- прслине услед жарења.

3.1.1. Топле прслине

Топле напрслине представљају места раздвајања материјала, која се појављују како у завару (металу шава), тако и у зони утицаја топлоте. Настају на солидус – температури или нешто испод ње. Као доња граничана температура за њихово настајање, узима се: $0,5 T_t$ (T_t – температура топљења у $^{\circ}\text{C}$). Раздвајање материјала је интеркристално, чиме се јасно разликује од прслина, које настају при нижим температурама и имају транскристални ток, као што је случај са хладним прслинама.

У процесу хлађења метал шава би требало да се скупља пропорционално температури, тј. термичко скупљање требало би да одговара односу $\alpha \cdot \Delta T$. Стварна деформација метала шава разликује се од величине $\alpha \cdot \Delta T$ пошто је шав окружен металом чија је температура променљива у зависности од начина заваривања. При томе се извесни делови у одређеном тренутку хладе и скупљају неком брзином, а удаљенији делови метала настављају да се загревају и као последица тога се издужују.

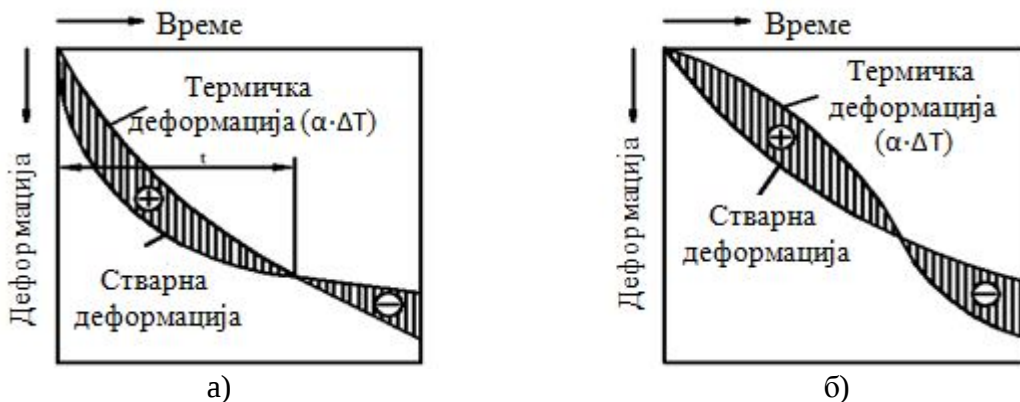
Пошто је метал шава у чврстој вези са основним металом, стварна деформација метала шава је другачија од термичке деформације ($\alpha \cdot \Delta T$). Ако је стварно скупљање веће него термичка деформација $\alpha \cdot \Delta T$ шав је притиснут од стране околног метала и у том случају напрслине не настају.

После неког времена (t) стварна деформација скупљањем постаје мања од термичке деформације $\alpha \cdot \Delta T$ и од тог тренутка шав је оптерећен на затезање од стране основног метала који га окружује. Ако се у том тренутку у шаву налазе компоненте са ниском способношћу течења чија је деформациона способност мања од стварне деформације доћи

ће до појаве прслина. Уколико ове структурне компоненте не постоје у шаву прслина неће бити. У случају када је стварна деформација већ у почетку хлађења мања, него термичка деформација, тада ће шав одмах бити напрегнут на затезање (сл. 3.1.).

У реалним условима заваривања практично је немогуће потпуно уклонити утицај затежућих напона на метал који при заваривању кристалише. Задатак је смањити величину тих напона на износ који неће довести до појаве прслина. Ово се може постићи рационалним конструисањем спојева и елемената, смањењем броја укрштања шавова, избором оптималног типа и размака ивица, отклањањем непотребних преклопа итд. Смањење затежућих напона на најмању меру на рачун технолошких побољшања постиже се:

- предходним предгревањем радног комада,
- рационалним редоследом заваривања и
- избором оптималног поступка и режима заваривања.



Слика 3.1. Схема тока деформације при кристализацији завареног споја; а) почетна стварна деформација већа од термичке, б) почетна стварна деформација мања од термичке

Многобројним испитивањима установљено је да хемијски састав метала шава показује значајан утицај на састав структурних компонената, а самим тим и на отпорност према образовању кристализационих прслина.

Промена хемијског састава метала шава у смислу смањења садржаја неповољних и повећања садржаја корисних елемената, је један од основних видова технологије усмерене на повећање отпорности шава на топле прслине.

Често се проверава осетљивост према топлим прслинама коришћењем параметарских једначина топлих прслина.

Према руским изворима склоност нискоугљеничних челика ка топлим прслинама може се оценити помоћу модификованог еквивалентног угљеника (CE_m)

$$CE_m = C + 2S + \frac{P}{3} + \frac{Si - 0,4}{10} + \frac{Mn - 0,8}{12} + \frac{Ni}{12} + \frac{Cu}{15} + \frac{Cr - 0,8}{15}, \quad \%$$

Челици који имају $CE_m > 0,45\%$ склони су ка топлим прслинама и обрнуто.

Јапански аутори су извели следећи израз за оцену склоности ка топлим напрслинама (H.C.S.– Hot Crack Sensivity):

$$H.C.S. = \frac{C \cdot \left(S + P + \frac{S_i}{25} + \frac{N_i}{100} \right) \cdot 10^3}{3 \cdot M_n + C_r + M_o + V}.$$

Оцена склоности ка топлим напрслинама по критеријуму H.C.S. зависи од врсте челика. Тако су угљенични и нисколегирани челици склони ка овим напрслинама ако је H.C.S. > 4, док је за челике повишене јачине ($R_m > 700$ МПа) та граница оштрија: H.C.S. > 2 за танке лимове и H.C.S. > 1,6 за дебеле лимове.

Поред глобалне процене склоности ка топлим напрслинама помоћу израза SE_m и H.C.S., још се за сврхе поређења челика исте класе одређује понекад температурски интервал кристализације ($\Delta T = T_1 - T_s$) и критична брзина деформисања (v_{krd}). Челици са малом вредношћу ΔT лако се заварују применом додатног материјала сличног основном (хомоген спој). Многи високолегирани челици и већина нежелезних легура имају велику разлику између ликвидус (T_1) и солидус (T_s) температуре, па се мора одабрати специјални додатни материјал да се у шаву смањи $\Delta T = T_1 - T_s$ (хетерогени спојеви). На овај начин ствара тзв. „еутектичка испуна“ која зацељује почетне прслине.

3.1.2. Хладне прслине

У процесу загревања и хлађења метала при заваривању, његова температура, степен деформације и интензитет напона непрекидно се мењају. Паралелно се мењају и особине метала, односно постоји висок степен зависности између његове пластичности, јачине и температуре. Да би се разумео механизам настанка прслина при заваривању неопходно је познавање промене особина метала и напона у зависности од температуре.

При заваривању нисколегираних челика хладне прслине настају као последица деловања три фактора, од којих ниједан сам није довољан да изазове прслину. Ти основни фактори су:

- микроструктура (М или М+Б),
- садржај дифундованог водоника ($H > 5$ ml/100 g метала шави) и
- напони који прате процесе заваривања (првенствено затежући напони).

Утврђено је да појава хладних прслина зависи од услова заваривања: дебљине радног предмета, унете енергије при заваривању и температуре радног комада. Под одређеним условима челик може да постане закаљив, односно при заваривању његова зона под утицајем топлоте или метал шави могу да пређу потпуно или делимично у мартензит. Што се тиче утицаја водоника, одавно је познато да рад са нисководоничним базичним електродама или у заштитној атмосфери инертних или сувих и пречишћених активних гасова даје спојеве без хладних прслина. До сличног закључка се дошло и у односу на деловање напона, пошто је пракса показала да су заварени спојеви без сопствених напона далеко мање осетљиви на појаву хладних прслина.

Утицајни фактори који прате појаву хладних прслина су:

- хемијски састав основног материјала,
- дебљина основног материјала,
- унета топлота при заваривању,
- стање околине,
- додатни материјал,

- поступак заваривања,
- облик завареног споја,
- неметални укључци и тсл.

Кроз сваки од ових утицајних фактора јављају се један, два или сва три основна фактора (микроструктура, садржај дифундованог водоника и напони).

У односу на време појављивања хладне прслине се често зову задржане, успорене или закаснеле, јер се најчешће у процесу заваривања не примећују. Временски фактор код хладних прслина има велику улогу и значај, јер се овај феномен одвија на собној температури или на температури која је блиска собној.

Хемијски еквивалент угљеника (СЕ) је један од најважнијих фактора за процену отпорности челика на појаву хладних прслина.

Постоји велики број једначина по којима се одређује вредност еквивалента угљеника, али се све могу свести на облик:

$$CE = C + \frac{1}{a}M_n + \frac{1}{b}S_i + \frac{1}{c}C_r + \dots$$

где је:

C, Mn, itd. – садржај угљеника и осталих елемената у челику

1/a, 1/b, itd – коефицијенти који показују колико је утицај осталих елемената слабији од утицаја угљеника.

Једначине предложене од стране различитих истраживача разликују се једна од друге по коефицијентима који карактеришу утицај легирајућих елемената. Ове разлике су последица различито постављених циљева, различитих услова рада и различитих основних материјала. Сматра се да на вредност коефицијената битан утицај има брзина хлађења у критичном интервалу температуре.

Најпознатија једначина којом се одређује вредност еквивалента угљеника је она коју је дао Међународни Институт за Заваривање (IIW):

$$CE = C + \frac{M_n}{6} + \frac{M_o}{5} + \frac{N_i}{15} + \frac{C_r}{5} + \frac{V}{5} + \frac{C_u}{15}, \%$$

Препоручене вредности за СЕ у зависности од начина добијања челика су:

- за нормализоване челике $CE = 0,38 \div 0,43\%$,
- за контролисано хлађене челике $CE = 0,34 \div 0,40\%$ и
- за убрзано хлађене челике $CE = 0,30 \div 0,36\%$.

Поред еквивалента угљеника за процену отпорности челика на појаву хладних прслина као веома важни фактори узимају се дебљина радног предмета и садржај дифундованог водоника.

Значајно је анализирати каква је улога предгревања у овим случајевима. Утврђено је да предгревање, чак иако не спутава мартензитну трансформацију, изазива успорено хлађење, што обезбеђује бржу дифузију водоника и истовремено смањује кртост. Исти или чак јачи ефекат има накнадно грејање када се изводи испод M_f температуре, а ако се овоме дода ефекат отпуштања који се при томе јавља, онда је успех још већи.

За оцену склоности ка хладним прслинама С-Мп челика, нисколегираних и микролегираних челика са напоном течења од 272 до 870 МПа примењују се једначине

које узимају у обзир хемијски састав основног материјала, садржај дифундованог водоника и крутост или дебљину завареног споја. Према чешким изворима дају се следеће једначине:

$$P_{hp} = P_{CM} + \frac{K}{40000} + 0,015 \cdot \log \frac{H}{2,77} \quad \text{за } K \leq 1300$$

и

$$P_{hp} = P_{CM} + \frac{K}{40000} + 0,075 \cdot \log \frac{H}{2,77} \quad \text{за } K > 1300$$

$$P_{CM} = C + \frac{S_i}{30} + \frac{M_n + C_u + C_r}{20} + \frac{N_i}{60} + \frac{M_o + V}{15} + 5 \cdot B$$

где је: $K = 70 \cdot s$ – фактор крутости сучеоних спојева,

s – дебљина завариваног материјала у mm и

H – садржај дифундованог водоника у металу шаву у $\text{cm}^3 / 100 \text{ g}$.

Заварени спој за који се добије $P_{hp} \leq 0,24$ сматра се да је отпоран према хладним прслинама, док је за вредност $P_{hp} > 0,24$ потребно предгревање:

$$T_p = 1600 P_{hp} - 308, \text{ } ^\circ\text{C}$$

Један од основних задатака при електролучном заваривању је спречавање хладних прслина у завареном споју и добијање спојева са траженим механичким особинама. Решење овог задатка условљено је применом таквих температурских циклуса заваривања који обезбеђују одређену брзину хлађења споја у температурској области преображаја аустенита и за то време не доводе до предугог задржавања изнад A_{c3} температуре.

Допуштена максимална брзина хлађења зависи од: хемијског састава, дебљине завариваног челика и садржаја водоника у растопљеном металу.

Од стране јапанских аутора (Ито и Бесио) за нисколегиране каљене и отпуштене челике високе јачине, а на бази обимних експеримената, предложен је показатељ склоности ка образовању хладних прслина при заваривању:

$$P_c = P_{CM} + \frac{s}{600} + \frac{H}{60}, \quad \%$$

где су: P_{CM} – показатељ који узима у обзир утицај хемијског састава челика (основног метала) и који се израчунава у зависности од процентуалног садржаја легирајућих елемената по формули:

$$P_{CM} = C + \frac{V}{10} + \frac{M_o}{15} + \frac{M_n + C_u + C_r}{20} + \frac{N_i}{60} + 5 \cdot B, \quad \%$$

где је:

s – дебљина челика у mm и

H – количина дифундованог водоника у $\text{cm}^3/100\text{g}$.

Ако је $0,25 < P_c < 0,40$, при средњој погонској енергији $q_1 = 13,9 \text{ kJ/cm}$, онда је потребно предгревање до температуре: $T_p = 1440 P_c - 392, \text{ } ^\circ\text{C}$.

Практична примена ове једначине је сложена, јер важи само за заваривање са средњом погонском енергијом $q_1=13,9$ кЈ/см и за релативно узак дијапазон $0,25 < P_c < 0,40$. Међутим, при заваривању челика повишене јачине дијапазон промене P_c је шири. У складу са повећањем показатеља P_c зависност $T_p=f(P_c)$ није више линеарна. За шири дијапазон $0,25 < P_c < 0,50$ зависност $T_p=f(P_c)$ гласи:

$$T_p = 350 \cdot \{1 - e^{[-5 \cdot (P_c - 0,27)]}\}.$$

Ова зависност се добро слаже и за $P_c < 0,40$.

Температура предгревања за нисколегиране челике и челике повишене јачине не би практично смела да буде виша од температуре почетка разлагања потхлађеног аустенита:

$$T_p \leq M_s,$$

јер би у противном могле да настану топле прслине. Ако се за основни материјал не располаже дијаграмом континуалног хлађења (KNZ) температура M_s се приближно израчунава помоћу израза за челике повишене јачине:

$$M_s = 550 - 361C - 39Mn - 20Ni - 39Cr - 28Mo, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Ако је прорачунска температура предгревања виша од 300°C или виша од M_s -температуре онда се за такав челик, дати спој и усвојену технологију заваривања морају извести технолошке пробе за оцену склоности ка хладним прслинама, нпр. Tekken.

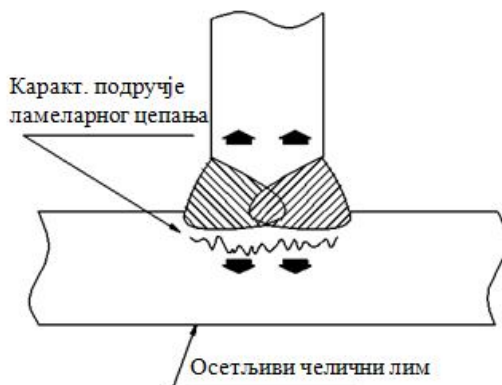
Помоћу еквивалентног угљеника, одговарајућих параметарских једначина, KNZ дијаграма и др. могу се одредити температура предгревања и оптимални параметри заваривања (I , U , v_2), али се све то не сме да се прихвати као коначна технологија заваривања одговорних заварених конструкција. Овако одабраном технологијом изводи се заваривање пробних узорака којима се оверава или одбацује предложена технологија.

3.1.3. Ламеларне прслине

Посебну врсту прслина које се јављају у зони под утицајем топлоте или у основном металу непосредно уз линију споја, ако је деловање напона у правцу дебљине лима, чине ламеларне прслине (назване ламеларно цепање). Често се у литератури може срести да се ове прслине сврставају у групу хладних прслина. Појава прслина овог типа је непосредно везана за присуство неметалних укључака, па се најчешће простиру паралелно са површином лима, степенасто следећи распоред самих укључака.

Ниска пластичност челика у правцу дебљине лима условљена количином, обимом и распоредом сулфидних пластично деформисаних укључака је основни узрочник појаве ламеларног цепања. Посебно код челика умирених, односно дезоксидисаних алуминијумом, појава мангансулфида, који је најчешће носилац сумпора диктира ниво осетљивости према појави ламеларног цепања. Одређивањем јачине, а посебно сужења, на епруветама у правцу дебљине лима, може се успоставити корелација са садржајем сулфида, односно са нивоом присутног сумпора, а тиме и опасност од појаве ламеларног цепања (сл.3.2.). Постоји још битних параметара везаних за појаву ламеларних напрслина код заваривања:

- поступак термо-механичке прераде лима,
- технологија заваривања и режим заваривања и
- конструкционо решење завареног споја.



Слика 3.2. Положај ламеларне прслине у односу на заварени спој

На месту ламеларног цепања поред сулфидних укључака јављају се и укључци оксидног и силикатног типа, а такође се мора узети у обзир садржај дифундованог водоника.

Јапански истраживачи, полазећи од чињенице да ламеларно цепање код дебелих челичних лимова настаје услед тракастих сулфидних укључака и дејства нормалних затежних напона, извели су параметарску једначину:

$$P_L = C + \frac{S_i}{30} + \frac{M_n + C_u + C_r}{20} + \frac{N_i}{60} + \frac{M_o + V}{15} + 5 \cdot B + \frac{H}{60} + 6 \cdot S.$$

На основу овог израза челик се сматра отпорним на ламеларно цепање, ако је $P_L \leq 0,40$. Оваква процена је информативна, јер се узима у обзир једино хемијски састав челика, садржај дифундованог водоника (H_2) и садржај нечистоћа (s), а не узимају се други битни чиниоци: облик сулфидних укључака у лиму, крутост споја, осетљивост металне матрице на зарез итд. Сви ови фактори могу се узети у обзир практичним извођењем одговарајућих проба за оцену склоности ка ламеларним прслинама.

3.1.4. Прслине жарења

Поред прслина које се јављају у току процеса израде заварених конструкција било би непотпуно ако би се изоставиле прслине које се могу јавити у завареним конструкцијама подвргнутим термичкој обради или само жарењу ради смањења заосталих напона. Ове прслине се у односу на механизам настајања и пут простирања деле у две групе.

Прву групу чине прслине које се јављају при ниским температурама ($200 \div 300^\circ\text{C}$) и последица су брзог загревања до температуре жарења. Због неравномерног распореда температуре по дебљини, долази до појаве изражених затежних напона који се често сабирају са заосталим напонима, тако да могу довести до појаве прслина на местима највеће концентрације напона. Ова врста прслина је карактеристична за заварене спојеве

челика склоног деформационом старењу, односно за конструкције израђене од нисколегираних челика повшине јачине, код којих је остварена изузетно неповољна крутост. Карактеристика ових прслина је да се простиру кроз зрна.

Другу групу чине прслине које се простиру по границама зрна, а настају у високотемпературном подручју жарења. Са металуршког аспекта структурни услови који погодују појави овог типа прслина су знатно сложенији. Наиме непосредно уз линију споја, због изузетно високе температуре долази до разградње структуре основног метала, поготово ако је овај ојачан поступком излучивања карбида, нитрида или карбонитрида, уз одговарајући пораст зрна. Због изражених дифузионих процеса талози прелазе у зрно и ојачавају га уз истовремено слабљење границе зрна. Прслине се јављају у тренутку када резерве пластичности на границама зрна постану мање од деформације пузања, коју изазивају унутрашњи напони или спољашње оптерећење.

У литератури се даје више једначина било за оцену склоности челика ка прслинама услед жарења или за међусобно поређење различитих челика према тој склоности. Тако се, на пример, за челик који садржи: $C \leq 0,18\%$ и $Cr \leq 1,5\%$ препоручује израз:

$$\Delta G = Cr + 3,3Mo + 8,1V - 2.$$

Челици са $\Delta G \geq 0$ склони су ка високотемпературним прслинама услед жарења, мада се уз одређене резерве исти критеријум може прихватити и за нискотемпературске. Сматра се да је челик који има $\Delta G = 0 \div 1$ склон ка прслинама испод навара (услед спонтаног жарења претходних завара при вишеслојном заваривању) што је слично термичкој обради жарења. Челици хемијског састава $C=0,1 \div 0,25\%$, $Cr=0 \div 1,5\%$, $Mo=0 \div 0,20\%$, $Cu=0,1\%$, $(V, Nb, Ti)=0 \div 0,15\%$ склони су ка прслинама оба вида ако је параметар $P\check{z} > 0$:

$$P\check{z} = Cr + Cu + 2Mo + 10V + 7Nb + 5Ti - 2.$$

За међусобно поређење различитих челика примењује се израз:

$$SP = 0,4 Mn + Cu + 5 Al - 3(Ti, Nb).$$

Основни материјал са већом вредношћу SP осетљивији је на прслине услед жарења него материјал са мањим SP .

Коначна оцена склоности челика ка прслинама услед жарења даје се на основу изведених технолошких проба, на пример, кружне пробе заварљивости BWRA.

3.1.5. Испитивање механичко-технолошких особина заварљивости

Посебну групу испитивања заварљивости чине испитивања која би требало да нас увере да примењени технолошки поступак заваривања није деградирао својства основног метала, односно да отпорност према прелазу у крто стање није погоршана.

Користе се класичне методе испитивања заварених спојева прописане различитим стандардима или условима провере квалитета (група стандарда у оквиру EN 15614, раније EN 288). Испитивања којима се проверава технолошки поступак заваривања, а дефинисана су стандардом су следећа:

– Испитивања методама без разарања (испитивање течним пенетрантима, магнетофлуksom, ултразвуком и радиографијом). Не спадају у групу испитивања механичко-технолошких особина заварљивости, али им по правилу, увек претходе.

– Испитивање на затезање, проверава се јачина на кидање, граница течења, издужење и контракција и упоређује са основним материјалом. Захтева се да заварени спој има јачину једнаку или већу од основног материјала, што се може остварити правилним избором додатног материјала и основних параметара заваривања.

– Испитивање на савијање, одређује се угао савијања до настанка прслина са лица и наличја шава.

– Испитивање ударне жилавости, ударним оптерећењем одређује се енергија лома преко епрувета са различитим зарезима. Допунски фактор за одређивање критичне температуре је да се епрувете испитују на сниженим температурама. Савремена опрема омогућава да се раздвоји енергија стварања иницијалне прслине од енергије ширења, што је за заварене конструкције које у себи већ садрже иницијацију лома преко присутних грешака од посебног значаја.

У домену провере заварљивости, везано за феномен кртог лома развијала су се два правца. Први, везан за способност материјала да се својом пластичношћу одупре иницијацији прслине, и други, који је усмеравао испитивање на проверу материјала да прслину у кретању заустави.

У радним условима променљивих температура, нпр. мостови, битна је не само апсолутна вредност жилавости, већ и тзв. прелазна температура (средња вредност температурске области промене жилавог у крти лом). За одговорне заварене конструкције захтева се да прелазна температура не сме да буде виша у завареном споју него у основном материјалу. Заварени спојеви код којих је прелазна температура виша него код основног материјала могу се користити само у затвореним просторијама где је температура виша од прелазне.

– Испитивање макроструктуре завареног споја се изводи да ли се случајно у завареном споју не налазе недозвољене грешке типа прслина, разних укључака (троске, гаса...), зарези, налепљивање, прегоривање, кратери, надвишење шава и др. Критеријум прихватљивости за све ове видове грешака је дефинисан стандардом EN ISO 5817. Овај стандард тачно дефинише, у зависности од прописаног квалитета завареног споја (В, С или D) која и колика грешка, односно ког типа је дозвољена да се нађе у завареном споју.

– Испитивање микроструктуре завареног споја се изводи у циљу одређивања микроструктура (ферит, перлит, мартензит, аустенит, беинит, сорбит) из којих се састоји заварени спој.

– Мерење тврдоће, врши се мерење тврдоће у основном металу, зони утицаја топлоте, металу шава и опет у зони утицаја топлоте и основном металу и то у две или три линије, у зависности од дебљине основног метала. Број мерења тврдоће по једној линији је од 15 до 20 тачака.

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

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

$$HV_{\max} = 1200 \cdot CE - 160.$$

Ова веза важи у границама $0,2 < \text{CE} < 0,6\%$, јер за веће вредности CE веза више није линеарна. Уз велика упрошћења, занемаривањем низа других утицајних фактора може да се прихвати да је челик заварљив ако коначна тврдоћа у ЗУТ-у није већа од 350 HV, јер се сматра да се до ове вредности не формира мартензитна структура. Ова гранична тврдоћа одговара вредности CE = 0,45%, па се усваја да су челици са CE < 0,45% заварљиви без примене посебних мера. Челици са CE > 0,45% су незаварљиви или условно заварљиви уз примену посебних мера (предгревање, жарење).

Тврдоћа је у позитивној корелацији са јачином и негативној са дуктилношћу (дуктилност = релативно издужење + жилавост). Дуктилност је способност метала да се може увијати, извлачити, савијати или мењати облик, без појаве прелина. У дуктилне метале спадају Al, Cu, Zn и нискоугљенични челик. Дуктилност се процењује на различите начине. При испитивању затезањем дуктилност одредјују процентуално издужење (A) и процентуално смањење попречног пресека (Z). У ствари то су релативно издужење и сужење. Максимална допуштена тврдоћа је повезана са садржајем дифундованог водоника, па је и у вези са појавом хладних прелина.

За прорачун максималне тврдоће ЗУТ-а користе се следећи изрази:

- за нискоугљеничне челике ($R_m < 300 \text{ MPa}$):

$$\text{HV}_{\max} = 90 + 1050 \text{ C} + 47 \text{ Si} + 75 \text{ Mn} + 30 \text{ Ni} + 31 \text{ Cr} + 40 \text{ V}.$$

- за микролегиране и нисколегиране челике и $q_1 = 17 \text{ kJ/cm}$:

$$\text{HV}_{\max} = 1450 \cdot \left(\text{C} + \frac{\text{Si}}{30} + \frac{\text{Mn} + \text{Cu} + \text{Cr}}{20} + \frac{\text{Ni}}{60} + \frac{\text{Mo} + \text{V}}{15} + 5 \cdot \text{B} \right)$$

и за високо угљеничне челике:

$$\text{HV}_{\max} = 812 \cdot \text{C} - 293.$$

Прорачунате тврдоће дају оријентациону оцену о могућности заваривања без предгревања или са предгревањем. Тако се за C–Mn челике сматра да тврдоћа до 350 HV₁₀ у зони утицаја топлоте није опасна са гледишта појаве хладних напрелина.

За нисколегиране и микролегиране челике дозвољена тврдоћа се повезује са садржајем дифундованог водоника (таб. 3.1.).

Табела 3.1. Допуштена тврдоћа ЗУТ-а у зависности од садржаја водоника у металу шави

H, cm ³ /100g	> 20	10 ÷ 20	5 ÷ 10	1 ÷ 5
HV _{max}	350	375	400	450

Поред повећања кртости и склоности ка хладним напрелинама, нагли пораст тврдоће, нпр. код нискоугљеничних челика са 190 на 400 HV, доводи и до пораста осетљивости завареног споја на зарез. Зато се још уводи и допунско ограничење:

$$\text{HV}_{\max} = (1,2 \div 1,3) \text{HV}_{\text{OM}} \quad \text{где је: } \text{HV}_{\text{OM}} - \text{тврдоћа основног материјала}$$

Сва наведена испитивања изводе се на стандардним епруветама у лабораторијским условима, а затим се за сва испитивања, осим макроструктурних и микроструктурних који се документују фотографијама, цртају дијаграми и дају посебни извештаји. На крају, издаје се збирни извештај (сертификат) којим се документује да ли се технолошки поступак заваривања може применити.

3.2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНЕ МЕТОДЕ ЗА ОЦЕНУ ЗАВАРЉИВОСТИ

За коначну оцену заварљивости неког споја поред рачунских метода и лабораторијских испитивања на разним стандардним епруветама развијен је велики број разних експерименталних проба.

Ако се има у виду да је заварљивост технолошка карактеристика основног метала које су одређене његовим односом према променама које се одвијају при заваривању и способности да се уз изабрани технолошки режим обезбеди сигурност у експлоатацији завареног споја, јасно је да је заварљивост дефинисана низом показатеља. Из тог разлога не постоји једна или пар метода које би једнозначно описале ову комплексну карактеристику материјала, која уз то и није „природна“ особина материјала. За оцену заварљивости данас се у свету користи низ метода, а њихов избор зависи од много фактора у функцији од захтева који се постављају пред материјал.

Табела 3.2. Преглед неких најважнијих (најпознатијих) практичних проба за оцену заварљивости

Критеријум		Врста пробе	Назив пробе	Оцена
Склоност ка прелинама	Хладним	Самоукрућење	CTS, крстаца, Fisco, Tekken, кружна	Прелине се појављују или не појављују
		Са регулисаним напоном	TRC, RRC, IMPLANT, LTP	
		Са симулираним термичким циклусима	BWRA, и имитацијом загревања: - електричним отпором, - индукцијом (струјом високе фреквенције)	
	Топлим	Укрућена	Tekken, Fisco, кружна	
		Са регулисаним напоном	Varestraint, Bauman	
	Ламеларним	Металографска-структурна механичка	Испитивање затезањем у правцу дебљине плоче	
	Жарења	Изотермичка кратковременог течења		
Механичке особине	Тврдоћа	Мерење тврдоће	Метода Викерс	$HV < HV_{max}$
	Својства чврстоће	Испитивање затезањем	Затезање	$R_m^{OM} \approx R_m^{šava}$
	Ударна жилавост	Испитивање жилавости	Метода Шарпи	Прелазна температура

Једна добра метода, или проба за испитивање заварених спојева мора да испуни следеће услове:

- брзо и јефтино извођење,
- велику осетљивост,
- континуално регулисање строгости огледа,
- добру репродуктивност,
- мали утрошак материјала,
- могућност примене за широк дијапазон материјала,
- применљивост за све поступке заваривања и
- добро слагање експерименталних резултата са практичним резултатима.

Експерименталне методе испитивања заварљивости заснивају се на изучавању појаве прслина у завареном споју:

- у току процеса заваривања,
- непосредно после заваривања,
- после одређеног времена (нпр. после 48 сати)
- услед термичке обраде после заваривања и
- у експлоатацији.

Према начину загревања у примењеном циклусу заваривања испитивања могу да буду са:

- стварним циклусом заваривања и
- симулираним циклусом заваривања

Најчешће се критеријуми за оцену заварљивости заснивају на одређивању критичне деформације у функцији температуре при заваривању и критичног напона при коме долази до појаве прслина. Постоји велики број практичних метода (око 900) које су сврстане у карактеристичне групе:

- методе за оцену склоности ка појави топлих прслина,
- методе за оцену склоности ка појави хладних прслина,
- методе за оцену склоности ка ламеларном лому и
- методе Механике лома.

3.2.1. Методе за оцену склоности ка појави топлих прслина

Примарни узрок појаве топлих прслина јесте губитак способности деформације или пад технолошке јачине система на високим температурама.

С обзиром да је склоност ка појави топлих или кристалizacionих прслина зависна од хемијског састава, металуршке чистоће основног и додатног материјала и од напонско – деформационих услова који делују у току кристализације метала шава, јасно је да технолошке пробе за испитивање осетљивости на појаву топлих прслина морају имати строге услове напонског стања.

Најчешће методе (пробе) за оцену склоности ка појави топлих прслина су: Fisk – test, Braup – Boveri проба, Патонова проба и ЈУС (СРПС) проба.

3.2.2. Методе за оцену склоности ка појави хладних прслина

Основни узрочник појаве хладних прслина су: структурне промене праћене појавом мартензита, повећан садржај дифундованог водоника и појава високих затежућих напона

који иницијалну прслину могу проширити до критичних величина за ширење кртог лома кроз метал шава или кроз основни метал.

Испитивања која се односе на проучавање утицајних параметара који доводе до појаве хладних прслина или одређују оптималне услове заваривања по којима оне могу бити избегнуте, могу се поделити у неколико група.

У прву групу спадају испитивања одређених технолошких склопова са сопственим напонима које изазивају крути носачи или деловање једних елемената пробе на друге. То су технолошке пробе разних аутора:

„Н“ заварена плоча, Lihaj проба, CTS проба, Tekken проба итд. Основни недостатак испитивања преко ових проба је да немају квантитативни показатељ величине напона којем је изложен испитивани заварени спој после заваривања. Оне обезбеђују поређење, али не и квантитативну оцену утицаја фактора од којих зависи појава хладних прслина.

Другу групу чине испитивања код којих је било могуће мењати и мерити напоне у завареним спојевима за време настанка и ширења напрслина. То су пробе „инплант“ теста, или код нас познате као Чабелкина проба, совјетска напонска проба итд.

3.2.3. Методе за оцену склоности ка појави ламеларног лома

Ламеларни лом је тип грешке у области завареног споја која се може појавити уколико је област ЗУТ-а оптерећена при заваривању у правцу дебљине лима. Ове прслине се углавном појављују на крају ЗУТ-а или у основном материјалу. Прслина има степенаст облик, најчешће паралелно са површином лима. Основни узрок њиховог настанка је присуство бројних неметалних укључака, најчешће сулфида, фосфида и оксида.

Поред метода без разарања (ултразвучна метода, акустична емисија) постоје методе са разарањем за оцену склоности ка ламеларном лому по систему „има прслина – нема прслина“ и испитивање материјала у правцу дебљине, z – правцу.

3.2.4. Методе Механике лома

На овим просторима методе Механике лома су највише проучаване и то на многобројним до сада одржаним научним скуповима.

Све методе Механике лома, које су стандардизоване за основни материјал користе се при испитивању заварених спојева (разлика је у нехомогености структуре завареног споја). Методе Механике лома су одлучујуће код испитивања особина материјала у условима деловања концентрације напона.

Приликом испитивања Механике лома у подручју линеарне еластичности одређује се критична вредност фактора интензитета напона (K_{IS} или K_I), а када експеримент пређе у еластично–пластично или у пластично подручје користе се методе за одређивање критичне вредности померања врха прслине (CTOD) или одређивање J интеграла.

3.3. ПРОБЛЕМИ ЗАВАРЉИВОСТИ ЧЕЛИКА ПОВИШЕНЕ ЈАЧИНЕ

При пројектовању заварених конструкција тежи се смањењу тежине и повећању носивости конструкције. Ови захтеви су могли да се остваре развојем нових челика са што мањим садржајем угљеника и нижом прелазном температуром. Упоредо са развојем нових челика усавршавале су се и технологије заваривања.

Код првих заварених конструкција примењивани су челици напона течења до 250 МПа, да би се са увођењем угљенично-манганских челика умирених алуминијумом та граница повећала на 300 до 360 МПа. Металуршко-механичким поступком (микролегирањем и нормализацијом, односно контролисаним ваљањем) та граница је повећана до приближно 450 МПа, а патентирањем (у Енглеској) нисколегираних бејнитних челика она достиже 550 МПа. Са развојем побољшаних нисколегираних челика тај напон се повећава до 700 МПа. Сви челици са напоном течења већим од 360 МПа сврставају се у челике повишене јачине, а проблеми њихове заварљивости морају за сваку групу челика да се посебно разматрају.

Осим израчунавања еквивалента угљеника (СЕ), код челика повишене јачине је потребно додатним испитивањима донети оцену о њиховој заварљивости, јер уз дати еквивалент угљеника, код различитих дебљина и садржаја водоника у завару, ови челици показују различиту склоност ка хладним прслинама. Зато је потребно испитати, између осталих, и следеће утицајне чиниоце: склоност ка настанку топлих прслина, склоност ка настанку хладних прслина, осетљивост завара и зоне утицаја топлоте према кртом лому, ламеларно цепање и склоност ка настанку прслина после жарења у циљу уклањања заосталих напона.

Челици повишене јачине се условно сматрају добро заварљивим, мада се при њиховом коришћењу јављају проблеми деградације особина ЗУТ-а. Нежељене појаве које се могу уочити при заваривању ових челика су: повећање тврдоће, смањење жилавости, повећање прелазне температуре и појава диконтинуитета разних облика у ЗУТ-у. Најважније је обезбедити сигурност од кртог лома, чему доприноси постизање довољно ниске прелазне температуре. Због повећаних захтева за продуктивнијим заваривањем, циљ је да се избегне предгревање и омогуће велике брзине заваривања. То може да се оствари смањењем хемијског еквивалента угљеника, односно смањењем садржаја угљеника на рачун легирајућих елемената.

Код челика повишене јачине појава прслина и кртих структура везана је за брзо хлађење споја и његове околине у области температура фазних промена аустенита. Тако да се за спречавање ових неповољних појава захтева смањење брзине хлађења. Код ових челика дефинисана је критична брзина хлађења, а то је брзина хлађења при којој се образује мартензит. Смањење брзине хлађења се може постићи:

- извођењем процеса заваривања после предгревања целог завариваног предмета до довољно високе температуре,

- применом таквих пераметара заваривања који обезбеђују довољну количину топлоте не само за топљење додатног материјала и ивица завариваног дела, већ и за загревање што је могуће веће запремине завариваног материјала у околини шави.

Унета топлота при заваривању је један од важних чинилаца који делују на својство завареног споја. Врло често, произвођачи челика, дају препоруке за оптималну количину

топлоте која се уноси при заваривању одређеног челика, на основу чега се могу одредити параметри заваривања (I , U и v_z):

$$q_l = \frac{U \cdot I}{1000 \cdot v_z} \cdot \eta, \frac{J}{cm},$$

где је :

q_l - погонска (линијска) енергија заваривања, J/cm,

U – радни напон, V,

I – јачина струје, A,

v_z – брзина заваривања, cm/s и

η – коефицијент искоришћења топлоте.

Табела 3.3. Коефицијент искоришћења топлоте

Поступак заваривања	РЕЛ Р*	Б**	ЕПП	МАГ	МИГ	ТИГ
η	0,9	0,8	1,0	0,85	0,75	0,65

*рутилне електроде, **базичне електроде

На структуру, а тиме и на својства ЗУТ-а и метала шава, пресудан утицај има време хлађења између 800 и 500°C ($t_{8/5}$). У овом температурском интервалу одвија се већина пробажаја у челику, који битно утичу на његова својства. У литератури се често користе ТТТ-дијаграми (температура-трансформација-време) из којих се на основу познате вредности времена хлађења $t_{8/5}$ доноси закључак о насталој структури и тврдоћи при хлађењу завареног споја. У случају процене промена при заваривању прикладнија је примена КН-дијаграма, јер су услови хлађења ближи стварним, мада се и ТТТ-дијаграми могу користити за оријентациона сазнања. Разлика између поменутих дијаграма је у томе што су у КН-дијаграму унете криве хлађења различитим брзинама и структуре и тврдоће које се коначно добијају хлађењем одговарајућим брзинама.

Примена ових челика захтева предострожност на следећим основама:

- ограничење количине водоника доведеног до шава, применом одговарајућих поступака заваривања, заваривање базичним електродама, заваривање у заштити гасова, заваривање под прашком, као и уклањање нечистоћа из зоне заваривања,
- избегавање формирања мартензита у ЗУТ-у применом предгревања за елементе већих дебљина и
- смањење унутрашњих напона применом одговарајућих конструкционих решења, као и обезбеђењем сталног размака међу спојеним елементима.

3.3.1. Проблеми заварљивости микролегираних (финозрних – ТМ) челика

За челике из ове групе карактеристично је да садржај угљеника не прелази 0,2% и да се намерно додају мале количине микролегирајућих елемената (Nb, Ti, Al, Ta, Zr, V и др.) чији збирни садржај не прелази 0,2%. Мали додаци ових елемената се таложе као карбиди, нитриди и карбонитриди, а на повећање јачине делују двојачко: уситњавањем

зрна и таложењем и ојачањем чврстог раствора. Уситњавање зрна се постиже нормализационим жарењем и контролисаним ваљањем и хлађењем.

На заварљивост микролегираних челика пресудно утиче склоност ка појави хладних прслина, која се процењује еквивалентним угљеником, дебљином и типом споја. За спречавање ових прслина потребно је предгревање које доприноси образовању најповољније структуре ЗУТ-а, снижењу заосталих напона и количине дифундованог водоника из шаву у ЗУТ. Температура предгревања је повезана са минималном вредношћу међуслојне температуре и може се одредити помоћу параметарских једначина хладних прслина.

Прелиминарно, заварљивост финозрних микролегираних челика са садржајем (у %) $0,1 \div 0,18$ C; $1,0 \div 1,6$ Mn; $0,025 \div 0,095$ Nb; може проценити помоћу следеће формуле за еквивалентни угљеник:

$$CE = Mn/10 + 3Nb, \%$$

а за финозрне челике са додатком ванадијума и азота:

$$CE = C + Mn/10 + V/3 + 3N, \%$$

Челици који имају $CE < 0,35\%$ могу се заварити без посебних мера, док се за челике са $CE = 0,35 \div 0,45\%$, при заваривању под прахом и у заштити CO_2 , морају предузети посебне мере. Оне се углавном односе на повезивање температуре предгревања са погонском енергијом и међупролазном температуром.

Пример: ČRV 500, $R_{eH} = 470 \div 500$ МПа

Ови челици се употребљавају за цевоводе високог притиска, судове под притиском, елементе друмских возила, железничке вагоне и цистерне за превоз гасова, мостове, хале и др.

3.3.2. Проблеми заварљивости нисколегираних челика повишене јачине

3.3.2.1. Бејнитни челици

Ови челици представљају даљи корак у развоју челика повишене јачине у односу на микролегиране. Најпре је у Енглеској почела производња овог челика под називом FORTYWELD. Основни легирајући елементи су: Мо (0,5%) и В (~0,003%), а садржај угљеника износи до 0,18%, уз нешто повећан садржај Mn и Si. Испоручују се у нормализованом жареном или у нормализованом и отпуштеном стању. Комбинацијом 0,5% Мо са 0,003% В постиже се бејнитна структура и при веома малим брзинама хлађења (на мирном ваздуху), а додацима Mn и Cr снижава се температура бејнитне трансформације на $600 \div 300^\circ\text{C}$. Снижавањем температуре бејнитне промене постиже се уситњавање металних зрна и већа дисперзија карбидних честица, што доприноси повећању јачине. На тај начин, после нормализације, може да се добије напон течења $R_{eH} = 460 \div 600$ МПа равномерно по целом пресеку делова дебљине до 100 mm.

Основни проблеми при заваривању ових челика произлазе из њихове склоности ка хладним прслинама и паду жилавости у ЗУТ-у. Овај проблем може да се реши смањивањем брзине хлађења после заваривања, што се постиже предгревањем и повећањем уноса топлоте.

Пример: пољски челик 15 HNMBA, $R_{eH} = 620 \div 690$ МПа.

Примењују се израду различитих челичних конструкција типа дизалица, железничких платформи, цистерни, грађевинских машина итд. Не примењују се за конструкције изложене ниским температурама због пада ударне жилавости.

3.3.2.2. Нисколегирани побољшани челици (Q+T челици)

Примењују се за дизалице, железничке платформе, железничке цистерне, грађевинске машине, резервоаре за гориво, мостове, бродску опрему и тсл.

Највеће вредности својства отпорности код ових челика могу да се постигну каљењем на мартензитну структуру ($R_{eH} = 400 \div 800$ МПа). Мада су нискоугљенични ($C < 0,20\%$) долази до закаљивања и при релативно спором хлађењу. Легирајући елемент који има пресудну улогу на повећање јачине је бор (В). Он доприноси уситњавању зрна, дезоксидацији и денитрирању металног купатила, као и великом повећању прокаљивости.

Производња ових челика је веома сложена и скупа, па је зато само мали број индустријски развијених земаља (Q+T) челике уврстио у своје производне програме. Каљење и отпуштање обавља се у специјалној и скупој технолошкој опреми. Каљење се изводи млазевима текуће воде са температуре око 900°C , до температуре око 300°C и то одмах после ваљања на топло. Накнадно отпуштање се обавља у проточним пећима. Изводи се при температурама $500 \div 700^\circ\text{C}$ око 1h и затим хлађењем на ваздуху. При температури отпуштања од 500°C добија се тврдоћа од 350HV и $R_{eH} = 490$ МПа.

Ови челици су познати под називом ТМО (термомеханички обрађени) челици.

Већина челика израђена каљењем и отпуштањем (Q+T челици) су финозрни челици, (кале се са температуре при којој су настала ситна аустенитна зрна). На тај начин могу да се добију челични полупроизводи велике јачине и добре заварљивости.

Механичке особине нисколегираних побољшаних челика добијене су оптималном термичком обрадом, па ће се те особине, при заваривању, мењати услед дејства температурских циклуса заваривања. При избору термичког режима заваривања није довољно да се узме у обзир само хемијски састав, већ и чињеница да су корисне особине постигнуте термичком обрадом побољшања. Из овог разлога се мора за сваки челик ове класе дефинисати опсег варирања брзине хлађења, одакле произлазе и граничне вредности погонске енергије, као и време задржавања ЗУТ-а изнад A_{c3} температуре. Доња гранична вредност уноса топлоте одређује се из услова да се спрече хладне прслине, а њена максимална вредност, као и време задржавања изнад A_{c3} из услова да се сведе на најмању меру пад јачине (тврдоће) у делу ЗУТ-а.

За разлику од заварљивих конструкционих челика, код Q+T челика бољи резултати се постижу применом технологија са мањим уносом топлоте, као што су РЕЛ и заваривање у заштити гасова. Према подацима у литератури потребно је да погонска енергија буде у границама $8 \div 12$ кЈ/см при РЕЛ заваривању и $13 \div 30$ кЈ/см за ЕПП поступак.

Пошто су варијације уноса топлоте (q_1) мање или више ограничене, једини начин да се спречи појава хладних прслина јесте предгревање, одржавање међупролазне

температуре и понекад догревање. Битна је ширина појаса код локалног предгревања, јер и то утиче на брзину хлађења до 300°C, као и на дифузију водоника из шави у ЗУТ. Ово се нарочито односи на први, тј. коренски завар за који је склоност ка прелинама највећа.

Пример: St E 70, $R_{eH} = 630 \div 690$ МПа.

3.4. ЗАВАРЉИВОСТ ЧЕЛИКА ПОВИШЕНЕ ЈАЧИНЕ S690 QL (WELDOX 700)

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 МПа до 960 МПа.

Значење ознаке:

- S – конструкциони челик
- 690 – минимална граница течења (МПа)
- Q – каљен и отпуштен
- L – гарантована жилавост на ниским температурама.

Поред челика S690 QL постоје челици S690 Q и S690 QL1. Код ових челика гарантовану жилавост од 30 J S690 Q постиже на температури од -20°C, а S690 QL1 на температури од -60°C.

Заварљивост и технологија заваривања конструкционих челика повишене јачине, каљених и отпуштених, са границом течења од 690 МПа, у овом раду биће обрађени на примеру S690 QL.

Челици класе S690 QL, под произвођачким називом WELDOX, се производе у Шведској од 1992. године у желазари Oxelösund. Израђују се по строго контролисаном хемијском саставу (таб. 3.4.) и механичким карактеристикама (таб. 3.5.), а према тачно дефинисаним производним фазама.

Табела 3.4. Хемијски састав WELDOX 700 (max. %)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Ni	Mo	B
0,20	0,60	1,60	0,020	0,010	0,70	0,30	2,0	0,70	0,005

То је омогућило да се остваре механичке особине са релативно уским границама толеранције.

Табела 3.5. Механичке карактеристике челика WELDOX 700

Дебљина mm	Граница течења $R_{p0,2}$, МПа	Затезна чврстоћа R_m , МПа	Издужење A_5 , %	Тврдоћа HB
4 – 53	700	780 – 930	14	260 – 310
53 – 100	650	780 – 930	14	260 – 310
100 – 160	650	710 – 900	14	240 – 290

Табела 3.6. Ударна жилавост челика WELDOX 700

Температура испитивања	E (-40°C)	E (-60°C)
Минимална енергија удара	69 J	27J
Класа челика	S690 QL	S690 QL1

Табела 3.7. Еквивалент угљеника CET (max) челика WELDOX 700

Дебљина, mm	≤ 5	5 – 10	10 – 20	20 – 40	40 – 80	80 – 100	100 – 160
Weldox700E, CET	0,34	0,31	0,31	0,34	0,39	0,39	0,41
Weldox700F, CET	0,38	0,38	0,38	0,38	0,39	0,39	0,41

$$CET = C + \frac{M_n + M_o}{10} + \frac{C_r + C_u}{20} + \frac{N_i}{40}$$

Табела 3.8. Еквивалент угљеника CEV (max)

Дебљина, mm	≤ 5	5 – 10	10 – 20	20 – 40	40 – 80	80 – 100	100 – 160
Weldox 700E, CEV	0,48	0,48	0,48	0,48	0,58	0,58	0,67
Weldox 700F, CEV	0,57	0,57	0,57	0,57	0,58	0,58	0,67

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

Хемијски еквивалент угљеника (CE) (таб. 3.7., 3.8.) је рачунат по формули МИЗ-а, при чему се он обележава и као CEV. Међутим, железара Oxelörsund, када су у питању челици повишене јачине, преферира CET формулу за израчунавање еквивалентног угљеника. По њима, CET формула је подобнија за употребу на челицима повишене јачине, док CEV формулу признају као валидну, али сматрају да се она више користи за угљеничне и нисколегиране челике мање јачине од челика класе S690 QL.

Разликују се две врсте ових челика: конструкциони и за судове под притиском. Њихова структура је феритно–перлитна тако да спадају у групу добро заварљивих челика, али само за плоче релативно мањих дебљина. Добијају се поступком термомеханичке обраде челичних полупроизвода на високим температурама (ваљање и контролисано хлађење).

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

Једини проблем који се односи на заварљивост класе WELDOX челика, код делова веће дебљине, односи се на хладне (водоничне) прслине. Углавном се ти проблеми могу 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.

Да би се постигла добра својства завареног споја потребно је да се води рачуна о следећим параметрима:

1. Температура предгревања и међупролазна (interpass) температура;
2. Количина унете топлоте;

3. Избор додатног материјала;
4. Избор заштитног гаса;
5. Редослед заваривања и величина зазора у споју.

3.4.1.Предгревање и међупролазна (interpass) температура

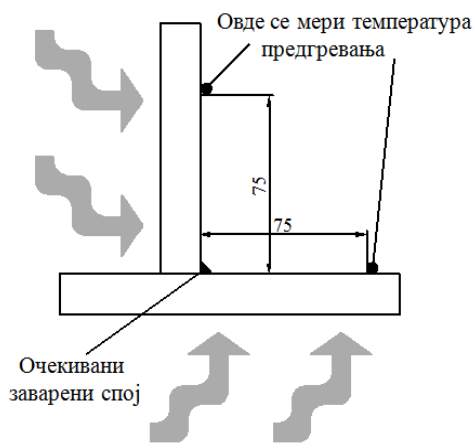
За спречавање хладних (водоничних) прслина потребно је да се правилно одаберу температура предгревања (T_p) и међупролазна температура.

Интерпас температура је прелазна температура до које се хлади једнопролазан завар, тј. температура при којој може да се почне са заваривањем другог завара.

Потреба за предгревањем може да се смањи на опсег од 150 до 200°C, ако се припоји изведу са високопластичним аустенитним електродама и са повећаним уносом топлоте, а коренски пролази и још неколико пролаза испуне са што краћим заварима – један за другим. Тиме ће најкритичније време настанка хладних прслина истећи на температури изнад критичне (од 150 до 100°C) и сачувати механичке особине добијене основном прерадом. Претходни пролази својом топлотном енергијом делују као да је извршено предгревање за наредни пролаз.

Захтеване температуре предгревања и међупролазне температуре могу да буду остварене употребом гасног горионика или електричних грејних елемената. Приликом употребе гасног горионика требало би да се води рачуна да се пажљиво загреје непосредна зона споја и његова околина, а да се делови не загреју изнад препоручене температуре предгревања. Електрични грејни елементи постављени око припремљеног споја су најбољи извор, јер омогућавају равномерно загревање свих површина. Температура предгревања и међупролазне температура контролишу се помоћу контактнoг или бесконтактнoг термометра (сл. 3.3.). Успорено хлађење се постиже умотавањем завареног склопа термоминералном вуном.

Најнижа препоручена температура предгревања мора да буде повећана за 25°C ако је спољашња влажност повишена или је температура околине испод 5°C. Ово доприноси чврстини припојних шавова, који се заварују са уносом топлоте од око 17 kJ/cm.



Слика 3.3. Место мерења температуре предгревања

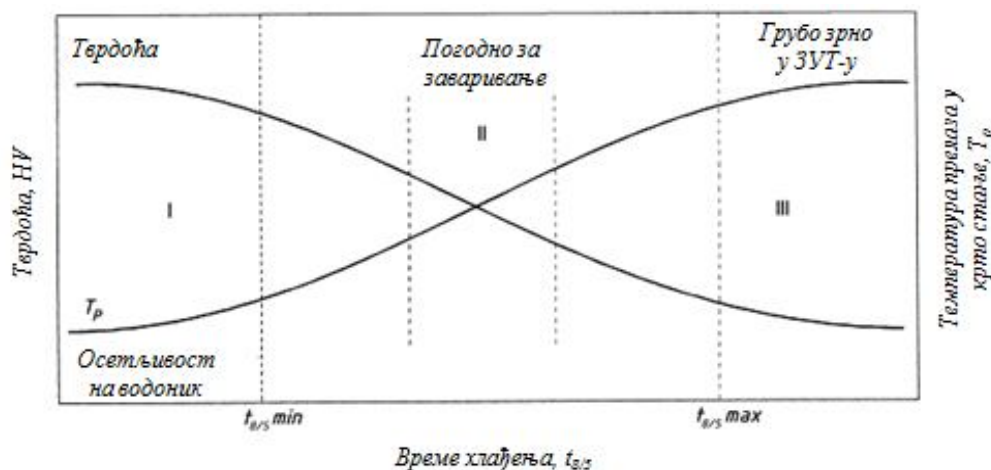
3.4.2. Количина унете топлоте

Челици класе WELDOX заварују се са уносом топлоте који варира у уским границама, да би се добиле добре механичке особине завареног споја.

Унос топлоте утиче на:

- жилавост ЗУТ-а,
- својства отпорности и деформације споја,
- заостале напоне завареног споја и
- ширину и особине ЗУТ-а.

Превелики унос топлоте пружује кртоост прелазне зоне уз границу топљења. При високим температурама (од 1100 до 1500°C) услед дугог задржавања, у споменутој зони може да дође до раста зрна и коагулације преципитата. То може да изазове пад жилавости, нарочито на ниским температурама. Мали унос топлоте може да доведе до повећане јачине и тврдоће завареног споја, што уз кртоост и присуство водоника у металу шава може да проузрокује настанак хладних прелина. То доводи до смањења деформабилности и повећавања склоност ка кртом лому (сл. 3.4.).



Слика 3.4. Дијаграм прелазне температуре и тврдоће, у зависности од времена хлађења $t_{8/5}$

3.4.3. Додатни материјал

Применом додатних материјала мање јачине од основног материјала постиже се већа жилавост завареног споја, већа отпорност на водоничне напрелине и нижи заостали напони у завареном споју, посебно у ЗУТ-у.

Код вишепролазних спојева од WELDOX 700, нарочито је корисно заваривање са додатним материјалима различитих јачина. Припојни шавови и први пролаз заварују се са додатним материјалом мање јачине, а остали пролази се изводе са додатним материјалом веће јачине. Ова техника заваривања се примењује кад се техничким условима траже приближно иста својства отпорности у свим деловима завареног споја.



Слика 3.5. Вишеслојно заваривање различитим додатним материјалима

За заваривање челика WELDOX 700 примењују се базичне сушене електроде или други додатни материјали који гарантују да ће садржај водоника у металу шавова да буде $H_2 \leq 5 \text{ ml/100g}$. То се постиже прецизно регулисаним сушењем и употребом базичних аустенитних електрода. Код МАГ и ТИГ заваривања додатним материјалом у облику пуних жица може да се постигне овако низак садржај водоника у металу шавова. Садржај водоника у металу шавова за друге типове додатних материјала, као што су прашком пуњене жице, износи онолико колико произвођачи додатног материјала гарантују. Ако се додатни материјал чува у складу са препорукама произвођача, садржај водоника биће одржан у означеним границама.

Додатни материјали од нерђајућих челика могу да буду употребљени за заваривање свих конструкционих челика. Они омогућавају заваривање при собној температури без предгревања. Препоручују се првенствено додатни материјали према AWS 307, односно AWS A 5.4 E 307–15, јер се могу доста добро одупрети топлим прслинама.

3.4.4. Заштитни гас

При МАГ/МИГ заваривању WELDOX челика, поред основног и додатног материјала важну улогу има и избор заштитног гаса или мешавине гасова. Препоручује се мешавина $Ar + 1-3\% O_2$ или $Ar + 2,5\% CO_2$ за припоје и коренске заваре за аустенитне додатне материјале. За заваре испуне и покривне заваре препоручује се мешавина инертног и активног гаса $82\% Ar + 18\% CO_2$ за додатне материјале јачине као основни материјал.

Инертан гас пружа следеће предности:

- олакшава успостављање електричног лука,
- смањује прштање,
- потискује оксидацију i
- даје ефикаснију заштиту.

Активан гас има следеће предности:

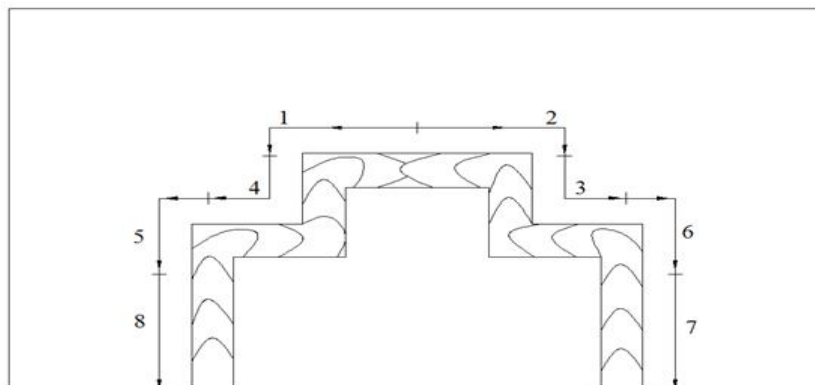
- даје стабилан лук,
- смањује порозност шавова i
- повећава дубину уваривања.

Недостатак активног гаса је повећано прштање металних капљица.

Код свих метода заваривања у заштитном гасу његов проток зависи од дате појединачне заваривачке ситуације с обзиром на врсту споја и дебљину материјала; проток заштитног гаса креће се у границама: 15 – 20 l/min.

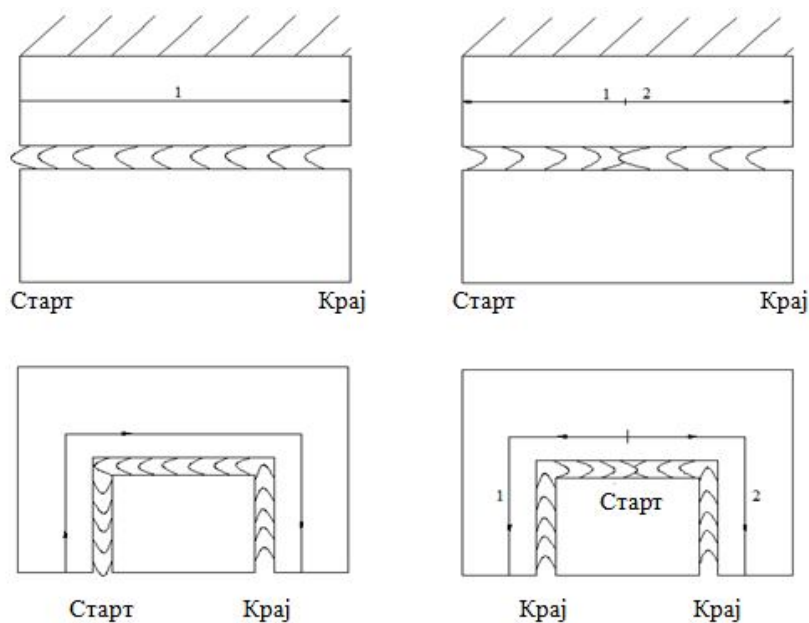
3.4.5. Редослед заваривања и величина зазора у споју

Заваривање неке конструкције од WELDOX челика потребно је да се увек изводи од средине шавова према слободним крајевима, а не обрнуто (сл. 3.6.).



Слика 3.6. Пример добро изабраног редоследа заваривања;
1 – заваривање увек изводити од средине према слободним крајевима,
2 – почетак и крај заваривања никада не позиционирати на угловима

Стартовање и заустављање при заваривању никако не треба да се изводи на углу. Почетак и крај заваривања морају бити најмање 50 – 100 mm удаљени од угла. На почетку заваривања могуће је да се појаве гасни мехурови и укључци троске, а на крају кратери и прслине. Ово су недозвољене грешке у зони концентрације напона. Приликом формирања завареног споја потребно је да увек постоји зазор од највише 3 mm.



Слика 3.7. Примери побољшања редоследа заваривања

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСПИТИВАЊА

4.1. ТЕХНОЛОГИЈА ЗАВАРИВАЊА ЧЕЛИКА ПОВИШЕНЕ ЈАЧИНЕ S690 QL (WELDOX 700)

ГОША ФОМ – СМЕДЕРЕВСКА ПАЛАНКА

У фирми ГОША ФОМ (Смед. Паланка), израђивана су два склопа од челика повишене јачине S690 QL (WELDOX 700).

Главни елементи првог склопа су:

- основна плоча, дебљине 50 mm,
- вертикални лимови, дебљине 12 mm, четири комада.

На основну плочу, осно симетрично, лево и десно од осе постављају се по два вертикална лима на међусобном растојању од 20 mm. Позиционирање вертикалних лимова на основну плочу изводи се помоћу „слотова“, који се убацију у овалне отворе на основној плочи. Спољашњи вертикални лимови се помоћу „К“ споја заварују за основну плочу, а унутрашњи помоћу „1/2 V“ споја.

Други склоп састоји се од следећих главних позиција:

- доња плоча, дебљине 15 mm,
- вертикални лимови, дебљине 8 и 10 mm
- горња плоча, дебљине 30 mm.

Са доње стране доње плоче поставља се прстен и заварује се за њу помоћу „К“ споја. Са горње стране доње плоче постављају се вертикални лимови и горња плоча. Као и на првом склопу позиционирање вертикалних лимова за доњу плочу изводи се помоћу „слотова“ и овалних отвора. Вертикални лимови су са унутрашње стране ојачани ребрима, дебљине 8 mm. Ребра се за вертикалне лимове заварују угаоним шавовима, а вертикални лимови за доњу плочу помоћу „Х“ шава. Горња плоча за вертикалне лимове заварује се помоћу „Х“ шава.

Технологија заваривања главних спојева на ова два склопа биће описана у овом раду. Поред наведених, склопове чине и друге позиције које нису значајне за тему.

4.1.1. Основни материјал

Основни материјал наведених позиција ова два склопа је челик повишене јачине WELDOX 700 произведен у Шведској.

4.1.2. Избор поступка и технологије заваривања

Заваривање наведених склопова се изводи у радионичким условима. Основни материјал је челик повишене јачине S690 QL произвођачког назива WELDOX 700, склон хладним прслинама. Ова два склопа улазе у састав објекта који ради у условима изузетно великих ударних оптерећења. Имајући ово у виду, као поступак заваривања одабрана је комбинација РЕЛ (111) и МАГ (135) поступка. РЕЛ поступком се заварују сви припојни шавови и коренски пролази, а МАГ поступком завари попуне.

4.1.3. Додатни материјал

4.1.3.1. Електрода

За заваривање припојних и коренских пролаза коришћена је аустенитна, базична електрода следећих класификација (таб. 4.1. и таб. 4.2.):

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 B 18/8/6, произвођач „Јесенице“, Словенија. Коришћени пречник електроде је 3,25 mm.

Табела 4.1. Хемијски састав чистог метала шава у %

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

Табела 4.2. Механичке карактеристике чистог метала шава

R _{p0,2} , MPa	R _m , MPa	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 (T = 100°C) тоболце од стране заваривача.

4.1.3.2. Пуна жица

За заваривање пролаза попуне коришћена је пуна жица легирана Mn, Ni и Mo, пречника 1,2 mm, намењена за заваривање финозрних челика повишене јачине са напоном течења не мањим од 690 MPa следећих класификација (таб. 4.3 и таб. 4.4.): EN 12534 Mn3Ni1CrMo; AWS A5.28 ER100C-1; EN ISO 16834-A G69 4 Mn 3 NiCrMo.

Трговачки назив ове пуне жице је MIG 75, произвођач „Јесенице“, Словенија.

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

Табела 4.3. Хемијски састав чистог метала шава у %

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

Табела 4.4. Механичке карактеристике чистог метала шава

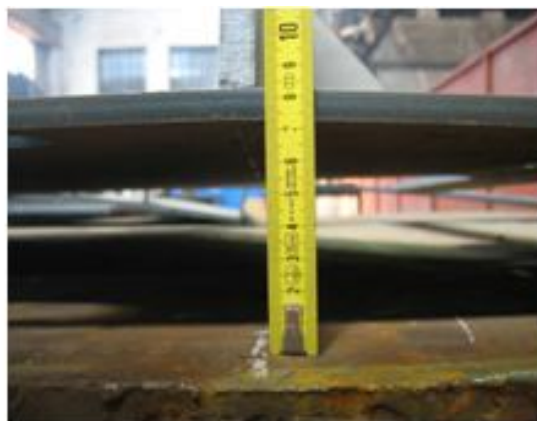
R _{p0,2} , MPa	R _m , MPa	A ₅ , %	KV (–40°C) J
> 690	770 – 940	> 17	> 47

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 наведени склопови у току експлоатације, а остатак шава по јачини одговара основном материјалу.

4.1.4. Припрема позиција и жлебова за заваривање

Основна плоча првог склопа, дебљине 50 mm, и прстен у развијеном стању (за други склоп), дебљине 25 mm, су исечени из табли лима у радионици припремних радова на програмској машини за плазмено сечење. Основна плоча је, затим, машински обрађена на програмској глодалици на димензије према цртежу увећане за технолошке додатке за машинску обраду после заваривања. Коначан облик прстен је добио савијањем на ваљцима. Косине за технолошки наставак („Х“ шав) на прстену израђене су гасним сечењем, а затим ручном брусилицом обрађене до металног сјаја. Косине на прстену за „К“ спој обрађене су машински на вертикалном стругу. Остале наведене позиције оба склопа исечене су на ласерској машини за сечење у кооперацији. Машинском обрадом на глодалици обрађене су косине жлебова за заваривање. Жлебови су, према стандарду EN ISO 9692, прописани од стране одговорних пројектаната и усаглашени између надзора и инжењера за заваривање. Спољашњи вертикални лимови су припремљени за заваривање као „К“ спој. Зазор у корену између вертикалних лимова и основне плоче износио је 2–3 mm.



Слика 4.1. Претходно савијени лимови



Слика 4.2. Обележавање редоследа заваривања

Унутрашњи лимови, који се налазе на растојању од 20 mm у односу на спољашње, припремљени су за заваривање на следећи начин: затупљење у корену на страни спољашњих вертикалних лимова износило је 1 mm и скинута је косина од 50°. Зазор између унуташњег вертикалног лима и основне плоче износио је 4 mm због заваривања са проваром.

Вертикални лимови другог склопа, после постављања ребара, а пре почетка заваривања су претходно савијени на хидрауличкој преси ради смањења деформација које настају при међусобном заваривању. У зависности од броја ребара и укупне дужине завареног споја, тј од количине додатног материјала и унете количине топлоте при заваривању, вертикални лимови су различито претходно савијени.

4.1.5. Температура предгревања и међупролазна температура

Усвојена температура предгревања за оба склопа износила је $T_p = 200^\circ\text{C}$. Међупролазна температура је одржавана у интервалу 200 – 225°C.

4.1.6. Количина унете енергије

Погонска (линијска) енергија заваривања је један од најважнијих елемената технологије заваривања челика повишене јачине. У директној је вези са основним параметрима заваривања (U , I , v_z), а такође, утиче на механичка својства (KV , $R_{p0,2}$) челика повишене јачине. Препоручене вредности погонске енергије заваривања за челике повишене јачине су $q_l = 13\text{--}17 \text{ kJ/cm}$. При овим вредностима челици повишене јачине после заваривања задржавају непромењене механичке особине.

4.1.7. Параметри заваривања

Да би се вредност погонске енергије одржала у препорученим границама било је потребно је да се изврши заваривање са следећим вредностима параметара:

Коренски пролази – РЕЛ заваривање

- струја заваривања (I): 120 – 140 A
- радни напон (U): 24 – 26 V
- брзина заваривања (v_z): 0,2 – 0,3 cm/s



Слика 4.3. Заваривање у алату

Завари попуње – МАГ заваривање

- струја заваривања (I): 240 – 250 А
- радни напон (U): 24 – 26 V
- брзина заваривања (v_z): 0,35 – 0,45 cm/s

Технологија заваривања ГОША ФОМ а.д. за све наведене спојеве израдила је технолошке листове заваривања који су дати као прилог овој технологији заваривања.



Слика 4.4. Жлебљење коренског пролаза графитном електродом

4.1.8. Контрола процеса заваривања

Контрола процеса заваривања одвијала се у три фазе:

- контрола пре почетка заваривања,
- контрола у току заваривања и
- контрола после заваривања.

Контрола пре почетка заваривања обухвата:

- увид у атесте о квалитету основног, додатног и помоћних материјала,
- контролу геометријских мера пре заваривања,
- проверу геометријских облика жлебова,
- проверу чистоће жлебова и њихове околине, односно површина за заваривање,
- контролу температуре предгревања,
- проверу уверења о квалifikацији заваривача,

- проверу предузетих мера обезбеђења сигурности при раду и
- проверу да ли су сви учесници упознати са технологијом заваривања.

Контрола у току заваривања обухвата:

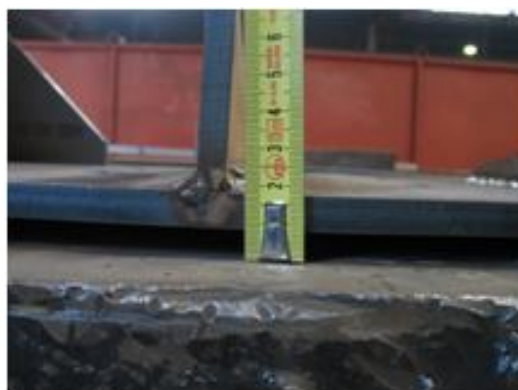
- проверу параметара заваривања,
- проверу начина и редоследа извођења заваривања,
- проверу температуре предгревања и
- проверу међупролазне температуре.



Слика 4.5. Успорено хлађење после заваривања

Контрола после заваривања обухвата:

- димензиону контролу геометријских мера оба склопа,
- визуелно – димензиону контролу заварених спојева у обиму 100%,
- површинску контролу заварених спојева и
- дубинску контролу заварених спојева.



Слика 4.6. Деформације основног материјала после заваривања

4.1.9. Контрола заварених спојева

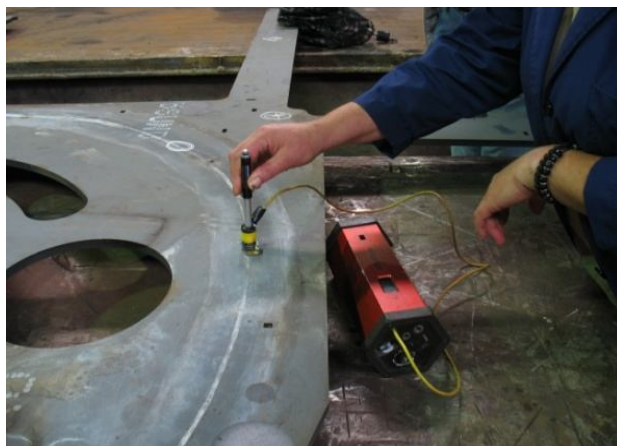
Сви наведени спојеви оба склопа изузев угаоних спојева ребара на вертикалним лимовима другог склопа су изузетно одговорни и као такви су нивоа квалитета C (SRPS ISO 5817).



Слика 4.7. Ултразвучно испитивање

Прописани обим испитивања за ниво квалитета С је:

- визуелно–димензиона контрола 100%,
- пенетранска контрола 100%,
- ултразвучна контрола 100%.



Слика 4.8. Мерење тврдоће

Контролу ових спојева су обавили контролори Института „Кирило Савић“ из Београда, као овлашћена и одабрана институција од стране инвеститора.

Прописани обим испитивања за ниво квалитета D је:

- визуелно–димензиона контрола 100%,
- пенетранска контрола 100%.

Контролу ових спојева су интерно изводили контролори ГОША ФОМ.

Обим контроле заварених спојева садржан је у технолошком листу за заваривање за сваки наведени спој појединачно.



Слика 4.9. Пенетрантска контрола

4.1.10. Коментар

Технологија заваривања за два склопа од челика повишене јачине S690 QL (WELDOX 700) прописана је од стране надзорног органа за заваривање и одобрена од инвеститора. ГОША ФОМ а.д. је прихватила ову технологију као већ проверену и по њој заварила наведене склопове. Задатак ГОША ФОМ био је да са овом технологијом заваривања упозна и обучи све потребно особље како би склопови били квалитетно заварени. После завршеног заваривања, испитивања заварених спојева и завршне машинске обраде склопови су предати инвеститору и уграђени у производ. Сваки појединачни производ инвеститор је подвргавао пробном испитивању, а самим тим и заварене склопове.

За време заваривања склопова комбинованим поступком РЕЛ / МАГ јавили су се знатни проблеми при наношењу коренских пролаза електродом INOX В 18/8/6 пречника 3,25 mm.

У току заваривања са овом електродом уочили су се следећи проблеми:

- у нижем режиму рада, одн. са струјом на доњој граници опсега (~115 – 120 А) добија се изузетно грбав и нераван изглед шавва. Све те неравнине је изузетно тешко „испеглати“ ручном брусилицом, одн. исправити пре наношења следеће гусенице. Дубина уваривања је мала и недовољна;

- ако се пак ради у вишем режиму рада (да би се добила задовољавајућа дубина уваривања), односно са струјом на горњој граници опсега (~135 – 145 А) отприлике на половини дужине, електрода се усија и у том тренутку заваривач практично изгуби контролу над електричним луком;
- шљака не излази на површину металног купатила, већ остаје заробљена и то нарочито на линији стапања. Уклањање шљаке постаје тежак и мукотрпан посао, а познато је да су сви укључци шљаке видљиви при ултразвучном испитивању и спадају у недозвољене су грешке;
- дубина уваривања овом електродом и поред остављеног зазора од $2,5 \div 3$ mm у корену је недовољна. Не гарантује заваривање првог, коренског, пролаза са проваром. Потребно је обавезно жлебљење графитном електродом, а затим (због наугљеничавања) брушење ручном брусилицом до металног сјаја;
- обавезно је брушење наставака;
- услед наведених проблема при заваривању овом електродом, продуктивност постаје јако ниска.

Као решење, од стране технологије заваривања, предложено је да се заваривање коренских завара (пролаза) убудуће уместо електродом изводи пуњеном жицом. Међутим, РЕЛ / МАГ поступак је био верификован и одобрен од стране стручног надзора инвеститора. Оправданост измене поступка се морала доказати кроз експериментална испитивања.

Уместо базичне аустенитне електроде INOX В 18/8/6 пречника 3,25 mm, предложена је измена додатног материјала за коренски пролаз према стандарду:

EN ISO 17633 – А: 2006: Т 18 8 Мп R М 3 (Т 18 8 Мп R C 3) и

AWS A5.22 – 10: E307T0 – G, рутилно пуњена жица, трговачког назива А 7 – FD, произвођач BÖHLER (таб. 4.5. и таб. 4.6.). Коришћени пречник пуњене жице је 1,2 mm.

Табела 4.5. Хемијски састав чистог метала шава у %

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

Механичке карактеристике добијене су при испитивању завареног споја насталог у заштити мешавине M21 (EN 14175) односно Ar + 18% CO₂.

Табела 4.6. Механичке карактеристике чистог метала шава

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 $15 \div 18$ l/min.

4.2. ПРВО ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСПИТИВАЊЕ ЗАВАРЕНИХ УЗОРАКА

Извршено је заваривање две испитне плоче у ГОША – ФОМ-у. Основни материјал је WELDOX 700, а димензије плоча су $\neq 15 \times 240 \times 390$ mm (две плоче).

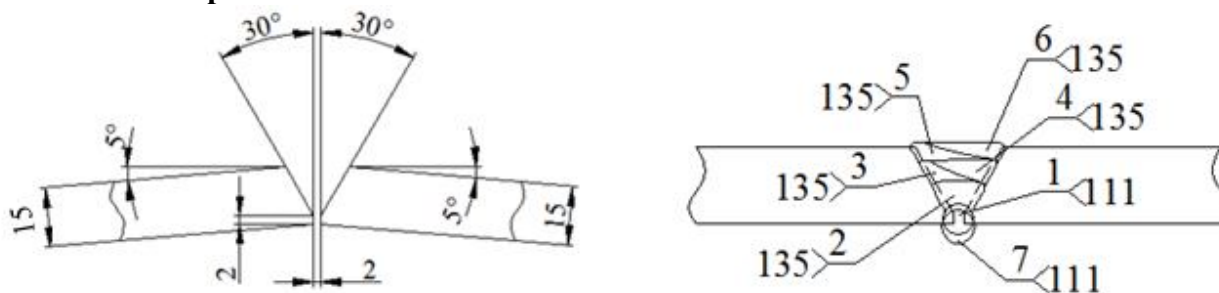
Прва испитна плоча је заварена коришћењем РЕЛ / МАГ поступка са електродом INOX В 18/8/6 пречника 3,25 mm (коренски пролаз) и пуном жицом MIG 75 пречника 1,2 mm (пролази попуне) у заштити мешавине $Ar + 18\% CO_2$.

Друга испитна плоча заварена је коришћењем МАГ / МАГ поступка са пуњеном жицом А 7 – FD пречника 1,2 mm (коренски пролаз) у заштитној атмосфери CO_2 , а за пролазе попуне коришћена је пуна жица MIG 75 пречника 1,2 mm у заштити мешавине $Ar + 18\% CO_2$. Заштита коренских пролаза је одабрана из економских разлога, јер у овој фабрици већ постоји централни разводни систем CO_2 па се набавка боца мешавине $Ar + 18\% CO_2$ сматрала непотребном.

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

4.2.1. Припрема и заваривање испитних плоча

4.2.1.1. Прва испитна плоча

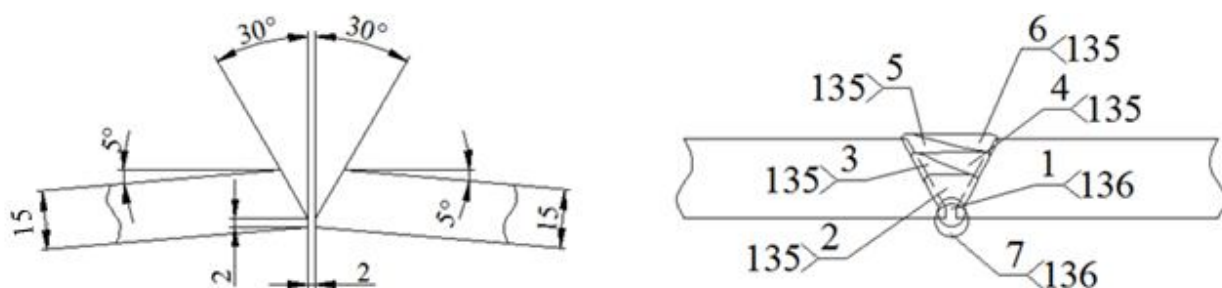


Слика 4.10. Припремна плоча за заваривање и распоред уношења пролаза

Табела 4.7. Параметри заваривања - 1. плоча

Завар бр.	Пос.	Додатни материјал / пречник	Струја, А	Напон, V	Брзина заваривања cm/min	Енергија заваривања 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	120	22	14,13	8,97

4.2.1.2. Друга испитна плоча



Слика 4.11. Припремна плоча за заваривање и распоред пролаза

Табела 4.8. Параметри заваривања - 2. плоча

Завар бр.	Пос.	Додатни материјал / пречник	Струја, А	Напон, V	Брзина заваривања cm/min	Енергија заваривања kJ/cm
1.	136	A 7 – 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	A 7 – FD / 1,2	234	23	20,7	13,26

Припрема жлеба испитних плоча извршена је машинским путем на глодалици. Пре почетка заваривања плоче су претходно савијене у циљу смањења деформација које настају при заваривању услед унете количине топлоте. Параметри заваривања који су коришћени одабрани су тако да је унета количина енергије у препорученим границама.

4.2.2. Испитивање заварених плоча

4.2.2.1. Испитивање без разарања

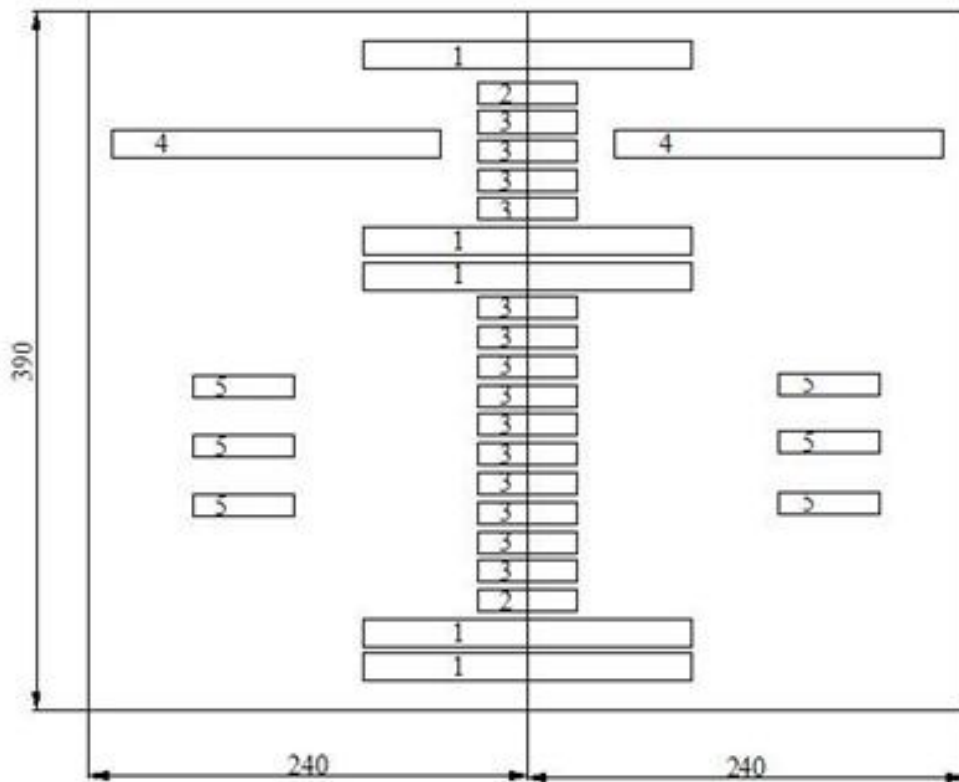
Заварене испитне плоче испитане су ултразвуком од стране интерне фабричке контроле. Том приликом је установљено да не постоје недозвољене грешке у завареним спојевима. Следећи корак у испитивању је испитивање са разарањем.

4.2.2.2. Испитивање са разарањем

Метод испитивања са разарањем подразумевају израду одговарајућих епрувета направљених из испитних плоча. За верификацију нове технологије заваривања потребно је да се ураде следећа испитивања:

- испитивање затезањем завареног споја,

- испитивање затезањем основног материјала,
- испитивање жилавости завареног споја,
- испитивање жилавости основног материјала и
- макро, микро испитивање и мерење тврдоће.

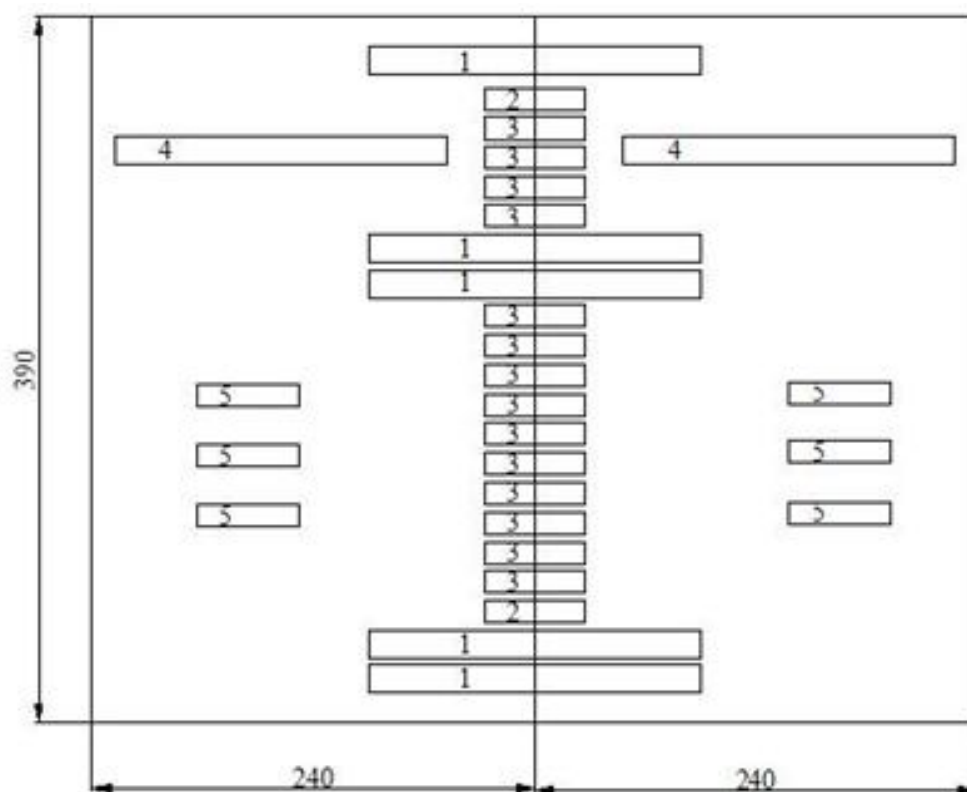


1. Затезање – заварени спој
2. Макро, микро и тврдоћа – заварени спој
3. Жилавост – заварени спој
4. Затезање – основни материјал
5. Жилавост – основни материјал

Слика 4.12. План израде епрувета из прве испитне плоче

Да би се доказало да нова технологија (друга испитна плоча) има боље резултате, неопходно је да се добијени резултати упореде са резултатима испитивања старе технологије (прва испитна плоча).

Израда епрувета извршена је према унапред одређеном плану, за обе плоче, насталим на основу димензија епрувета и њиховог броја.



1. Затезање – заварени спој
2. Макро, микро и тврдоћа – заварени спој
3. Жилавост – заварени спој
4. Затезање – основни материјал
5. Жилавост – основни материјал

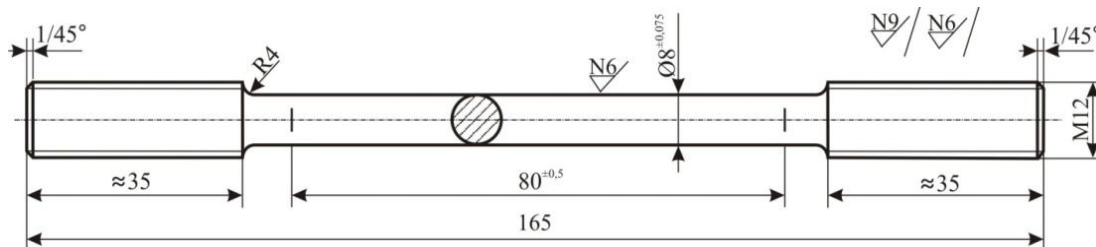
Слика 4.13. План израде епрувета из друге испитне плоче

4.2.2.2.1. Испитивање затезањем

Испитивање затезањем је најзначајнији начин испитивања материјала у циљу одређивања његових механичких својстава, као што су: напон течења $R_{p0,2}$ и затезна чврстоћа R_m . Истовремено са испитивањем својстава чврстоће можемо добити и податке о могућности деформисања материјала: издужење (A) и сужење (Z).

Заснива се на спором затезању узорка стандардног облика и димензија на уређају који се зове кидалица. Она 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 (затезна чврстоћа),
- 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.

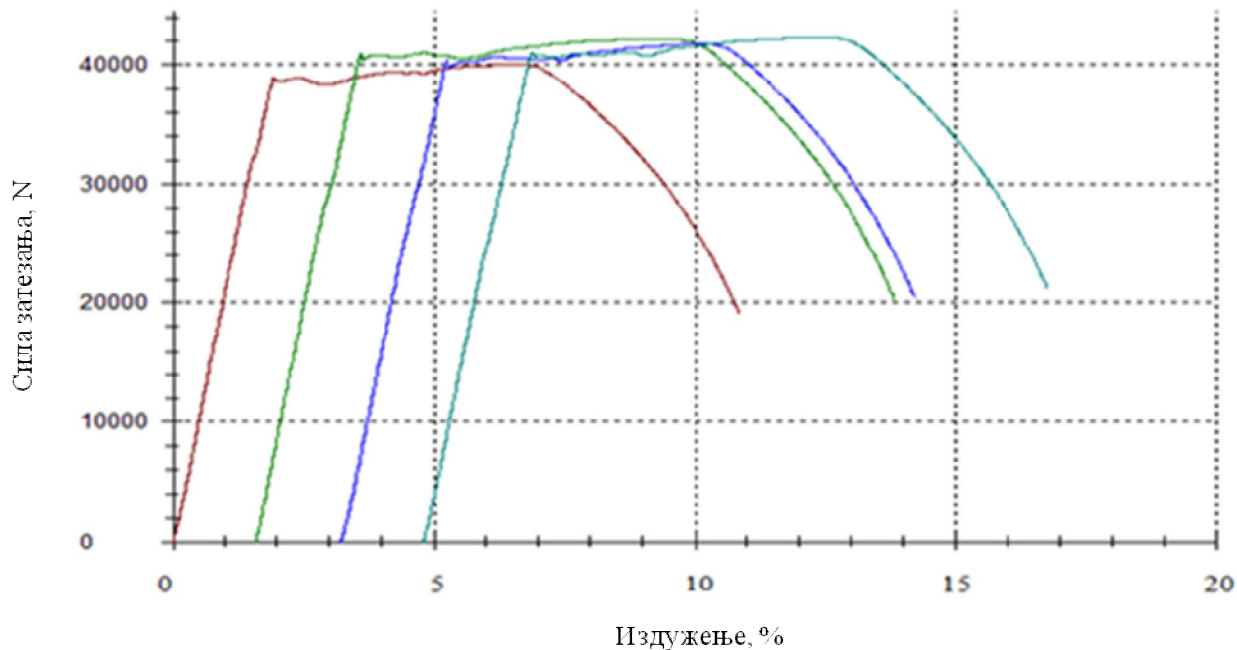


Слика 4.14. Изглед епрувете за испитивање затезањем

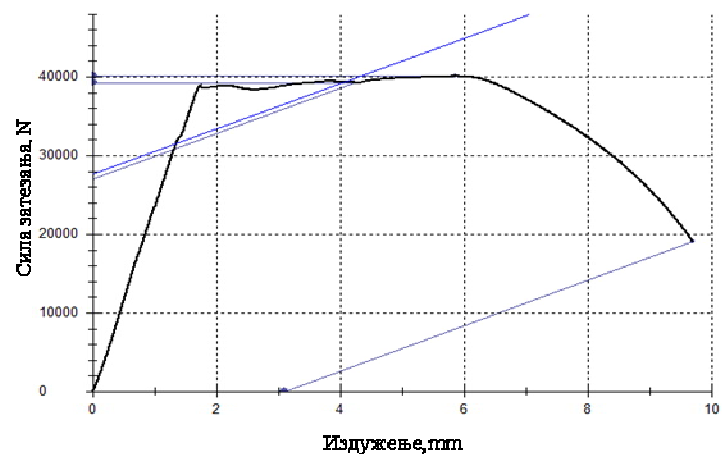
Епрувете за испитивање затезањем основног материјала и завареног споја се по облику и геометрији не разликују. Једина разлика је у томе што код епрувете за испитивање завареног споја у средини постоји заварен спој.

Табела 4.9. Експериментални резултати испитивања затезањем – ОМ (Weldox 700)

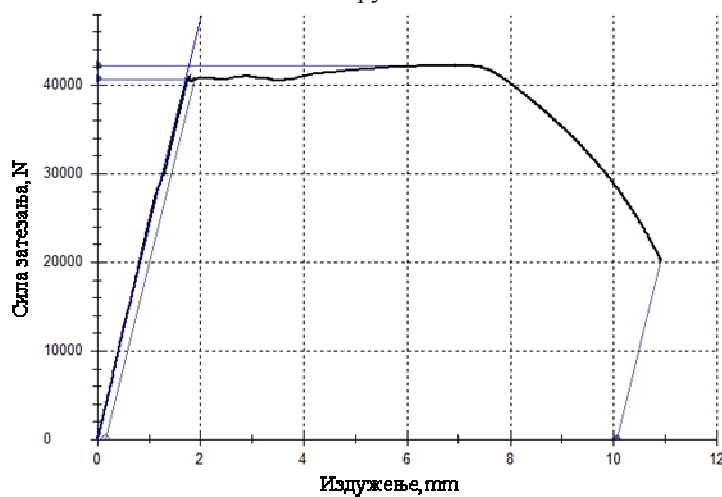
Број епрувете	l_0 , mm	S_0 , mm ²	$R_{p0,2}$, MPa	R_m , MPa	$A_{11,3}$, %
1.	89,28	50,27	781,94	797,81	14,19
2.	89,28	50,27	809,40	839,92	11,3
3.	89,42	50,01	800,41	835,52	9,98
4.	88,29	50,27	811,95	842,45	10,92



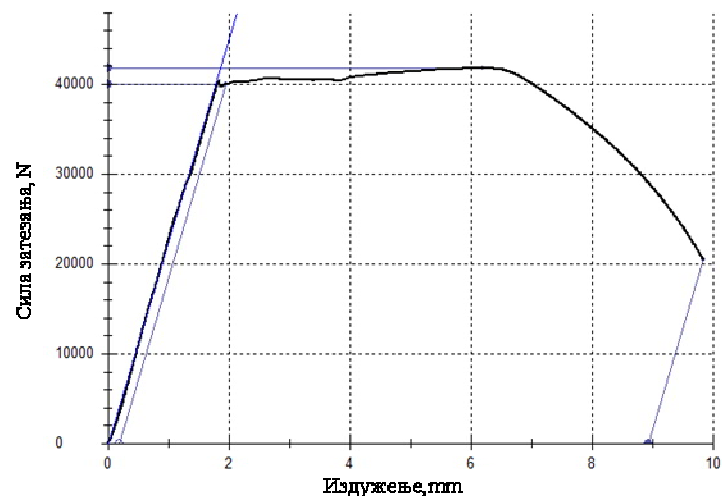
Слика 4.15. Збирни дијаграм затезања за четири епрувете – ОМ (Weldox 700)



Епрувета 1

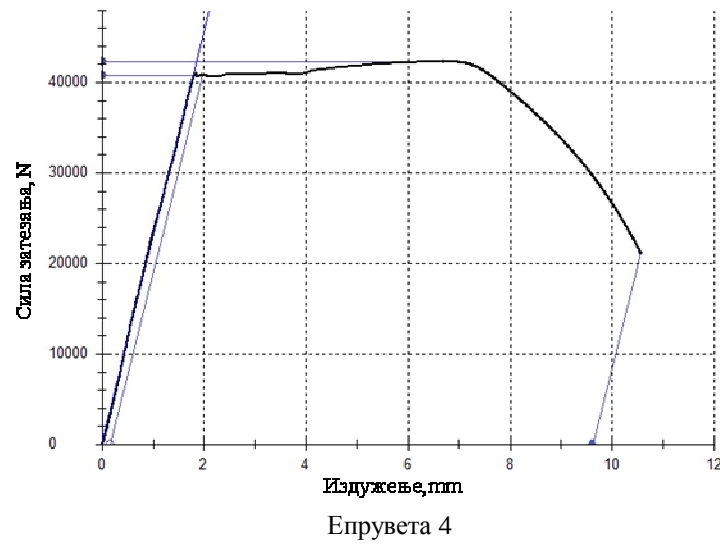


Епрувета 2

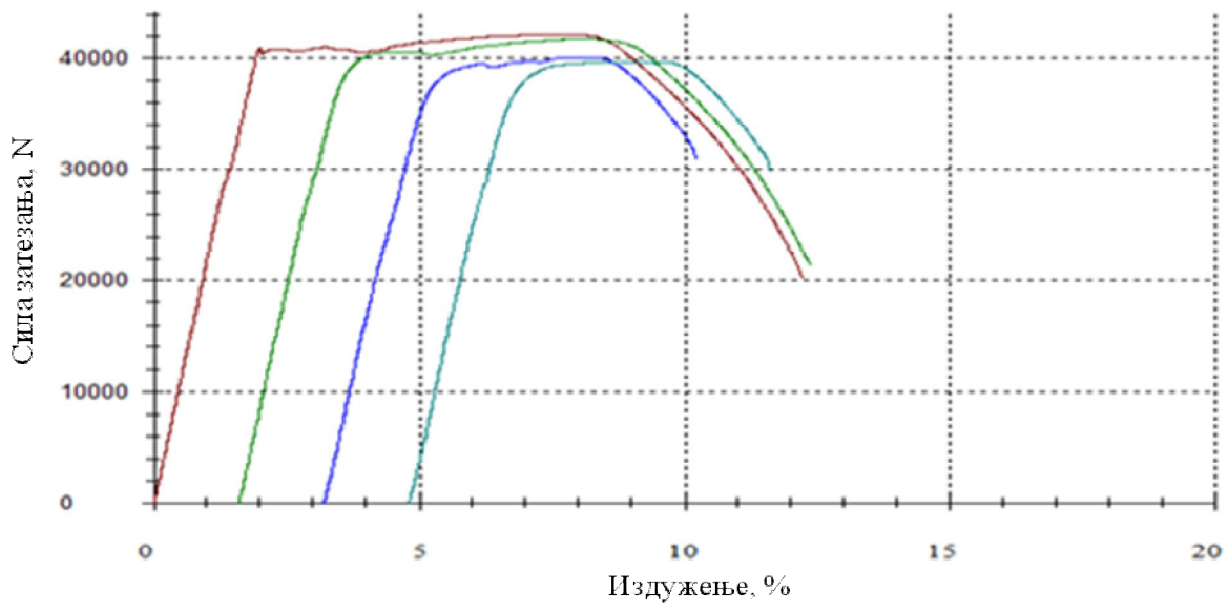


Епрувета 3

Слика 4.16. Дијаграми затезања за четири епрувете – OM (Weldox 700) / 1



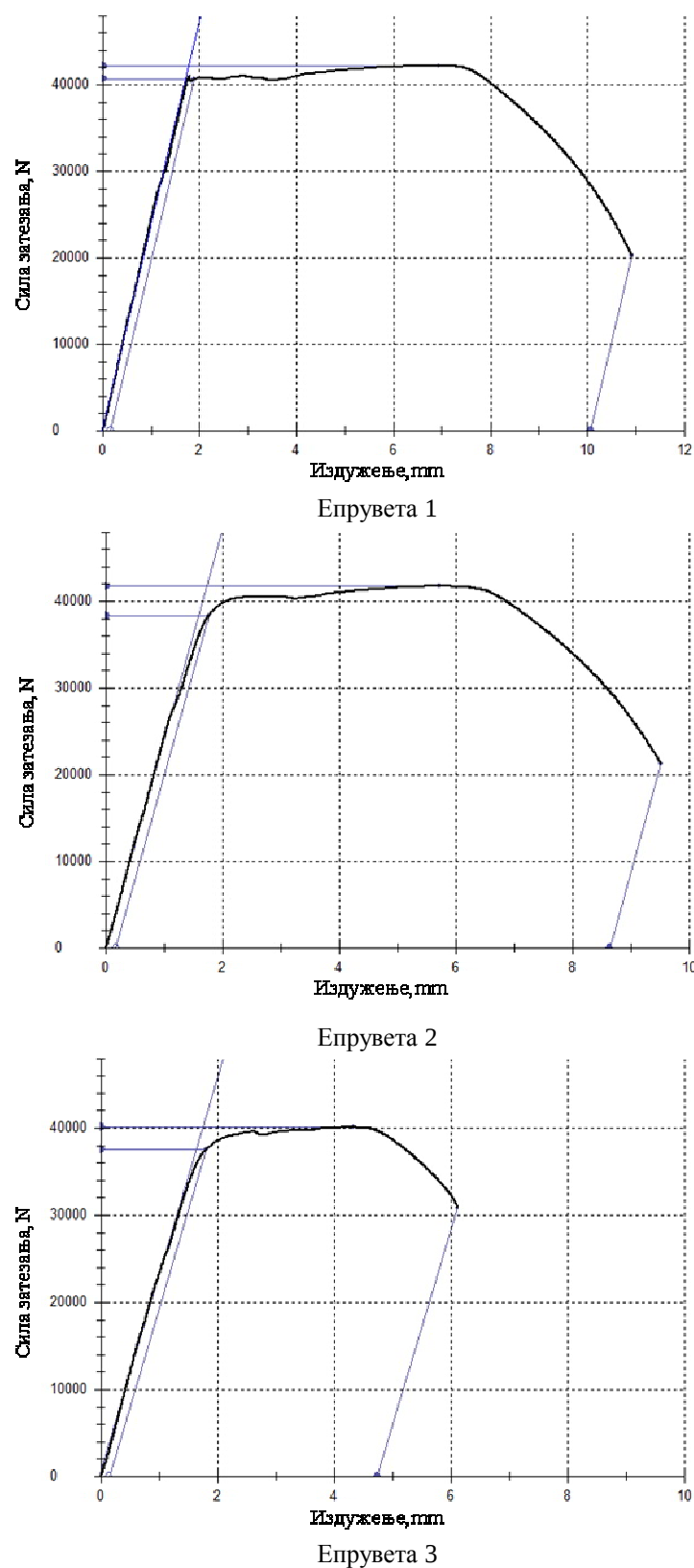
Слика 4.16. Дијаграми затезања за четири епрувете – OM (Weldox 700) / 2



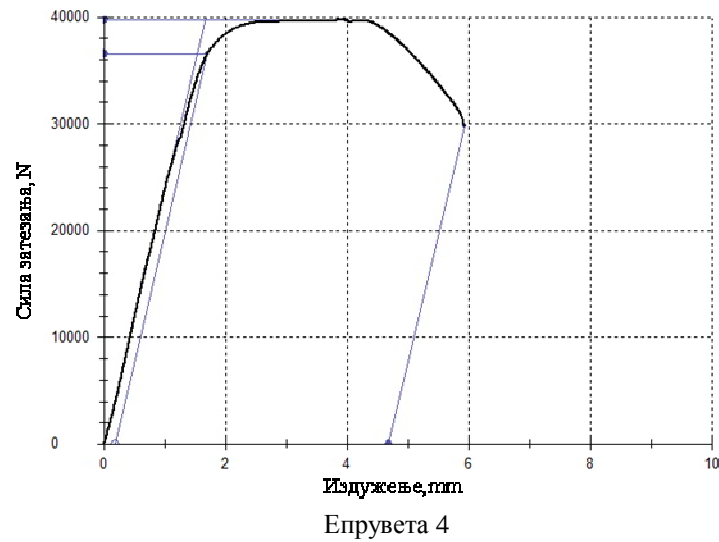
Слика 4.17. Збирни дијаграм затезања за четири епрувете – 3C плоча 1 (РЕЛ / МАГ)

Табела 4.10. Експериментални резултати испитивања затезањем – 3C плоча 1. (РЕЛ / МАГ)

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

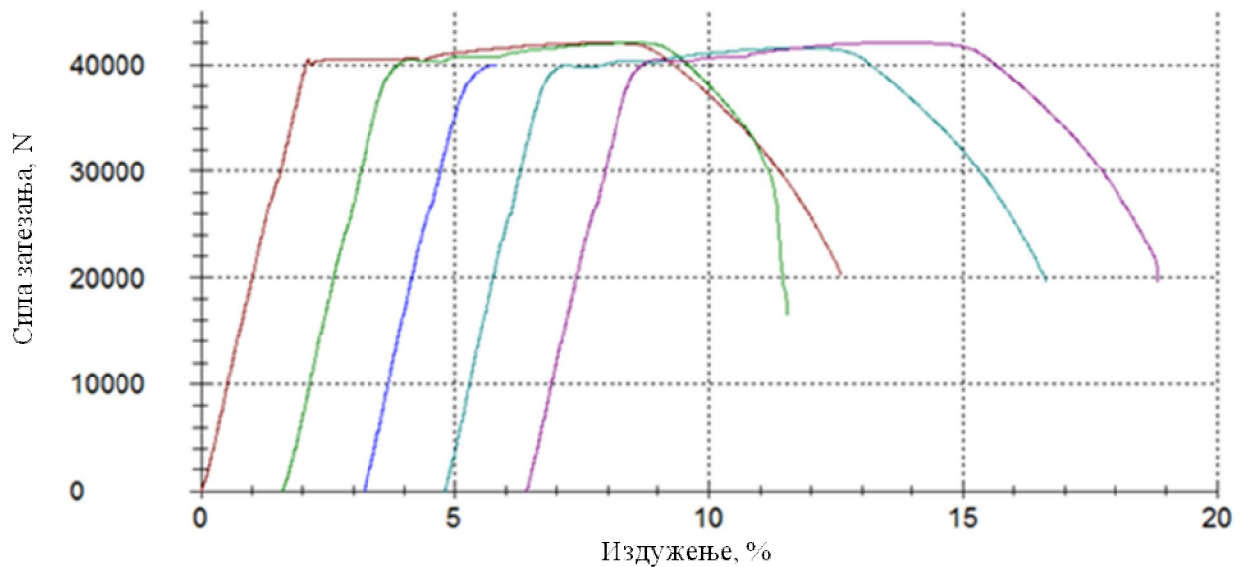


Слика 4.18. Дијаграми затезања за четири епрувете – ЗС плоча 1 (РЕЛ / МАГ) / 1

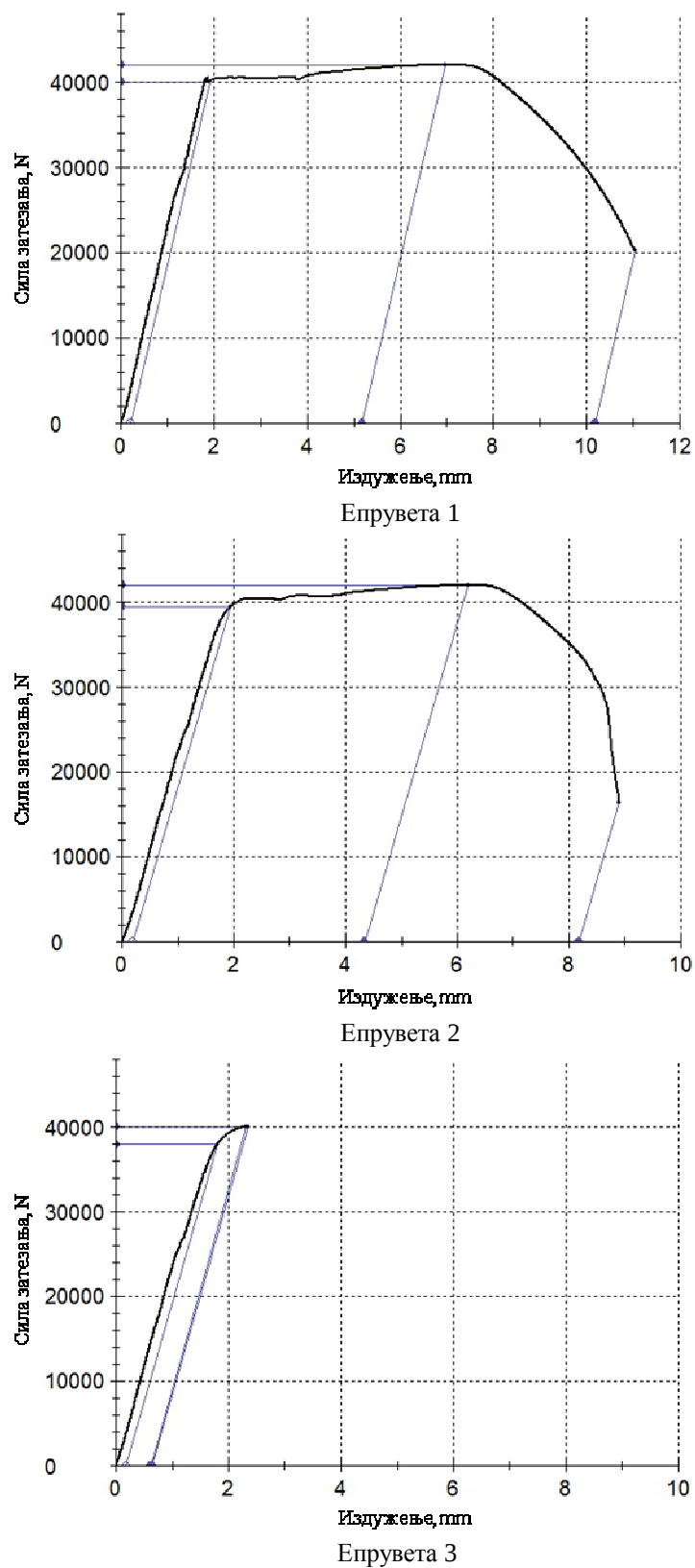


Слика 4.18. Дијаграми затезања за четири епрувете – ЗС плоча 1 (РЕЛ / МАГ) / 2

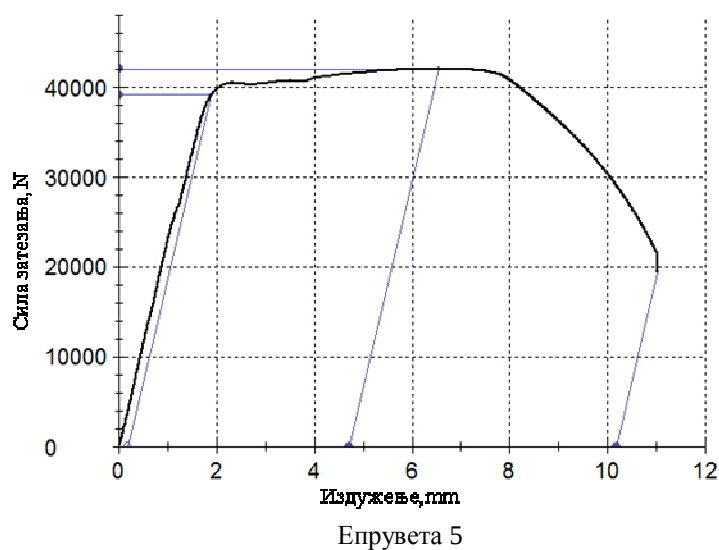
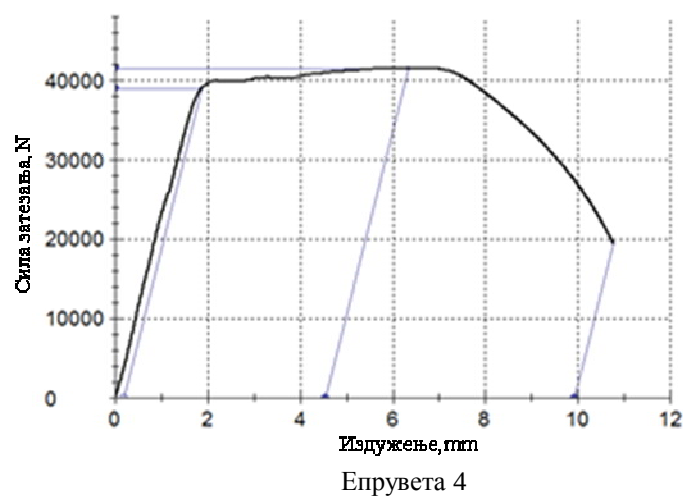
Затезање је извођено у акредитованој лабораторији на кидалици, мерног опсега $1 \div 100$ kN. Брзина деформисања износила је 10 mm/min.



Слика 4.19. Збирни дијаграм затезања за пет епрувета – ЗС плоча 2 (МАГ / МАГ)



Слика 4.20. Дијаграми затезања за пет епрувета – 3С плоча 2 (МАГ / МАГ) / 1

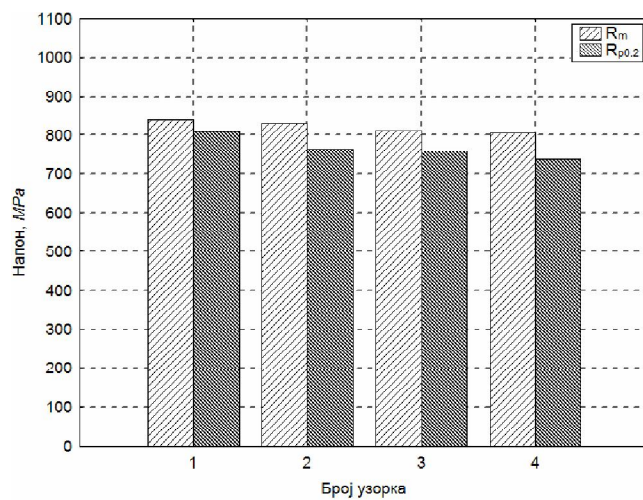


Слика 4.20. Дијаграми затезања за пет епрувета – 3С плоча 2 (МАГ / МАГ) / 2

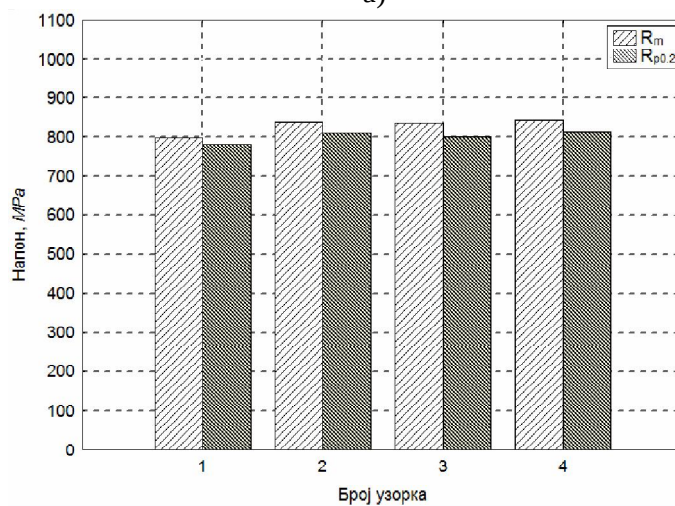
Табела 4.11. Експериментални резултати испитивања затезањем – 3С плоча 2. (МАГ / МАГ)

Број епрувете	l_0 , mm	S_0 , mm ²	$R_{p0,2}$, МПа	R_m , МПа	$A_{11,3}$, %
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

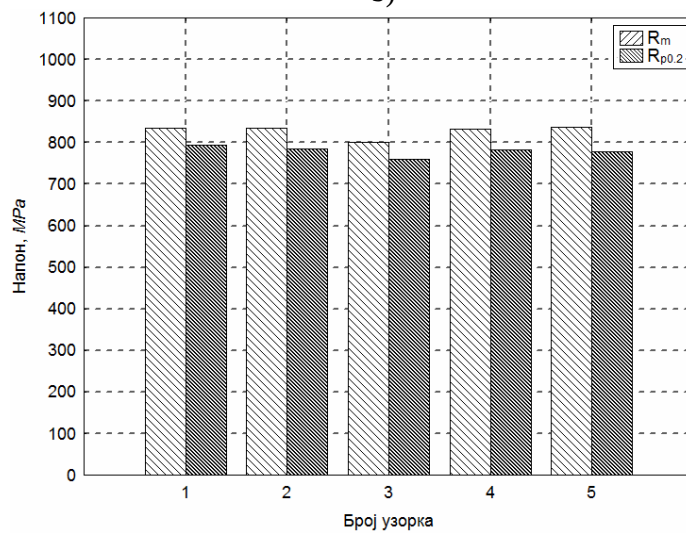
У највећем броју случајева лом епрувета се дешавао ван завареног споја.



a)



b)

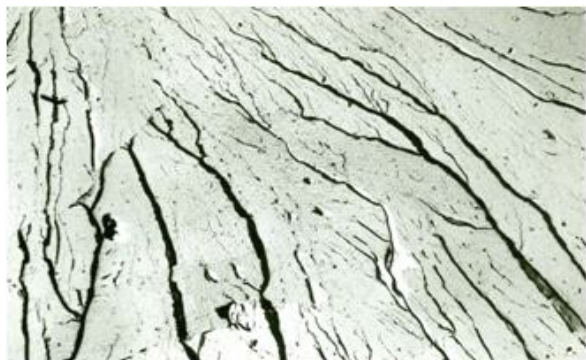


c)

Слика 4.21. Упоредни приказ вредности затезне јачине и напона течења ($T = 20^\circ\text{C}$):
 а) ОМ, б) заварен спој – плоча 1 (РЕЛ / МАГ) и с) заварен спој – плоча 2 (МАГ / МАГ)

4.2.2.2. Испитивање ударне жилавости

Испитивање ударне жилавости, зарезане епрувете по Шарпију је једно од најважнијих механичких метода испитивања материјала у експлоатационим условима, а служи за утврђивање његове отпорности према кртом лому.



Слика 4.22. Крти и жилав лом увећани под електронским микроскопом 10000х

Енергија утрошена 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 лoma услед разних дефеката у пракси.

Епрувете са V-зарезом (сл.4.23.) 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 до три исте епрувете (сл.4.24.) 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.

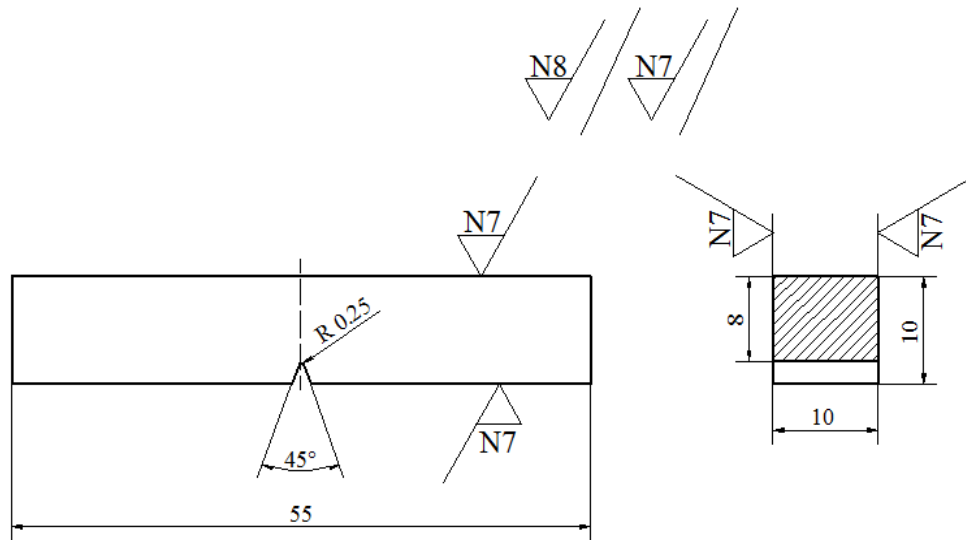
На жилавост материјала утиче низ фактора као што су:

- 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.

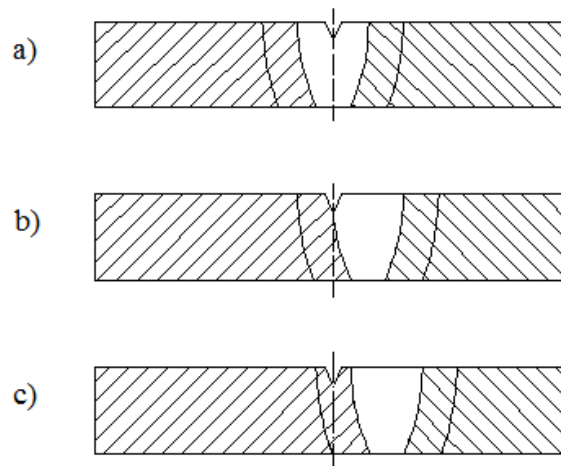
Микроструктура има велики утицај на жилавост материјала. Нарочито повољно утиче на жилавост смањивање величине зрна.

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



Слика 4.23. Епрувета за испитивање жилавости са V-зарезом (ОМ)

Димензије епрувете различито утичу на жилавост материјала. Најмање утиче дужина епрувете, док ширина и дебљина утичу слично на смањивање жилавости.

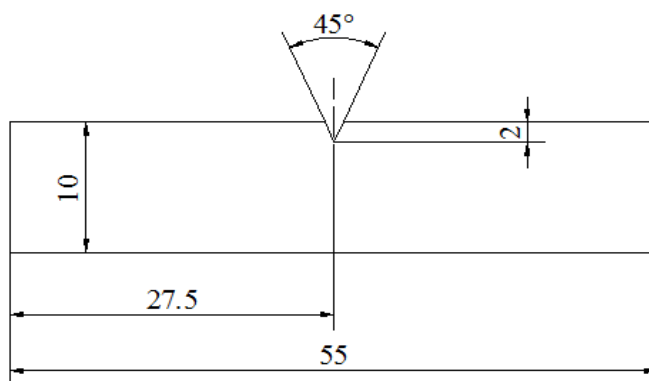


Слика 4.24. Распоред зареза на епруветама

- a) зарез у МШ,
- b) зарез у ЗС
- c) зарез у ЗУТ-у

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.

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



Слика 4.25. Изглед епрувете за испитивање ударне жилавости ОМ

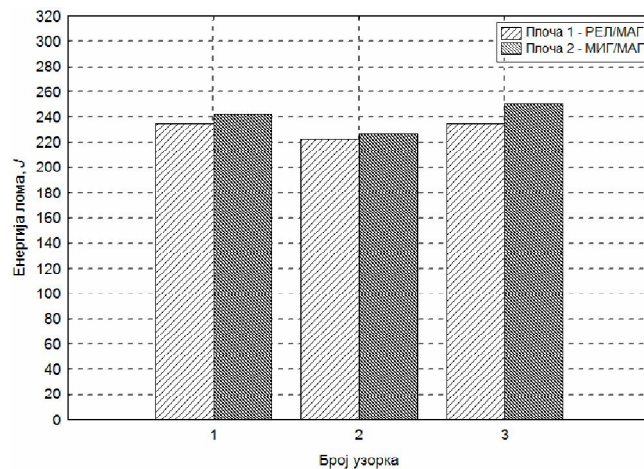
Рад утрошен за прелом епрувете (А0) добија се као разлика између расположивог рада (А1) и неутрошеног рада (А2).

Табела 4.12. Утрошене енергије лома и ударне жилавости ОМ на собној и сниженој температури

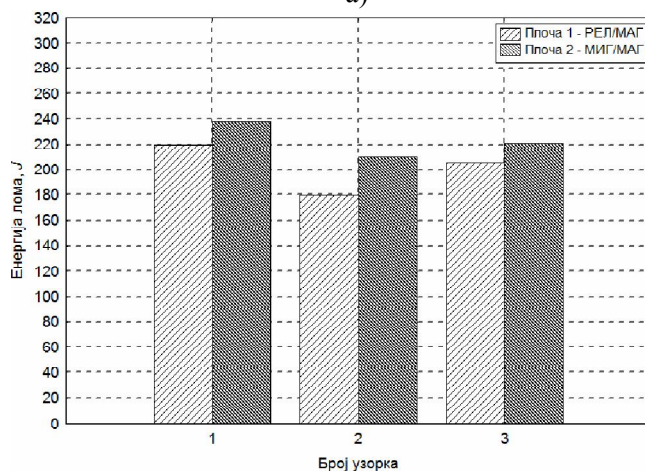
Врста материјала	Температура, °С	Број узорка	Енергија лома, J		Ударна жилавост, J /cm ²	
			Плоча 1 РЕЛ / МАГ	Плоча 2 МАГ / МАГ	Плоча 1 РЕЛ / МАГ	Плоча 2 МАГ / МАГ
WELDOX 700	+20	1.	235,17	242,02	293,96	302,52
		2.	222,44	226,19	278,05	282,74
		3.	234,68	250,89	293,34	313,61
	-40	1.	219,59	238,10	274,49	297,62
		2.	179,78	210,84	224,73	263,55
		3.	206,08	221,39	257,60	276,74

Жилавост се израчунава као утрошени рад по јединици површине, а изражава се у J/cm².

Испитују се сучеони спојеви (слика 4.24.), при чему се одређује жилавост у металу шава (а), на линији стапања (б) и у зони утицаја топлоте (ц).

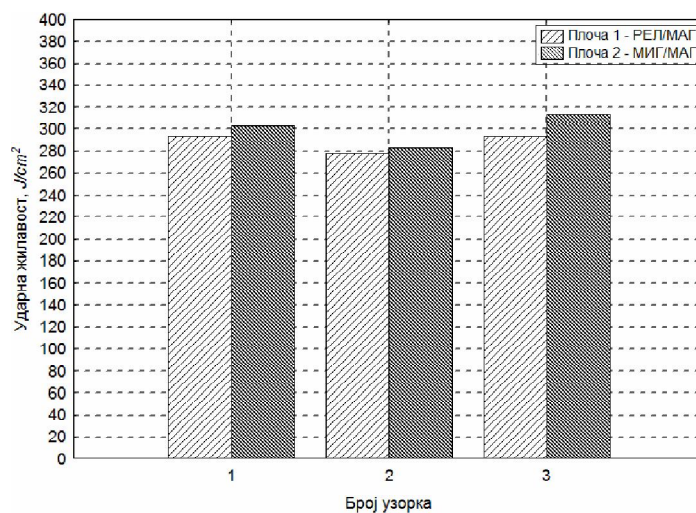


а)



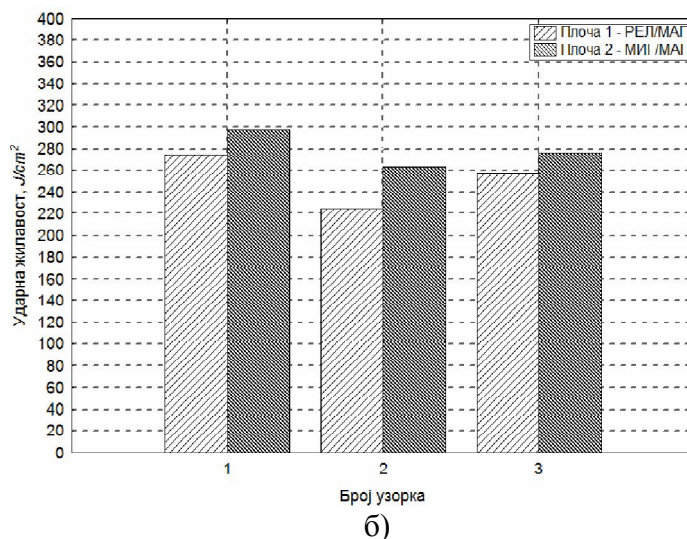
б)

Слика 4.26. Упоредни приказ вредности енергије лома – ОМ: а) $T = 20^{\circ}\text{C}$ и б) $T = -40^{\circ}\text{C}$

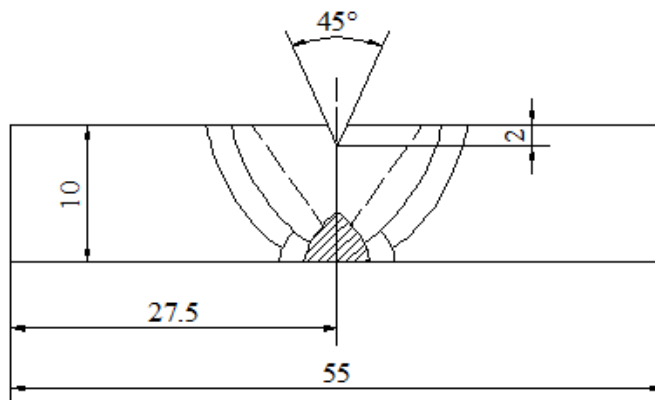


а)

Слика 4.27. Упоредни приказ вредности ударне жилавости – ОМ: а) $T = 20^{\circ}\text{C}$ и б) $T = -40^{\circ}\text{C}$ /1



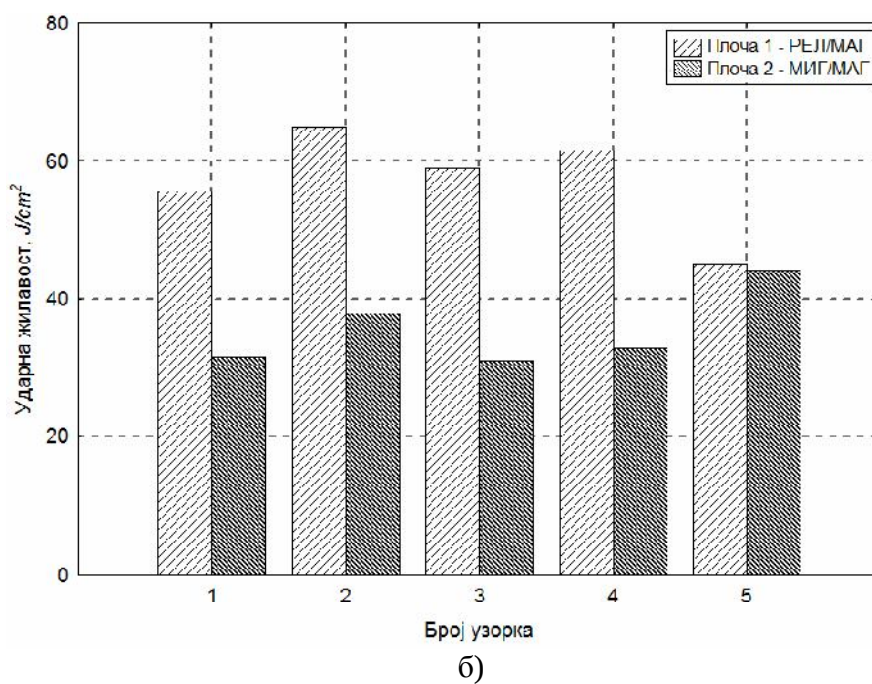
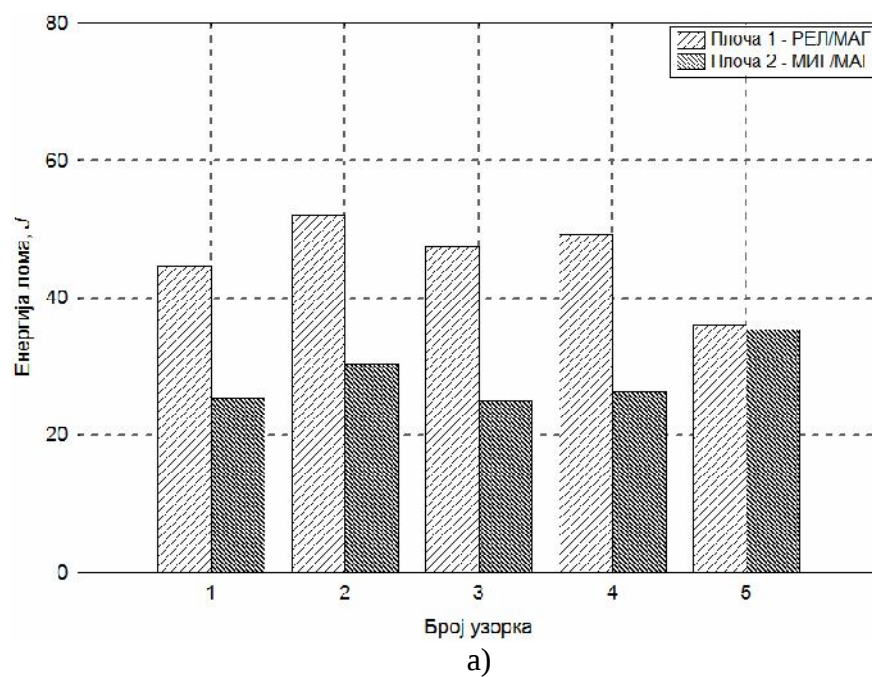
Слика 4.27. Упоредни приказ вредности ударне жилавости – ОМ: а) $T = 20^{\circ}\text{C}$ и б) $T = -40^{\circ}\text{C}$ /2



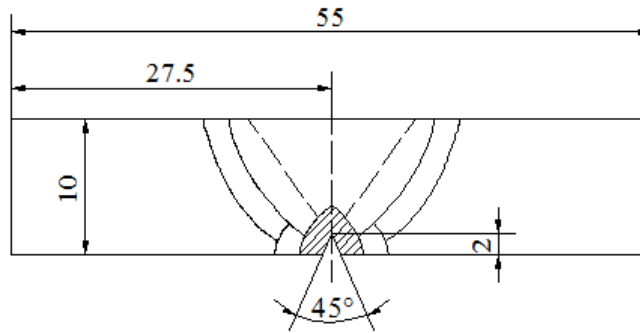
Слика 4.28. Изглед епрувете за испитивање ударне жилавости лица шави

Табела 4.13. Утрошене енергије лома и ударне жилавости лица шави на собној температури

Врста материјала	Температура, $^{\circ}\text{C}$	Број узорка	Енергија лома, J		Ударна жилавост, J /cm ²	
			Плоча 1 РЕЛ / МАГ	Плоча 2 МАГ / МАГ	Плоча 1 РЕЛ / МАГ	Плоча 2 МАГ / МАГ
WELDOX 700	+20	1.	44,54	25,27	55,68	31,58
		2.	52,05	30,23	65,07	37,78
		3.	47,31	24,84	59,14	31,05
		4.	49,21	26,29	61,52	32,87
		5.	35,95	35,30	44,94	44,13



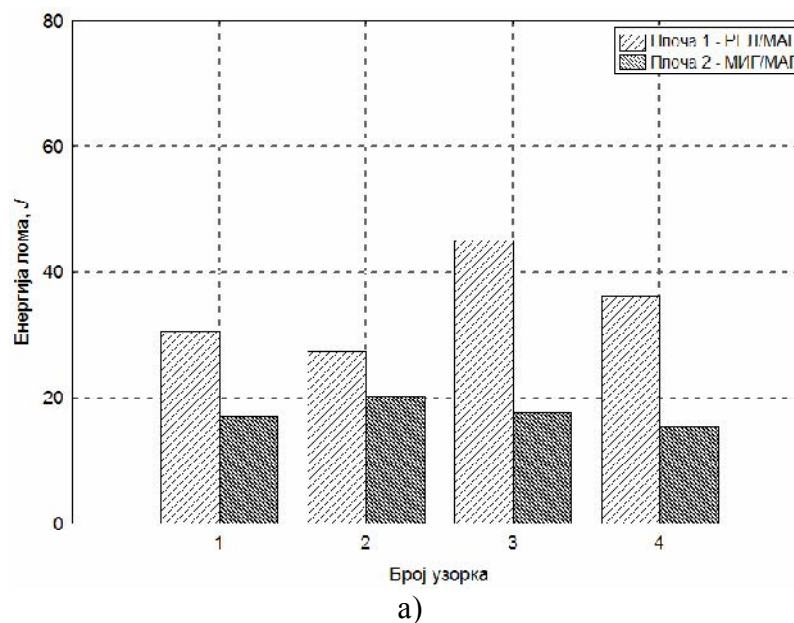
Слика 4.29. Упоредни приказ вредности – лице шава ($T = 20^{\circ}\text{C}$): а) енергија лома, б) ударна жилавост / 2



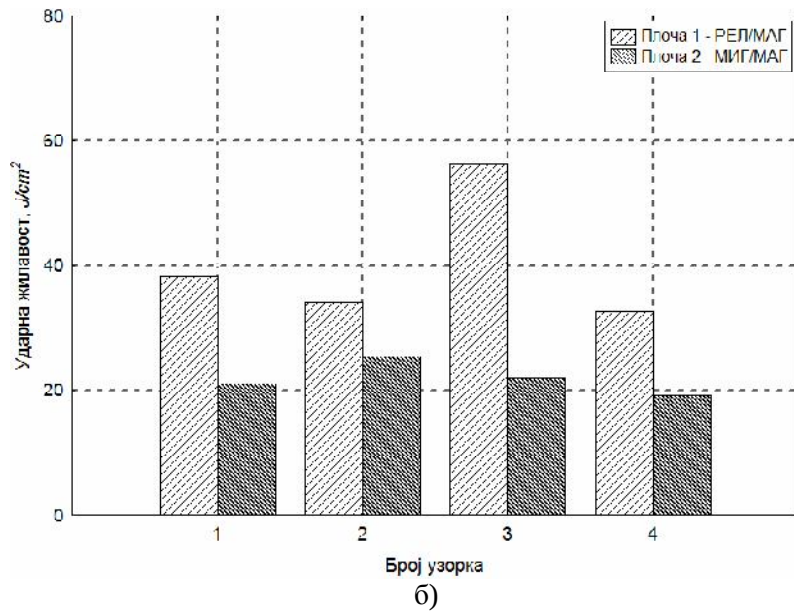
Слика 4.30. Изглед епрувете за испитивање ударне жилавости корена шави

Табела 4.14. Утрошене енергије лома и ударне жилавости корена шави на собној температури

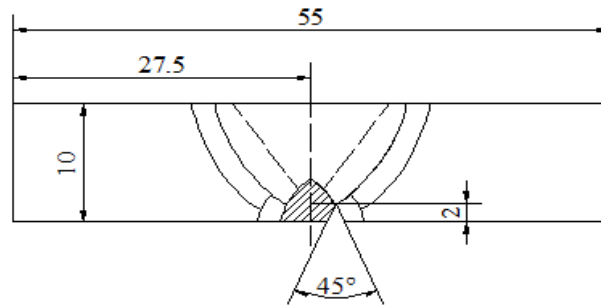
Врста материјала	Температура, °C	Број узорка	Енергија лома, J		Ударна жилавост, J / cm ²	
			Плоча 1 РЕЛ / МАГ	Плоча 2 МАГ / МАГ	Плоча 1 РЕЛ / МАГ	Плоча 2 МАГ / МАГ
WELDOX 700	+20	1.	30,67	16,94	38,34	21,18
		2.	27,33	20,36	34,16	25,45
		3.	45,03	17,65	56,29	22,06
		4.	26,12	15,32	32,65	19,15



Слика 4.31. Упоредни приказ вредности – корен шави ($T = 20^{\circ}\text{C}$): а) енергија лома, б) ударна жилавост / 1



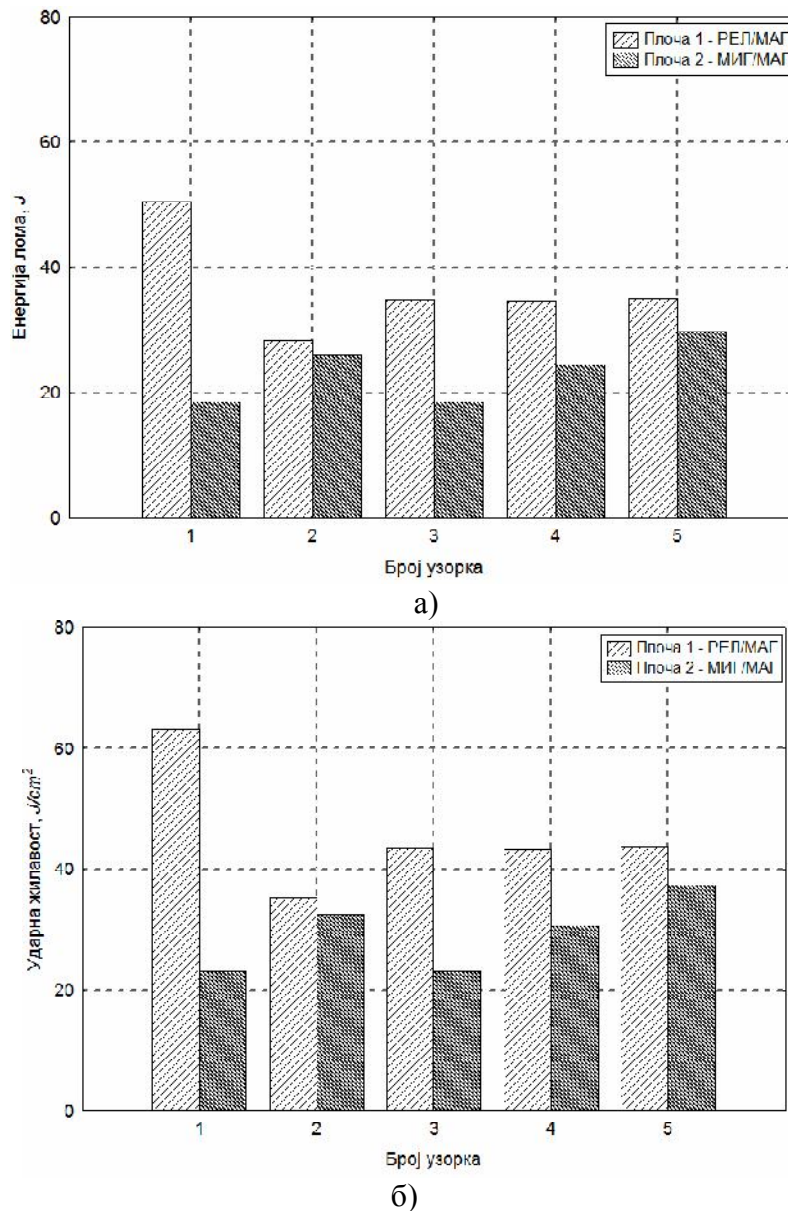
Слика 4.31. Упоредни приказ вредности – корен шави ($T = 20^{\circ}\text{C}$): а) енергија лома, б) ударна жилавост / 2



Слика 4.32. Изглед епрувете за испитивање ударне жилавости корен – линија стапања

Табела 4.15. Утрошене енергије лома и ударне жилавости корен – линија стапања на собној температури

Врста материјала	Температура, $^{\circ}\text{C}$	Број узорка	Енергија лома, J		Ударна жилавост, J / cm^2	
			Плоча 1 РЕЛ / МАГ	Плоча 2 МАГ / МАГ	Плоча 1 РЕЛ / МАГ	Плоча 2 МАГ / МАГ
WELDOX 700	+20	1.	50,53	18,44	63,16	23,05
		2.	28,29	25,95	35,36	32,44
		3.	34,84	18,52	43,55	23,15
		4.	34,66	24,50	43,32	30,63
		5.	34,93	29,78	43,67	37,23



Слика 4.33. Упоредни приказ вредности – корен шав – зона стапања ($T = 20^{\circ}\text{C}$):
а) енергија лома, б) ударна жилавост

4.2.2.2.3. Испитивање тврдоће

Под појмом тврдоћа метала и легура подразумева се отпор који тај материјал пружа продирању неког тврђег тела. Усвојена ознака за тврдоћу је H . 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 или метода упоређивања, склероскопска метода и дуроскопска метода.

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).

Испитивање тврдоће према Викерсу спроводи се на унапред припремљеном узорку. Припрема узорка се најчешће изводи брушењем и полирањем. После испитивања макроструктуре се користи исти узорак за испитивање тврдоће, па се он опет бруси и даље припрема за испитивање микроструктуре. Припремљени узорак се причвршћује на машину за испитивање тврдоће. На постављени узорак делује се силом помоћу утискивача у облику пирамиде.

Викерсова тврдоћа (сл. 4.34.) рачуна се из односа силе притиска F (N) и површине утиснутог омотача пирамиде A (mm²), коју одређујемо мерењем дијагонала d_1 и d_2 (mm).

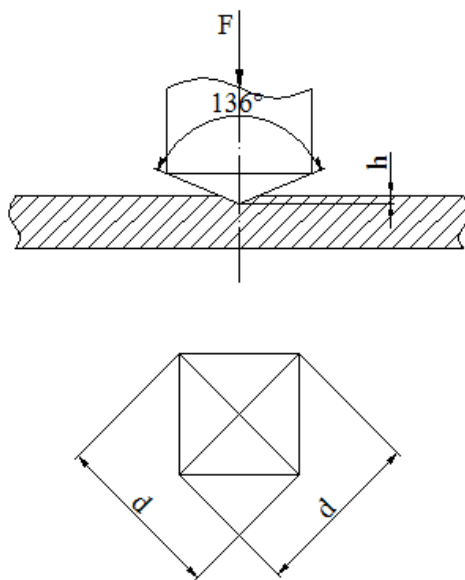
$$HV = 1,854 \cdot \frac{F}{d^2}$$

где су:

HV – тврдоћа по Викерсу,

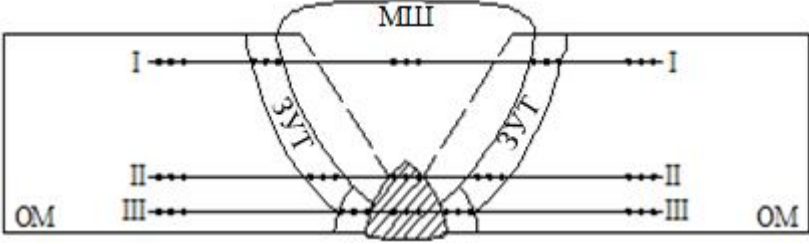
F – сила и

d – средња дужина дијагонале отиска.

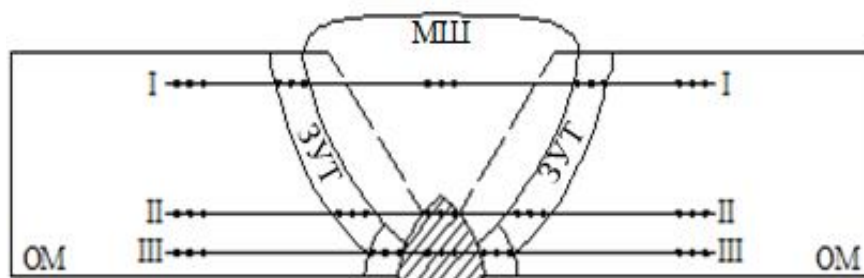


Слика 4.34. Викерсова метода – утискивач и отисак

Табела 4.16. Вредности тврдоће узорка измерене методом Викерс (HV_{10})

													Сучеоно заварени спој: Дебљина 15mm Тврдоћа мерена методом HV_{10}	
Број мерне тачке	Број узорка / Број плоче													
	ПЛОЧА I (РЕЛ / МАГ)						Плоча II (МАГ/ МАГ)							
	Узорак 1			Узорак 2			Узорак 1			Узорак 2				
	I-I	II-II	III-III	I-I	II-II	III-III	I-I	II-II	III-III	I-I	II-II	III-III		
1.	260	279	276	281	279	279	287	279	279	276	281	279		
2.	260	279	276	274	276	279	279	279	279	279	281	279		
3.	260	279	276	279	279	279	279	279	279	279	281	276		
4.	245	281	270	254	276	279	274	279	276	276	279	276		
5.	333	276	270	251	276	279	336	279	279	279	279	276		
6.	333	276	270	342	276	279	376	279	279	376	279	274		
7.	281	251	336	289	254	266	302	270	283	363	253	383		
8.	281	314	348	287	256	262	292	319	380	370	327	376		
9.	281	327	191	281	339	336	354	387	274	370	376	171		
10.	314	210	193	276	317	336	363	215	182	387	281	179		
11.	299	327	166	390	319	198	317	180	182	405	185	173		
12.	270	348	186	299	191	183	319	366	180	405	228	194		
13.	272	243	376	268	333	186	330	354	376	401	236	387		
14.	333	262	279	266	325	197	336	274	302	380	287	268		
15.	339	276	276	294	236	336	351	281	285	376	276	289		
16.	242	276	276	325	258	342	360	274	283	380	279	283		
17.	279	276	276	351	281	245	264	281	276	287	279	289		
18.	279	276	274	276	276	281	279	281	276	292	279	283		
19.	279	276	276	279	276	279	279	287	279	276	279	283		
20.	-	-	-	279	270	279	279	279	279	279	279	281		

Испитивање тврдоће мери се на више места по пресеку епрувете тако да се обухвати мерење тврдоће основног материјала прве плоче, зоне утицаја топлоте, метала шави, зоне утицаја топлоте и основног материјала друге плоче у правцу једне линије. У зависности од дебљине материјала мерење се изводи у различитом броју линија.

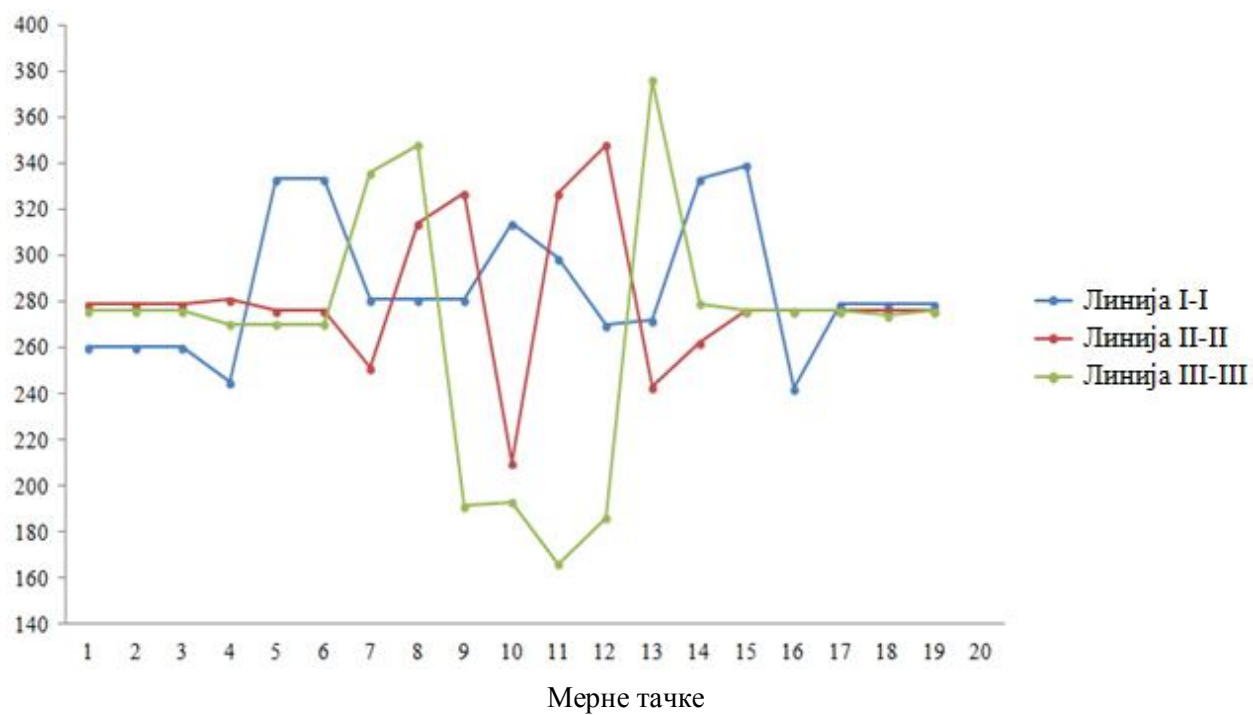


Slika 4.35. Pravci merenja tvrdoće za višeprolazni sučioni spoj

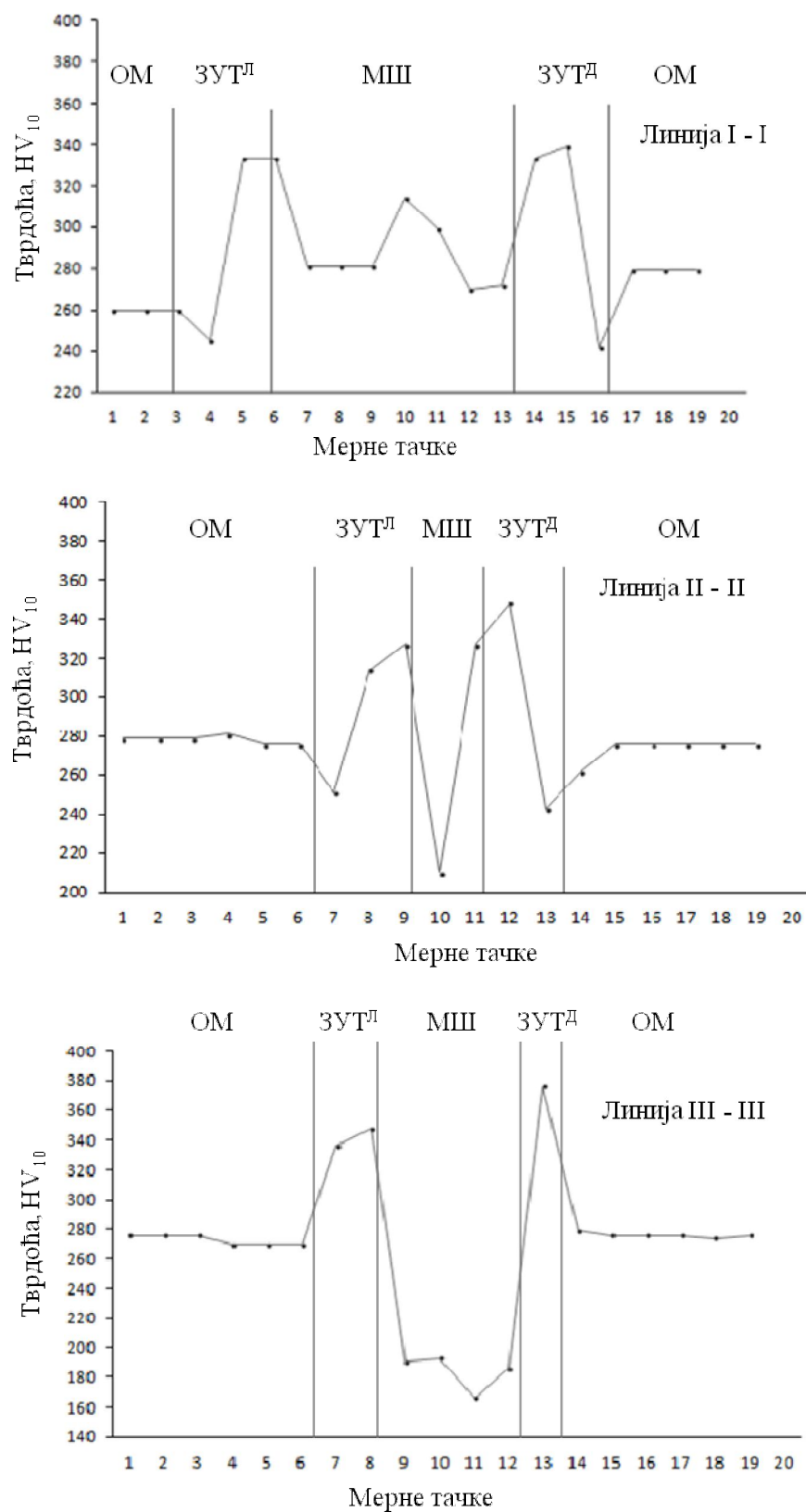
Тврдоћа је један од веома значајних фактора за оцену заварљивости. Сматра се да је челик заварљив ако његова тврдоћа у ЗУТ-у није већа од 350 HV. Уколико су вредности тврдоће веће од наведене онда се у материјалу вероватно налази мартензитна структура.



Слика 4.36. Металографски узорак: плоча - I узорак - 1 за испитивање макроструктуре и мерење тврдоће



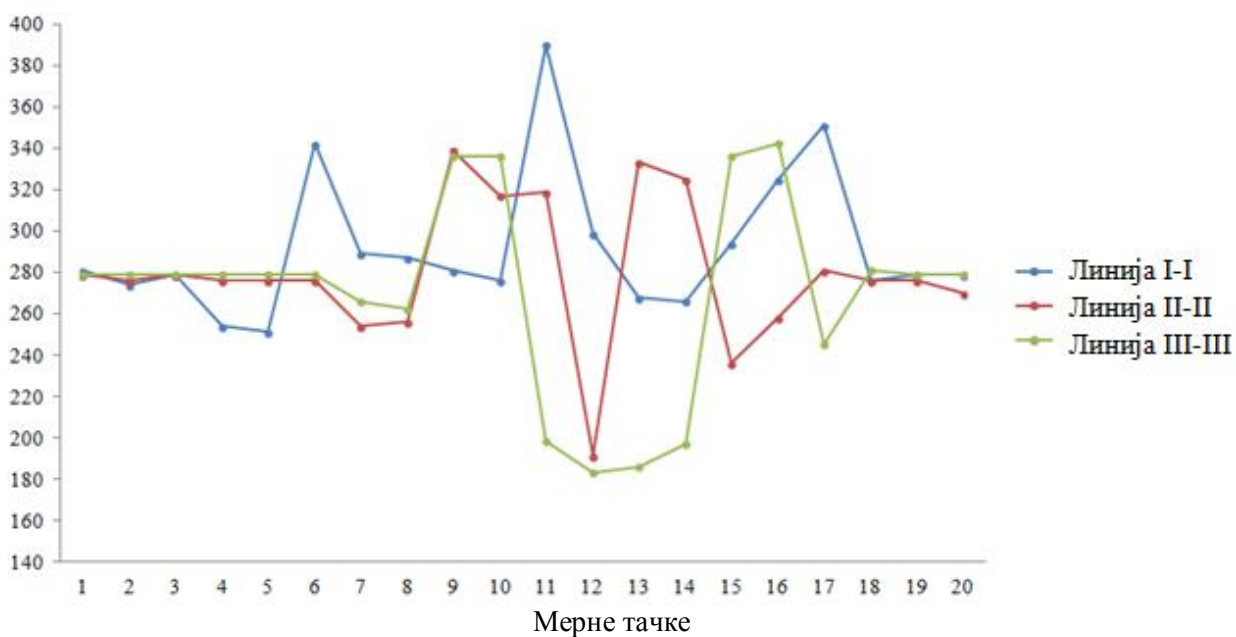
Слика 4.37. Збирни дијаграм расподеле тврдоће: плоча - I узорак – 1



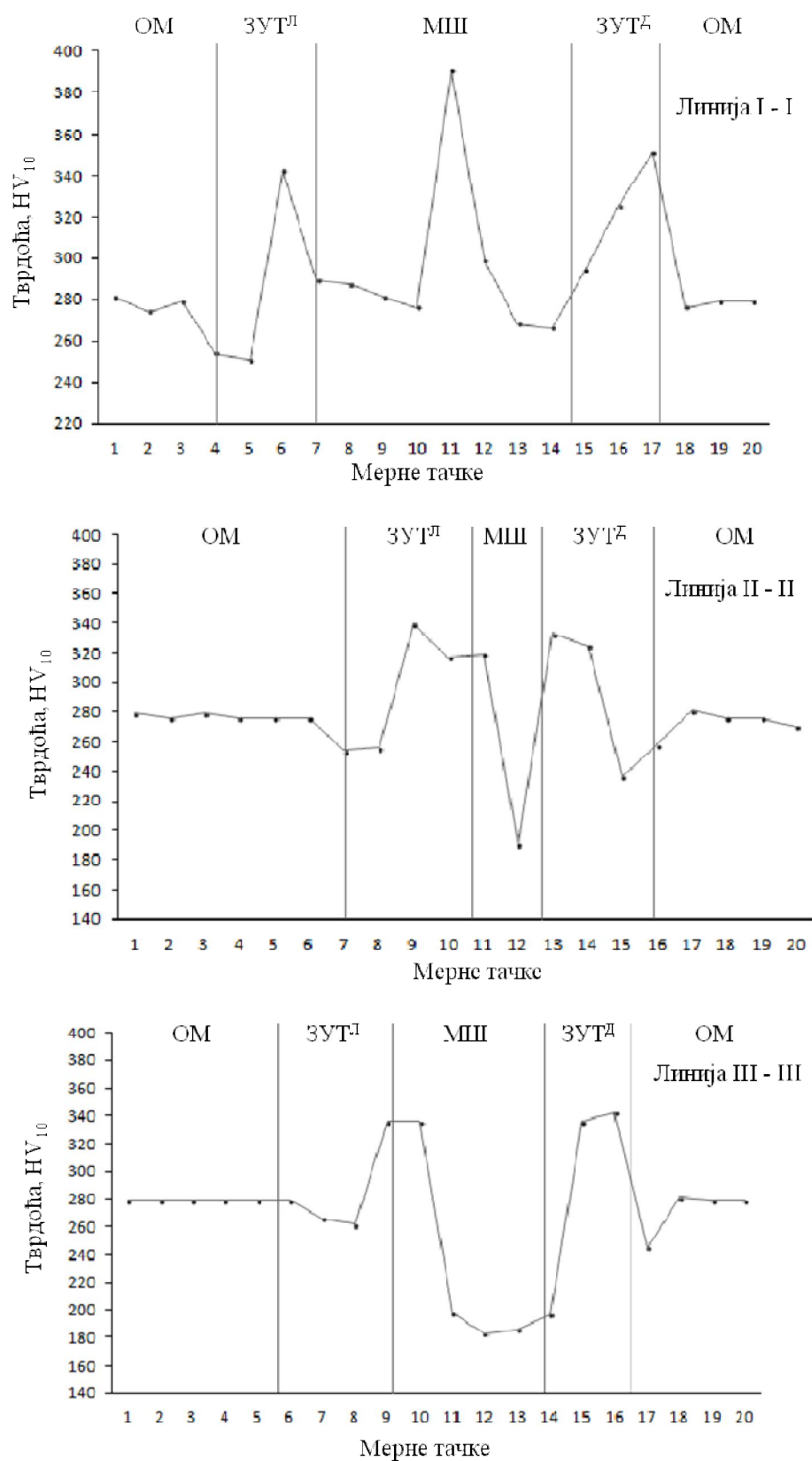
Слика 4.38. Дијаграми расподеле тврдоће: плоча - I узорак – 1



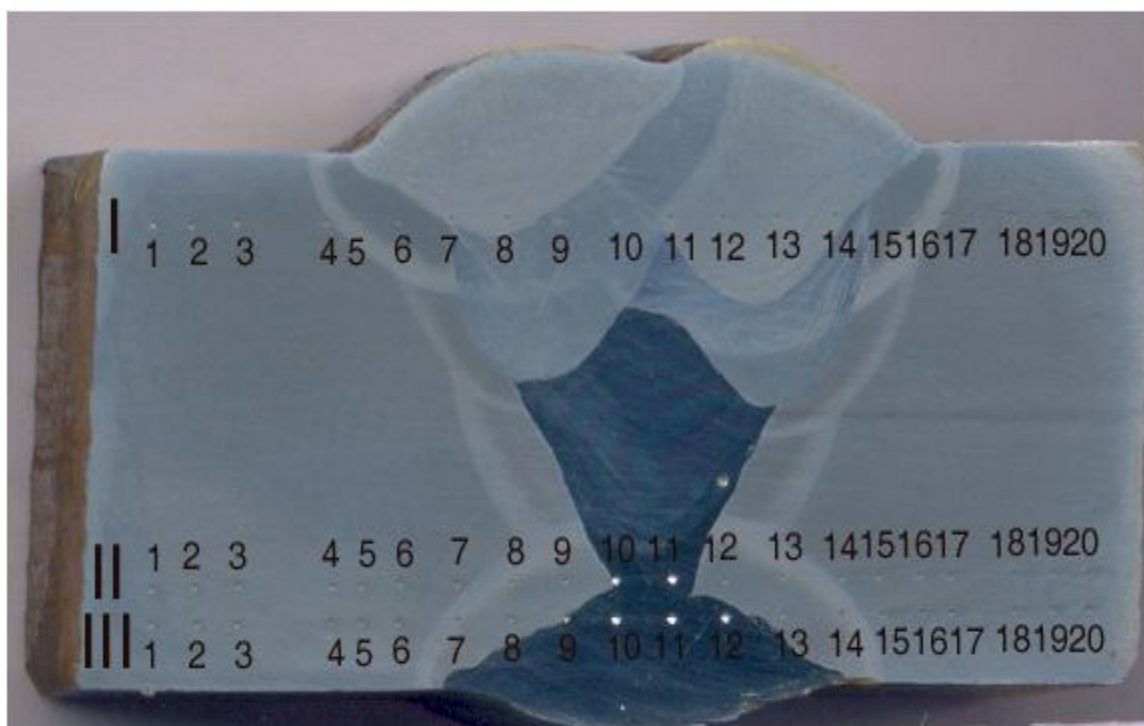
Слика 4.39. Металографски узорак: плоча - I узорак - 2 за испитивање макроструктуре и мерење тврдоће



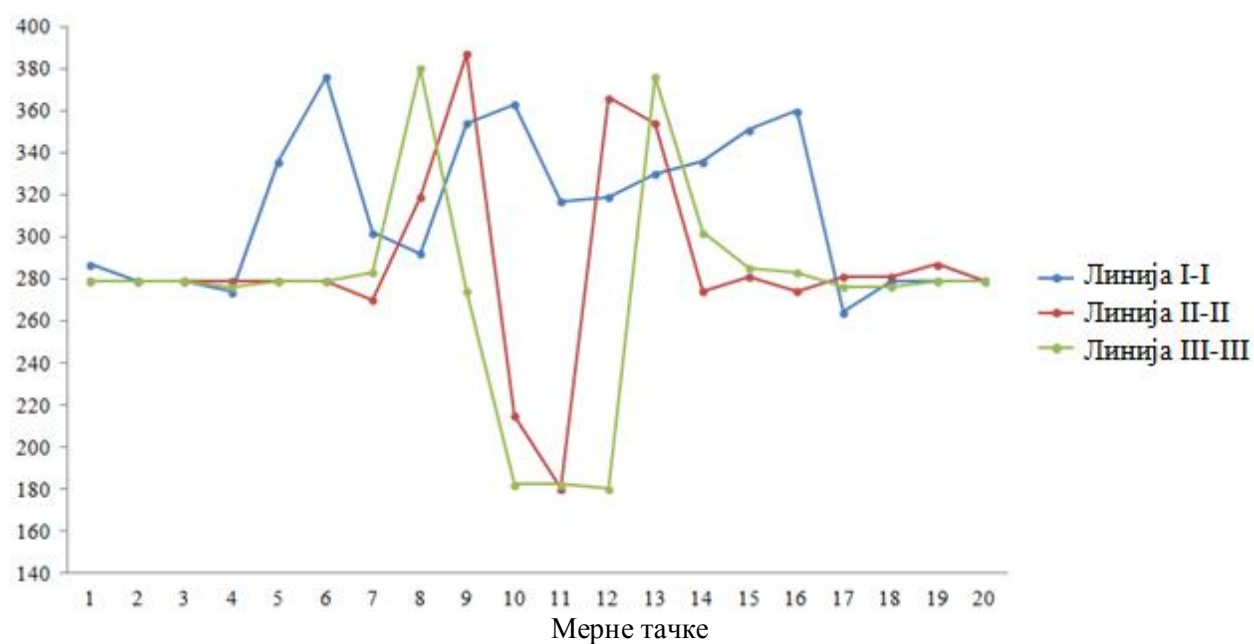
Слика 4.40. Збирни дијаграм расподеле тврдоће: плоча - I узорак - 2



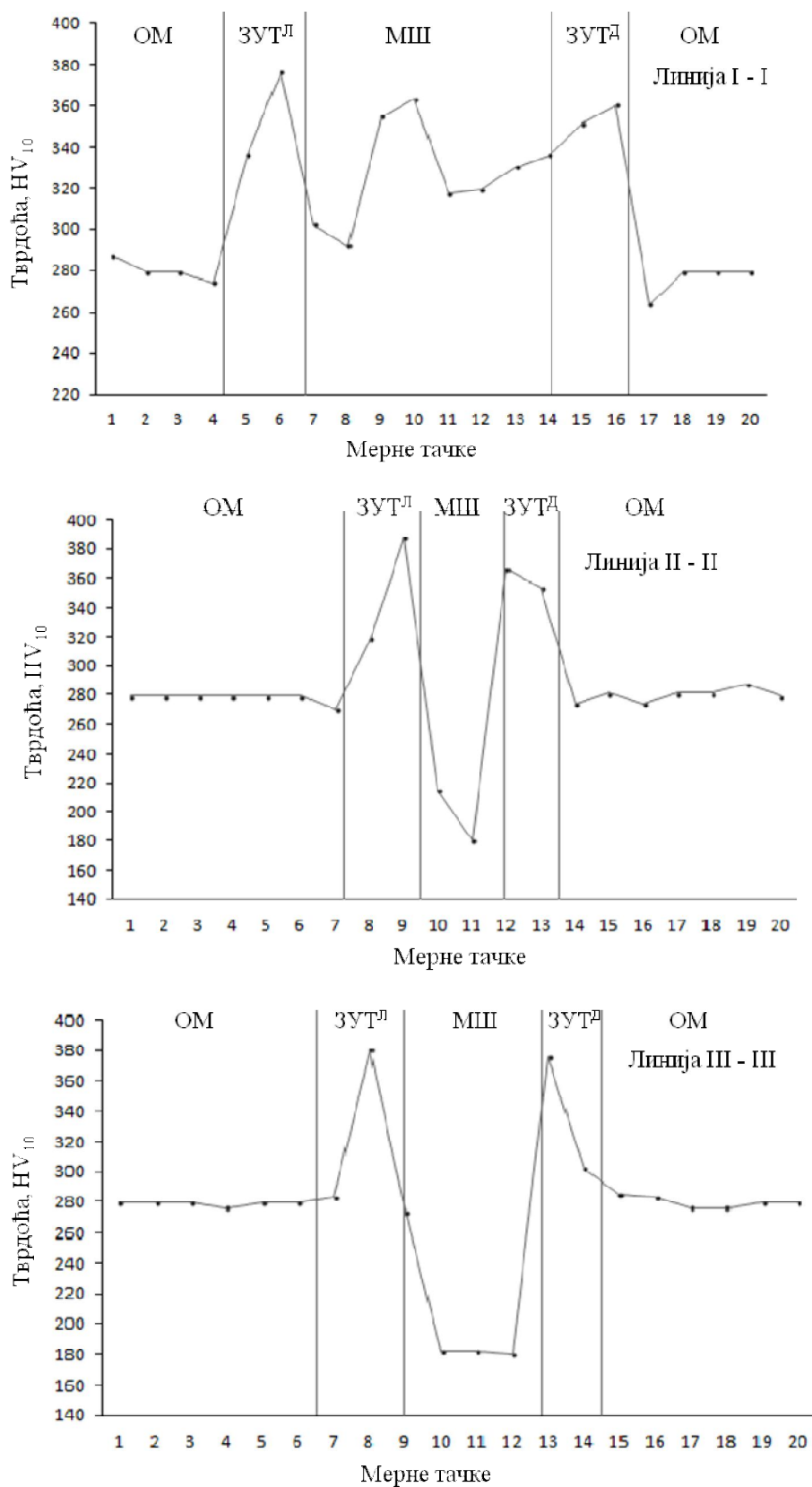
Слика 4.41. Дијаграми расподеле тврдоће: плоча - 1 узорак – 2



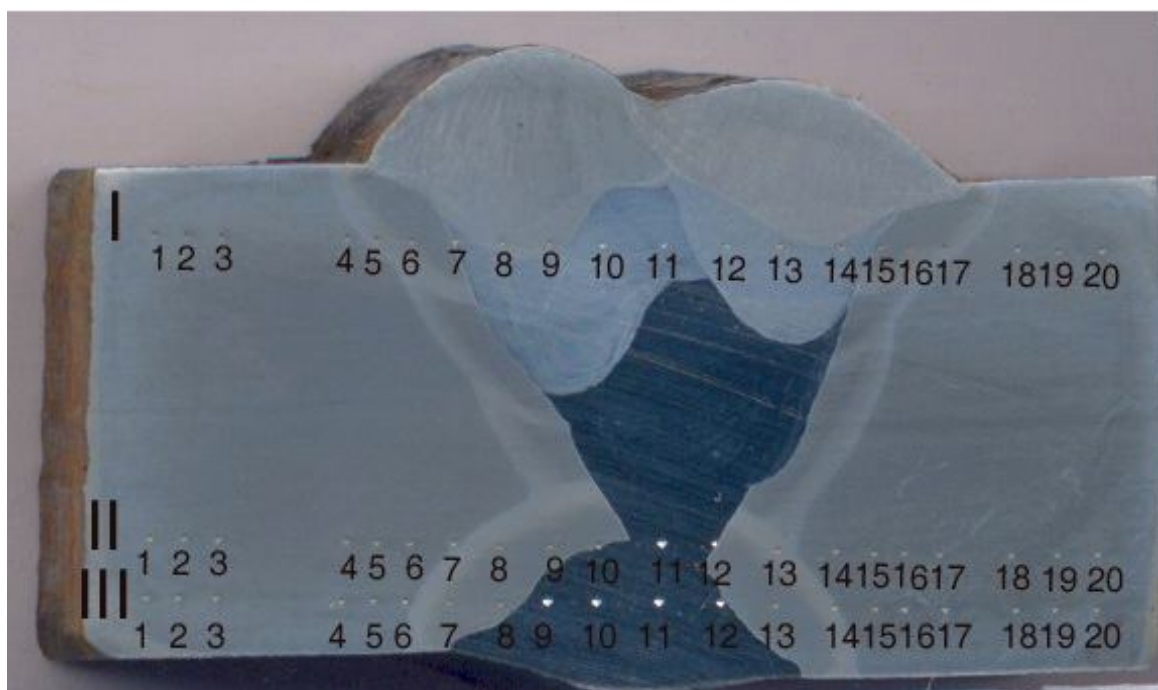
Слика 4.42. Металографски узорак: плоча - 2 узорак - 1 за испитивање макроструктуре и мерење тврдоће



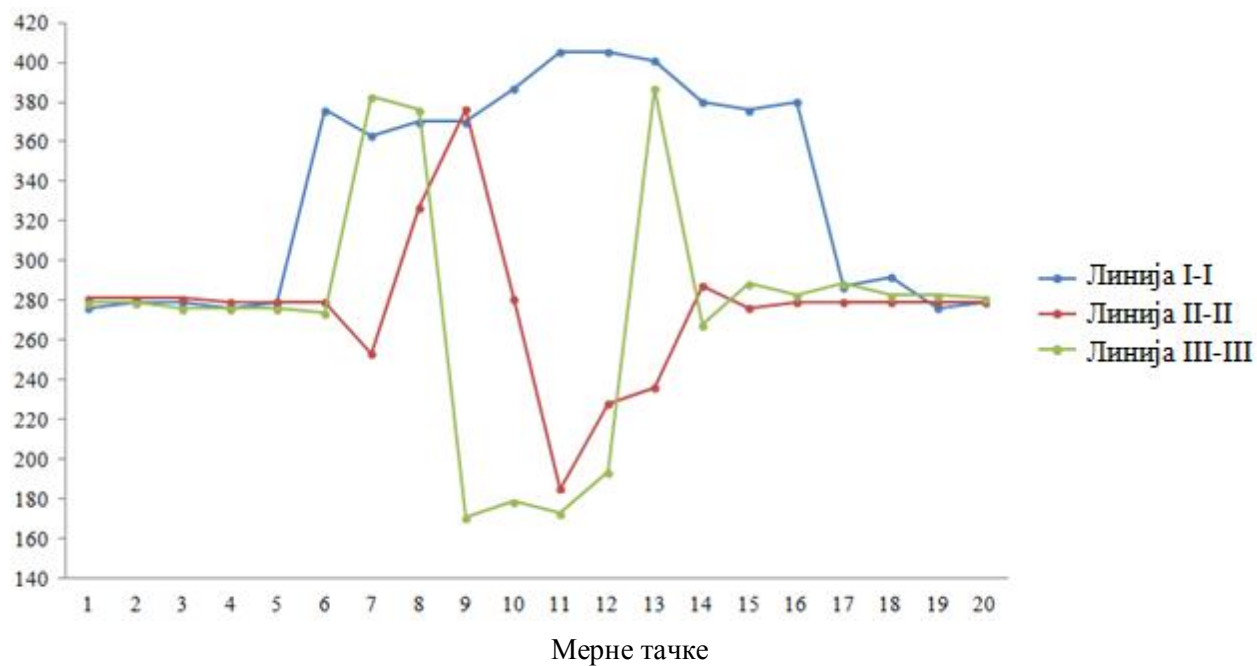
Слика 4.43. Збирни дијаграм расподеле тврдоће: плоча - 2 узорак - 1



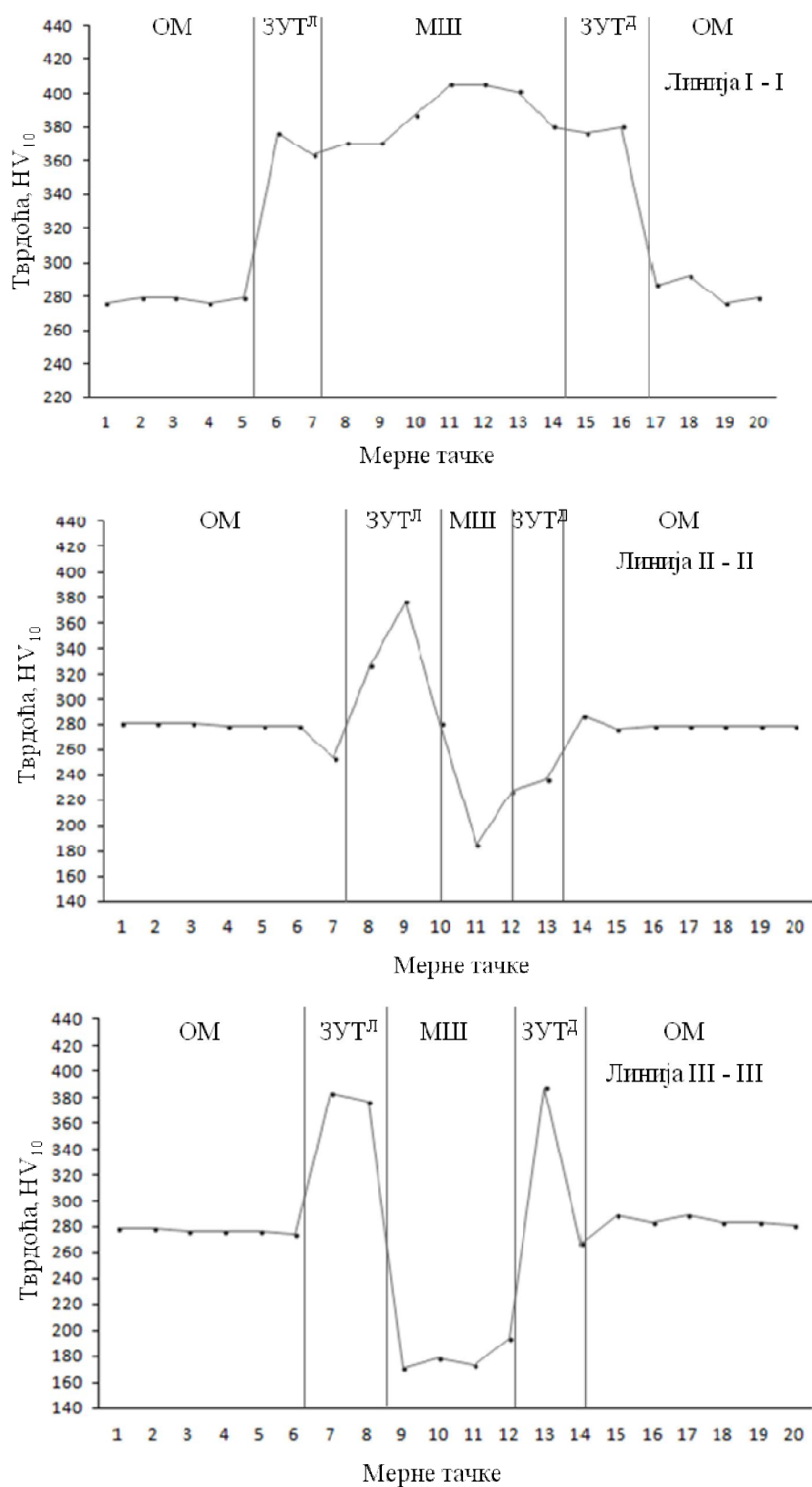
Слика 4.44. Дијаграми расподеле тврдоће: плоча - 2 узорак – 1



Слика 4.45. Металографски узорак: плоча - 2 узорак – 2 за испитивање макроструктуре и мерење тврдоће



Слика 4.46. Збирни дијаграм расподеле тврдоће: плоча - 2 узорак – 2



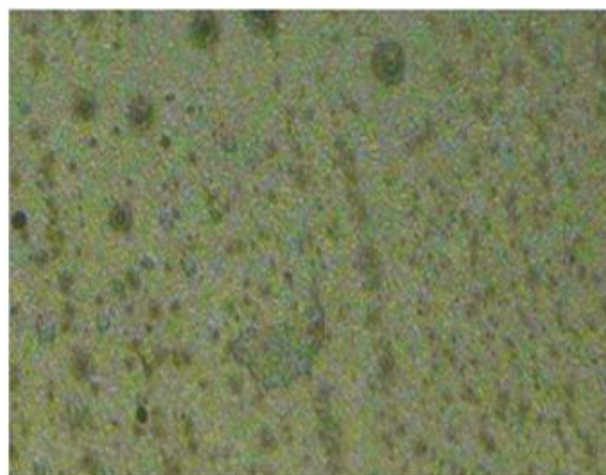
Слика 4.47. Дијаграми расподеле тврдоће: плоча - 2 узорак – 2

4.2.2.2.4. Испитивање макроструктуре

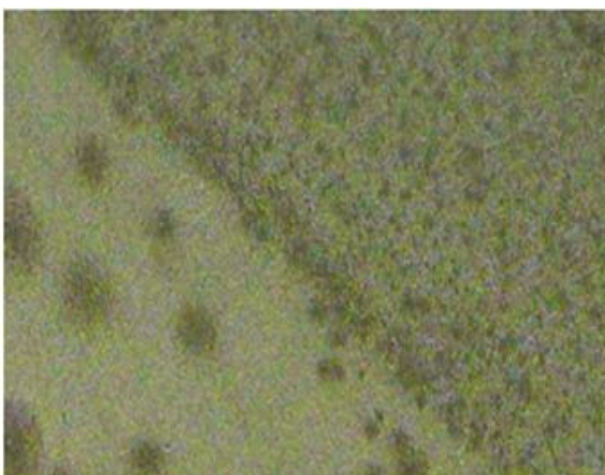
Макроструктурно испитивање завареног споја је стандардно испитивање које се обавља приликом квалификације технологије заваривања. Испитивање макроструктуре се изводи на истој епрувети на којој се изводи и мерење тврдоће и испитивање микроструктуре. Бочне стране епрувете се брусе брусним папиром и нагризају. Нагризање се изводи петопроцентним раствором нитала (HNO_3 – раствор азотне киселине у алкохолу) који помаже да се јасније уочи струтура завареног споја. При овом испитивању утврђује се да ли постоје грешке типа укључака и прслина у завареном споју. На сва четири узорка нису откривене грешке, односно узорци су у потпуности у складу са стандардом SRPS EN 5817.

4.2.2.2.5. Испитивање микроструктуре

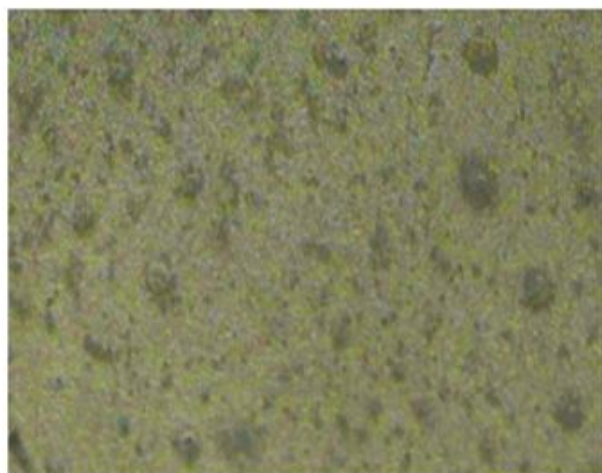
Испитивање микроструктуре је металографско испитивање узорака припремљених из завареног споја. Ова метода се изводи после макростропског испитивања. За овај поступак неопходно је да се епрувете поново нагризу ниталом. Припремљени узорци се посматрају под микроскопом увећани $200 \div 500$ пута. Зоне испитивања су: основни материјал, зона утицаја топлоте, линија стапања и метал шава. Анализирањем тих зона утврђује се њихова микроструктура. Такође, поред микроструктуре, може се одредити и величина зрна, присуство мартензита, бејнита, аустенита и осталих микроструктура.



Основни материјал



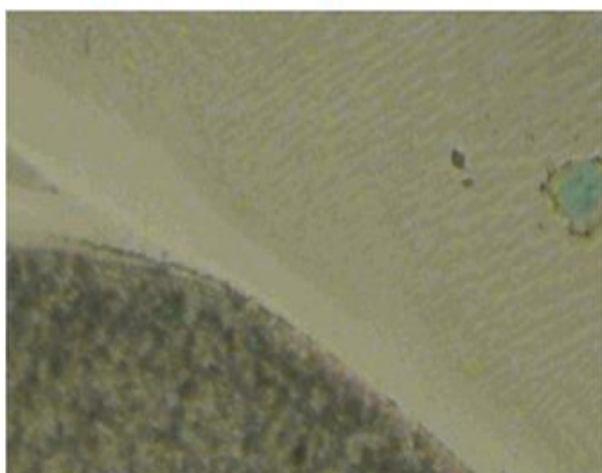
Основни материјал у зони ЗУТ-а



Прелаз О. М. и материјал лица шави



Материјал лица шави



Прелаз О. М. и материјал корена шави



Материјал корена шави

Слика 4.48. Микроструктура карактеристичних зона плоча – 1 узорак – 1



Основни материјал



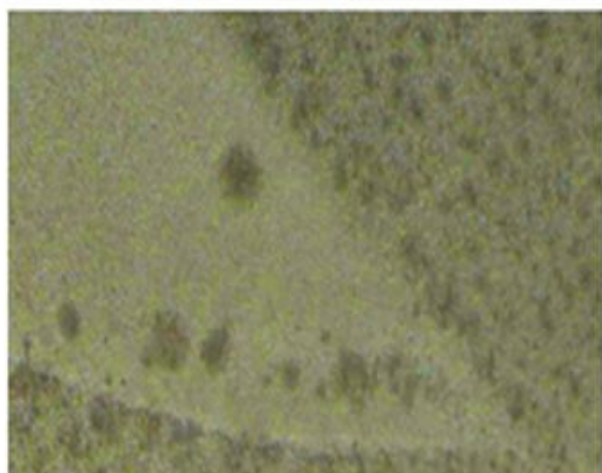
Основни материјал у зони ЗУТ-а



Прелаз О. М. и материјал лица шави



Материјал лица шави

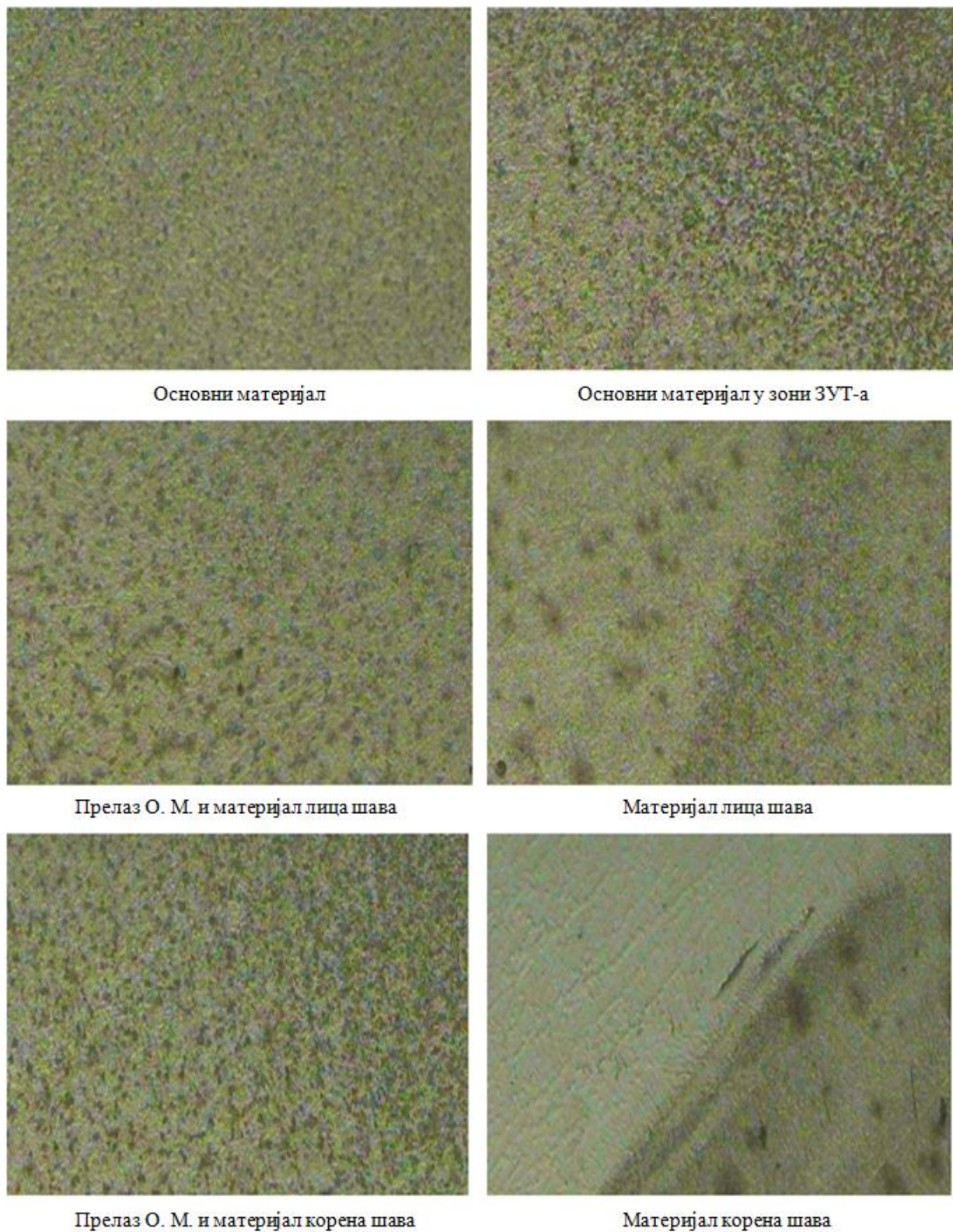


Прелаз О. М. и материјал корена шави

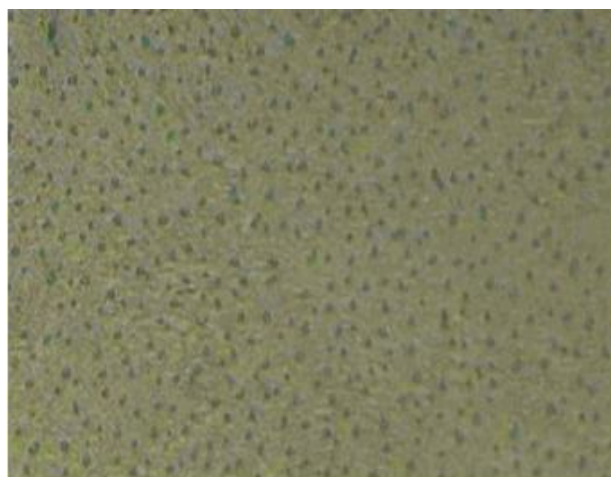


Материјал корена шави

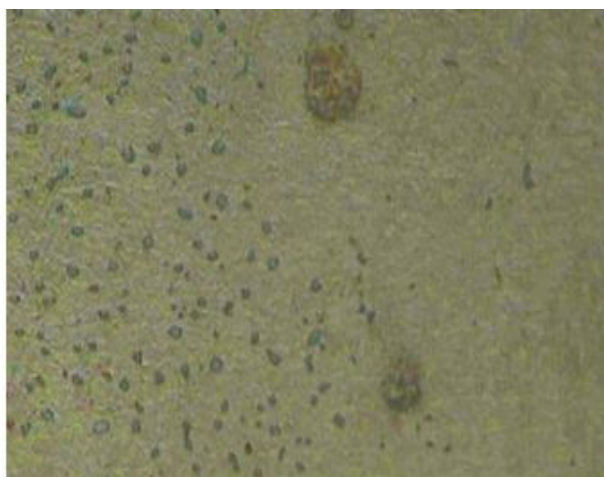
Слика 4.49. Микроструктура карактеристичних зона плоча – 1 узорак – 2



Слика 4.50. Микроструктура карактеристичних зона плоча – 2 узорак – 1



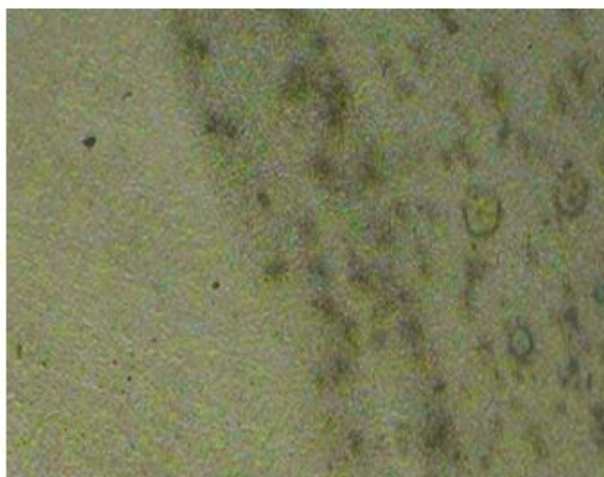
Основни материјал



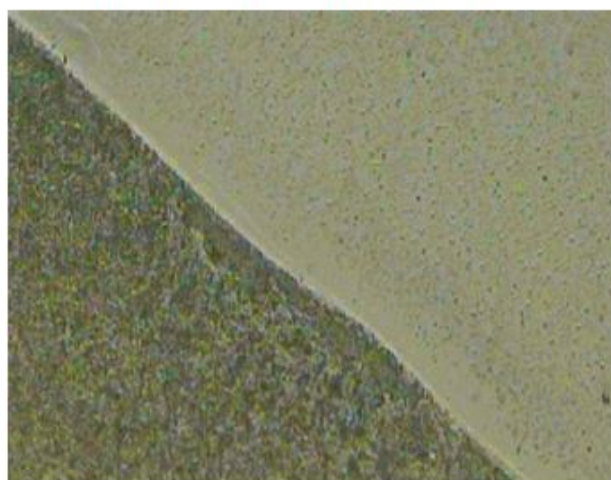
Основни материјал у зони ЗУТ-а



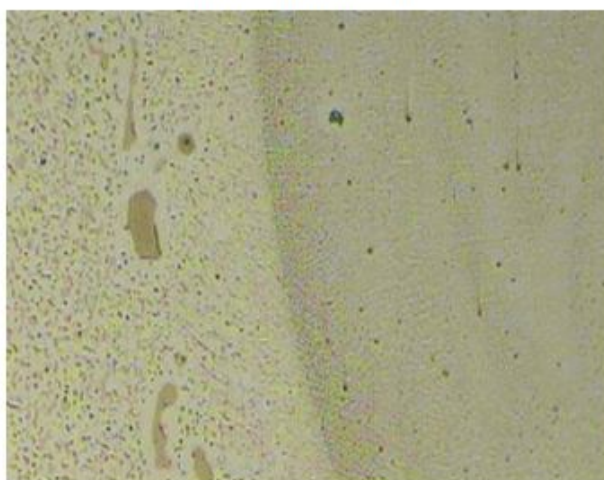
Прелаз О. М. и материјал лица шави



Материјал лица шави



Прелаз О. М. и материјал корена шави



Материјал корена шави

Слика 4.51. Микроструктура карактеристичних зона плоча – 2 узорак – 2

4.3. ДРУГО ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСПИТИВАЊЕ

Извршено је заваривање по две плоче у фирми ГОША – ФОМ (С. Паланка). Основни материјал је WELDOX 700, а димензије плоча су $\neq 15 \times 150 \times 350$ mm (два комада).

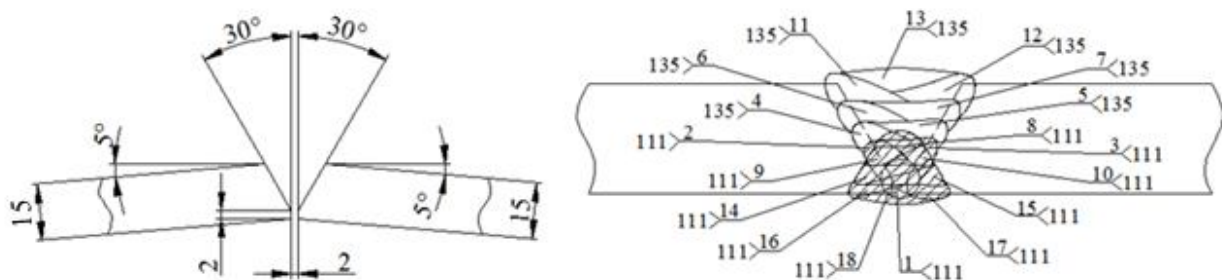
Прва комбинација је заварена коришћењем РЕЛ / МАГ поступка са електродом INOX В 18/8/6 пречника 3,25 mm (коренски пролаз) и пуном жицом MIG 75 пречника 1,2 mm (завари попуне) у заштити мешавине Ar + 18% CO₂. Друга комбинација израђена је применом МАГ / МАГ поступка са пуњеном жицом А 7 – FD пречника 1,2 mm (коренски пролаз) у заштитној атмосфери Ar + 18% CO₂, а за пролазе попуне коришћена је пуна жица MIG 75 пречника 1,2 mm у заштити мешавине Ar + 18% CO₂. За време заваривања изведено је предгревање гасним грејачима 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 мерена је бесконтактним термометром.

4.3.1. Припрема и заваривање испитних плоча

4.3.1.1. Прва заварена плоча

Табела 4.17. Параметри заваривања варијанта I

Ред. бр. пролаза	Додатни материјал / пречник	I A	U V	t_{zav} s	v_{zav} cm/s	η	q_1 kJ/cm
1.	INOX В 18/8/6 / 3,25	125	25	101	0,346	0,8	7,225
2.	INOX В 18/8/6 / 3,25	125	25	102	0,343	0,8	7,289
3.	INOX В 18/8/6 / 3,25	125	25	103	0,340	0,8	7,353
4.	MIG 75 / 1,2 (Ar/CO ₂ =82/18%)	245	25	35	1,000	0,75	4,594
5.	MIG 75 / 1,2 (Ar/CO ₂ =82/18%)	245	25	37	0,946	0,75	4,856
6.	MIG 75 / 1,2 (Ar/CO ₂ =82/18%)	245	25	37	0,946	0,75	4,856
7.	MIG 75 / 1,2 (Ar/CO ₂ =82/18%)	245	25	35	1,000	0,75	4,594
8.	INOX В 18/8/6 / 3,25	125	25	104	0,336	0,8	7,440
9.	INOX В 18/8/6 / 3,25	125	25	70	0,500	0,8	5,000
10.	INOX В 18/8/6 / 3,25	125	25	89	0,393	0,8	6,361
11.	MIG 75 / 1,2 (Ar/CO ₂ =82/18%)	245	25	36	0,972	0,75	4,726
12.	MIG 75 / 1,2 (Ar/CO ₂ =82/18%)	245	25	42	0,833	0,75	5,515
13.	MIG 75 / 1,2 (Ar/CO ₂ =82/18%)	245	25	35	1,000	0,75	4,594
14.	INOX В 18/8/6 / 3,25	125	25	92	0,380	0,8	6,579
15.	INOX В 18/8/6 / 3,25	125	25	114	0,307	0,8	8,143
16.	INOX В 18/8/6 / 3,25	125	25	85	0,411	0,8	6,083
17.	INOX В 18/8/6 / 3,25	125	25	80	0,437	0,8	5,721
18.	INOX В 18/8/6 3,25	125	25	132	0,265	0,8	9,434



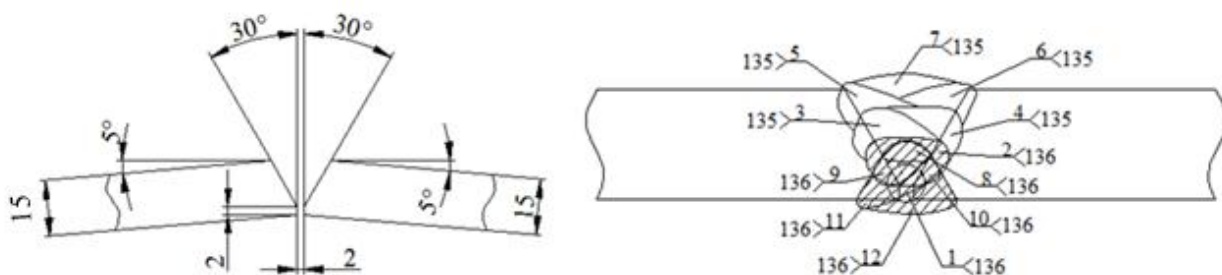
Слика 4.52. Припрема плоча за заваривање и распоред пролаза

4.3.1.2. Друга заварена плоча

Табела 4.18. Параметри заваривања варијанта II

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

Припрема жлебова испитних плоча за заваривање извршена је машинским путем на глодалици. Пре почетка заваривања плоче су претходно савијене у циљу смањења деформација које настају при заваривању услед унете количине топлоте. Параметри заваривања који су коришћени одабрани су тако да је унета количина енергије у препорученим границама.



Слика 4.53. Припрема плоча за заваривање и распоред пролаза

4.3.2. Испитивање заварених плоча

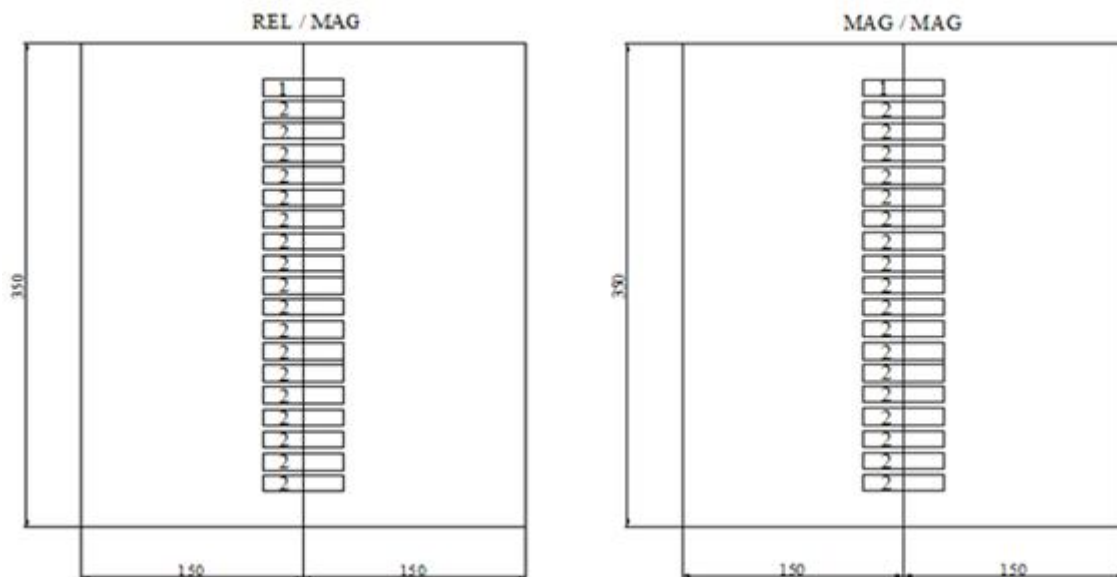
4.3.2.1. Испитивање без разарања

Испитивање заварених плоча извршено је радиографском методом у Институту ГОША.



Слика 4.54. Радиографски снимци заварених плоча 1 и 2

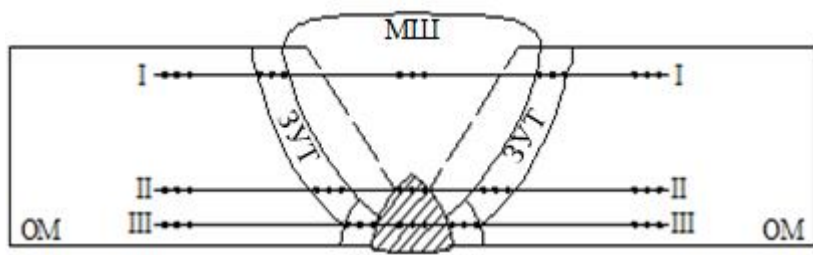
4.3.2.2. Испитивање са разарањем

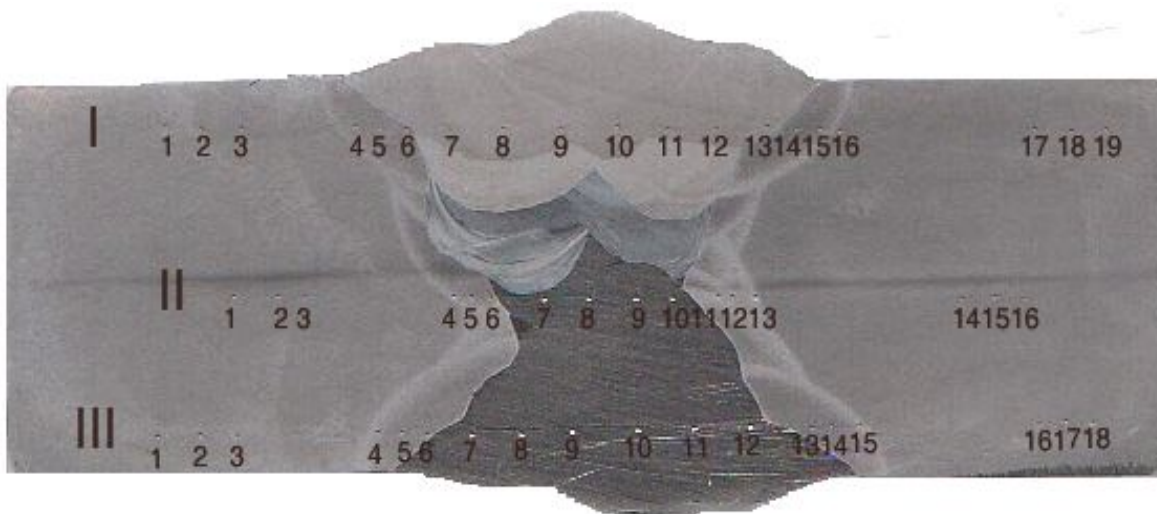


Слика 4.55. План израде епрувета из прве и друге заварене плоче

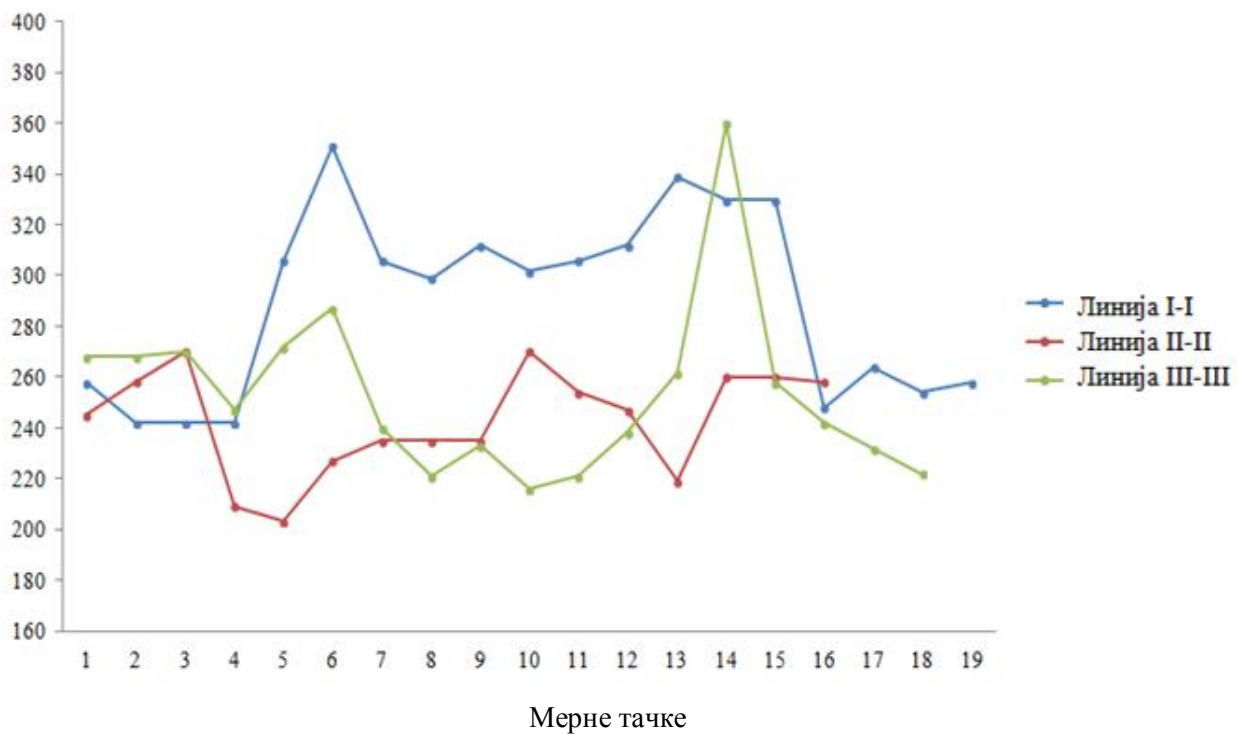
4.3.2.2.1. Испитивање тврдоће

Табела 4.19. Вредности тврдоће узорка измерене методом Викерс (HV_{10})

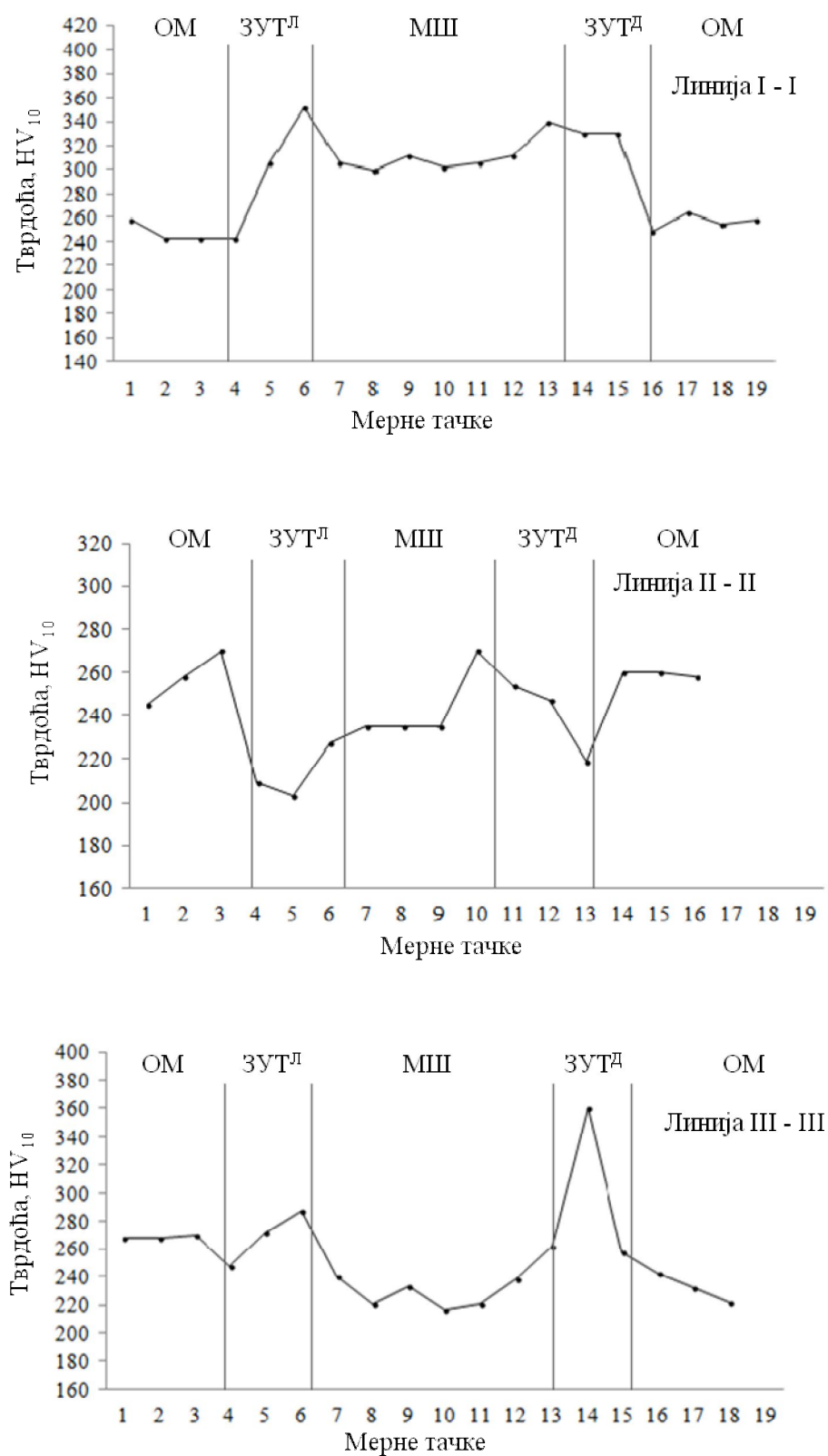
				Сучеои заварени спој: Дебљина 15 mm Тврдоћа мерена методом HV ₁₀		
Број мерне тачке	Број узорка / Број плоче					
	Плоча I (РЕЛ / МАГ)			Плоча II (МАГ / МАГ)		
	Узорак 1			Узорак 1		
	I-I	II-II	III-III	I-I	II-II	III-III
1.	258	245	268	260	245	264
2.	242	258	268	260	235	242
3.	242	270	270	242	256	232
4.	242	209	247	242	210	233
5.	306	203	272	317	210	264
6.	351	227	287	264	224	370
7.	306	235	240	289	199	201
8.	299	235	221	370	202	210
9.	312	235	233	317	193	182
10.	302	270	216	322	210	182
11.	306	254	221	322	238	210
12.	312	247	238	336	260	270
13.	339	219	262	333	227	348
14.	330	260	360	245	268	242
15.	330	260	258	281	268	240
16.	248	258	242	233	268	264
17.	264	-	232	262	-	264
18.	254	-	222	266	-	-
19.	258	-	-	266	-	-



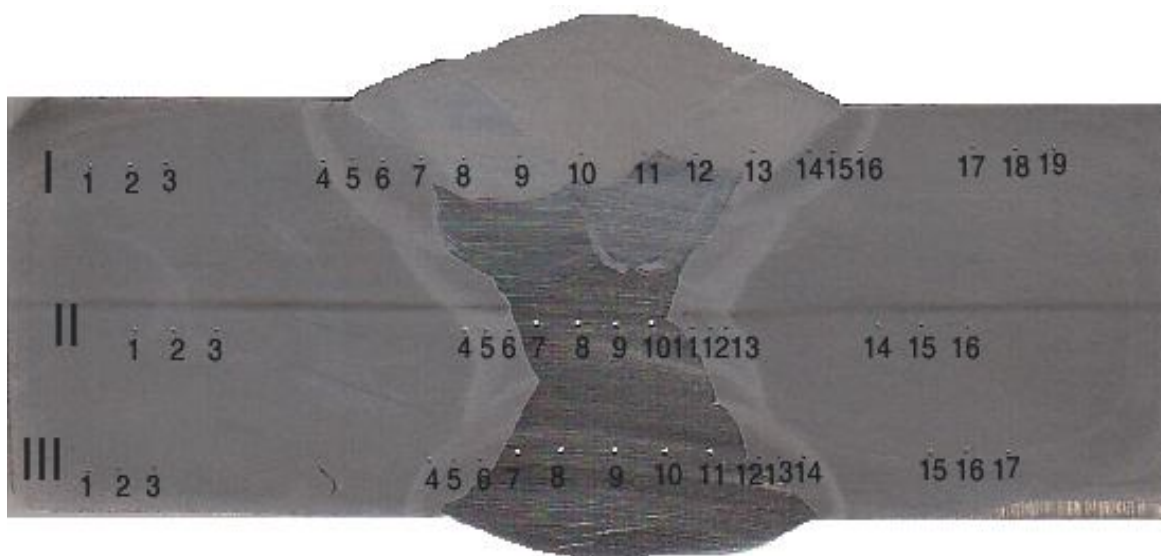
Слика 4.56. Металографски узорак плоча - 1 за испитивање макроструктуре и мерење тврдоће



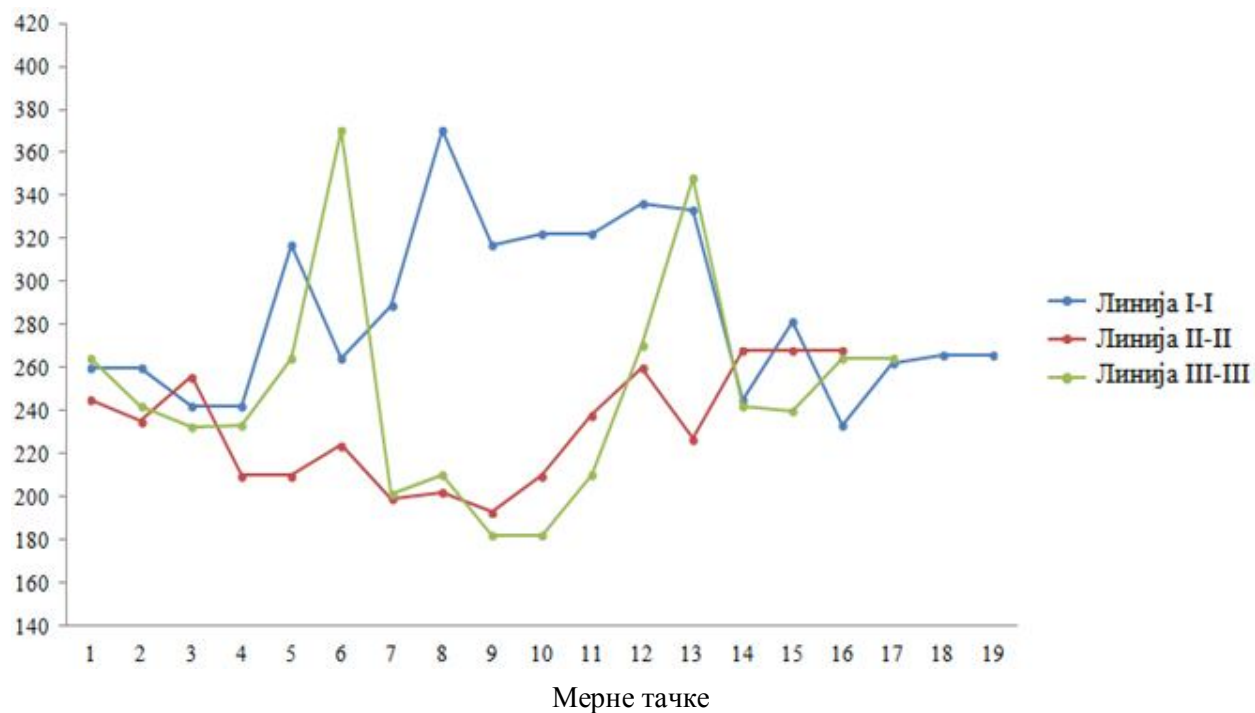
Слика 4.57. Збирни дијаграм расподеле тврдоће плоча – 1



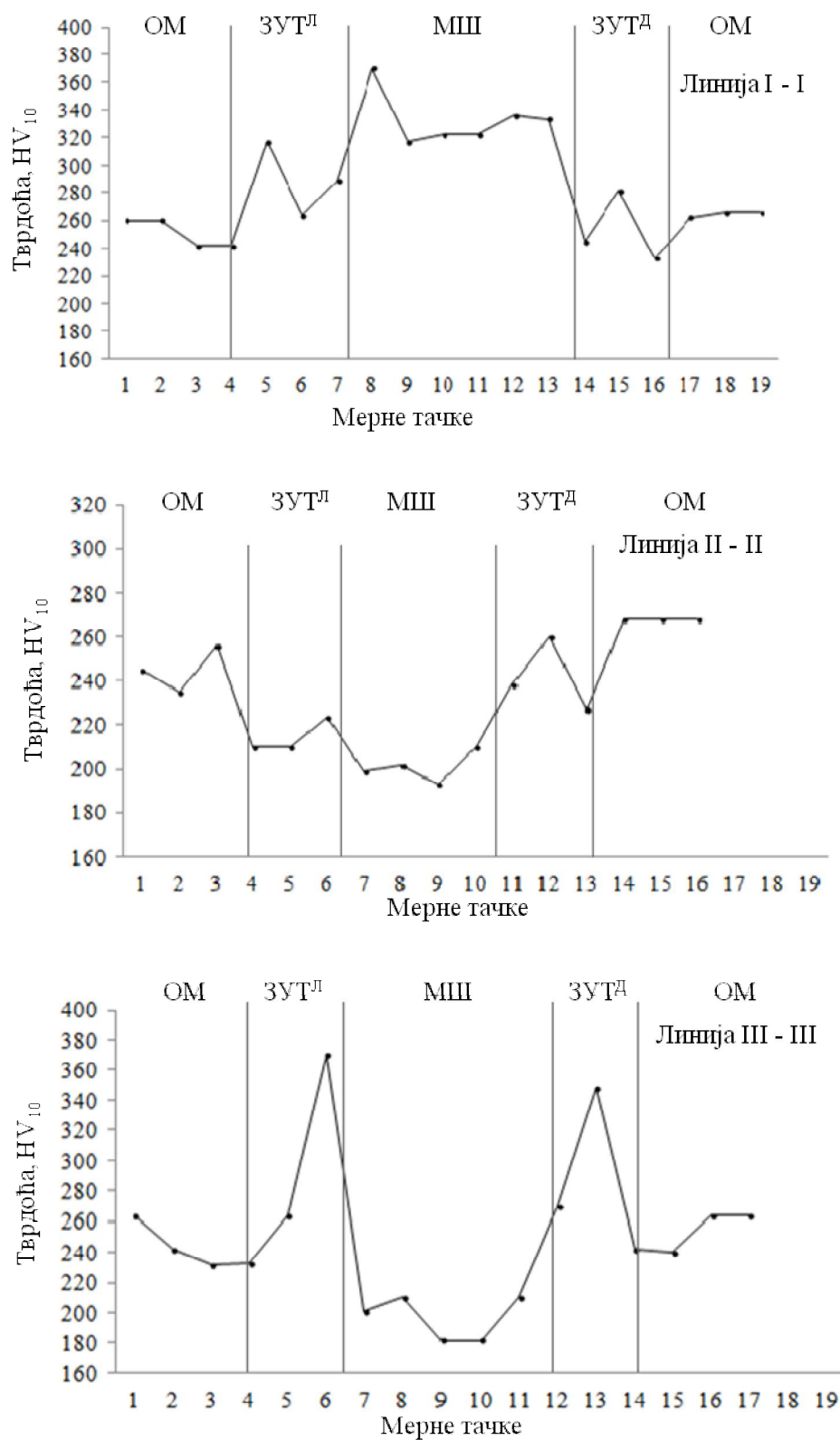
Слика 4.58. Дијаграми расподеле тврдоће плоча – 1



Слика 4.59. Металографски узорак плоча - 2 за испитивање макроструктуре и мерење тврдоће



Слика 4.60. Збирни дијаграм расподеле тврдоће плоча – 2

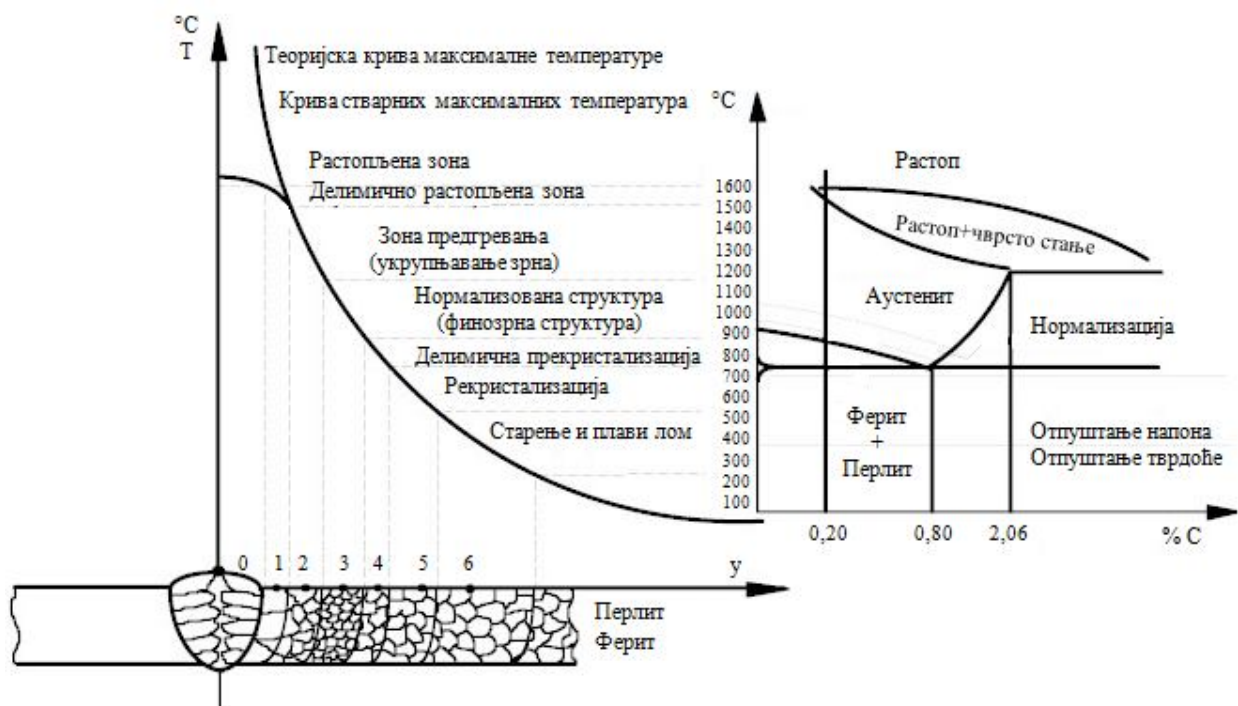


Слика 4.61. Дијаграми расподеле тврдоће плоча – 2

4.3.2.2.2. Испитивање макроструктуре

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

4.3.2.2.3. Испитивање микроструктуре

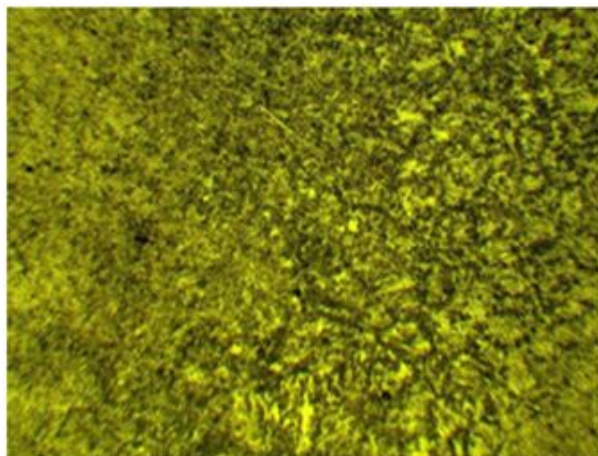


Слика 4.62. Структурне зоне за челик са 0,2% C

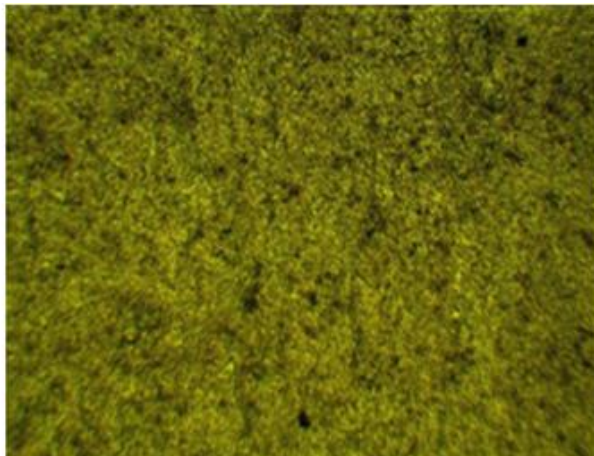


ОМ – сорбитна структура

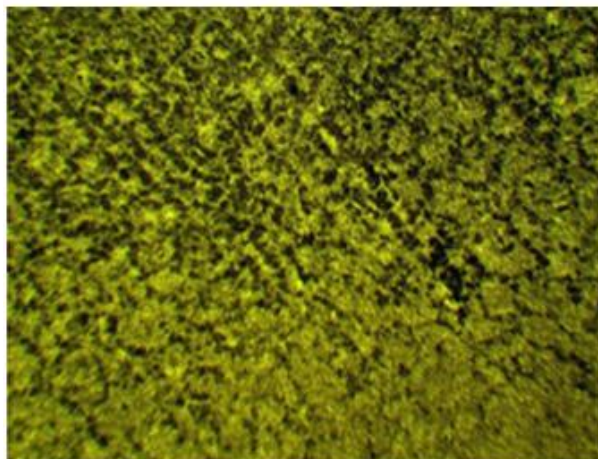
Слика 4.63. Микроструктура: плоча – 1 / 1



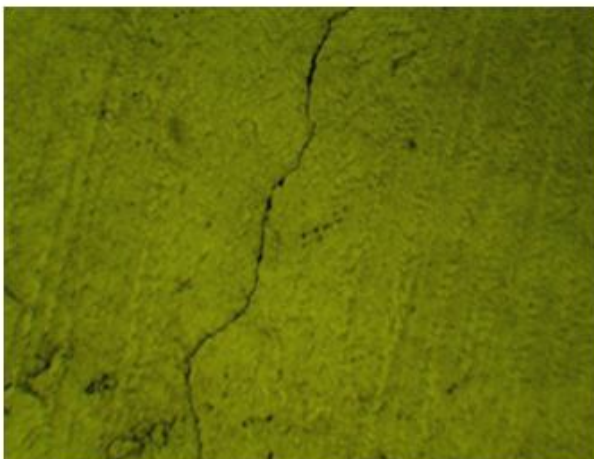
ЗУТ – сорбитно – перлитна структура, линија I – I



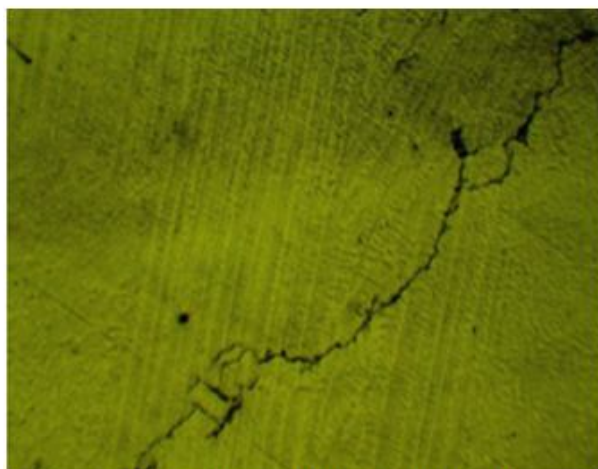
МШ – међуфазна структура – сорбит, линија I – I



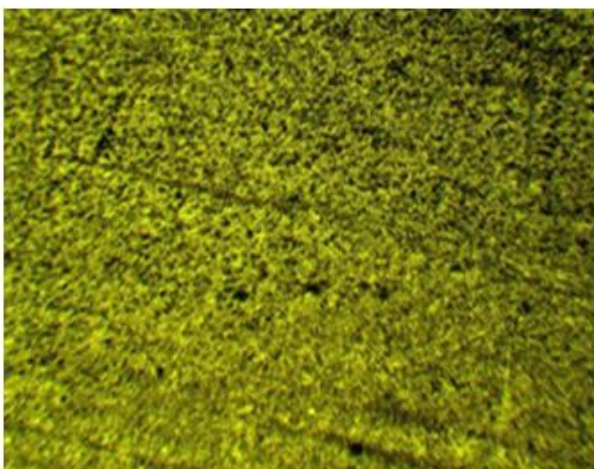
ЗУТ – међуфазна структура и перлит, линија II – II



МШ – микропрелина, линија II – II

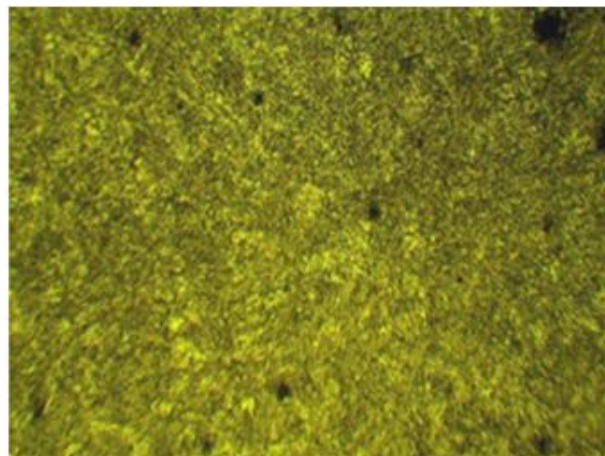


МШ – микропрелина, линија II – II

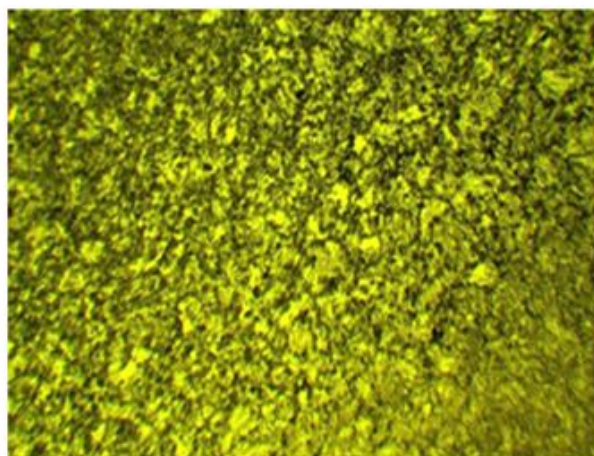


ЗУТ – сорбитно – перлитна структура, линија III – III

Слика 4.64. Микроструктура: плоча – 1 / 2



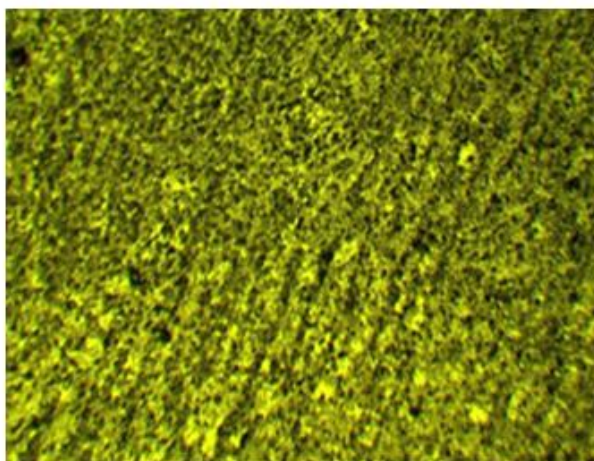
ОМ – сорбитна структура



ЗУТ – сорбитно – перлитна структура, линија I – I



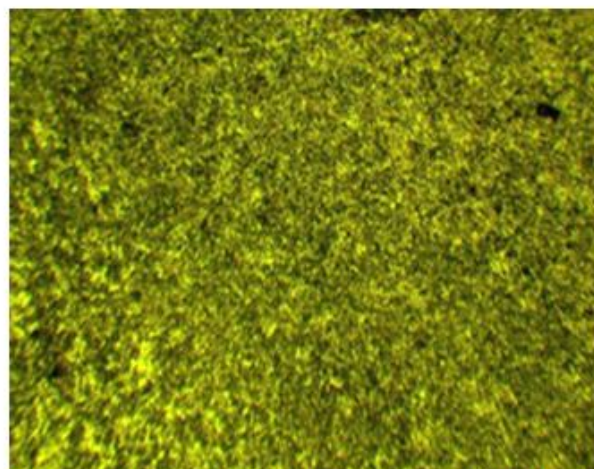
МШ – међуфазна структура, линија I – I



ЗУТ – сорбит и перлит, линија II – II



МШ – међуфазна структура, линија II – II



ЗУТ – сорбитно – перлитна структура, линија III – III

Слика 4.65. Микроструктура: плоча – 2

5. КОМЕНТАР ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ ИСПИТИВАЊА ЗАВАРЉИВОСТИ ЧЕЛИКА WELDOX 700

Експериментална испитивања су вршена да би се одабрала најповољнија технологија заваривања. У претходном поглављу приказани су резултати испитивања заварених спојева поступцима РЕЛ / МАГ и МАГ / МАГ. У првом експерименталном испитивању код МАГ / МАГ технологије коренски пролази су изведени у заштити CO_2 , а у другом експерименталном испитивању у заштити мешавине $\text{Ar} + \text{CO}_2 = 82\% + 18\%$.

5.1. КОМЕНТАР ПРВОГ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНОГ ИСПИТИВАЊА

Коментар се односи на испитивање затезањем, испитивање тврдоће, микроструктуре и жилавости заварених спојева према технологијама РЕЛ / МАГ и МАГ / МАГ при извођењу коренских пролаза у заштити CO_2 .

5.1.1. Испитивање затезањем

Приликом испитивања најважнијих механичких карактеристика основног материјала, код оба случаја, добијене су вредности веома сличне табличним вредностима, што је задовољавајуће.

Избор додатног материјала за заваривање, из аспекта јачине, требало би да је такав да вредности најважнијих механичких карактеристика додатног материјала буду веће од вредности основног материјала. Ово правило се проверава при експерименталном испитивању на затезање. Уколико се лом епрувете догоди ван зоне завареног споја, што се јачине тиче, правилно је одабран додатни материјал. 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 који је преломљен у металу шава – разлог је постојање укључка.

5.1.2. Испитивање тврдоће

При анализирању резултата испитивања тврдоће, на сва четири узорка са по три линије (правца) и по двадесетак мерних тачака, може се закључити да су измерене вредности углавном уједначене. На појединим местима измерене су повећане вредности тврдоће (изнад $350 \div 370 \text{ HV}_{10}$ – дозвољена вредност за S690 QL). Најкритичније вредности су забележене на линији I – I другог узорка, друге плоче. Појединачни скок тврдоће наводи на закључак да је при заваривању обе плоче извршено контролисано предгревање и одржавање међупролазне температуре, тако да се структура отпуштеног мартензита јавља само у појединачним случајевима.

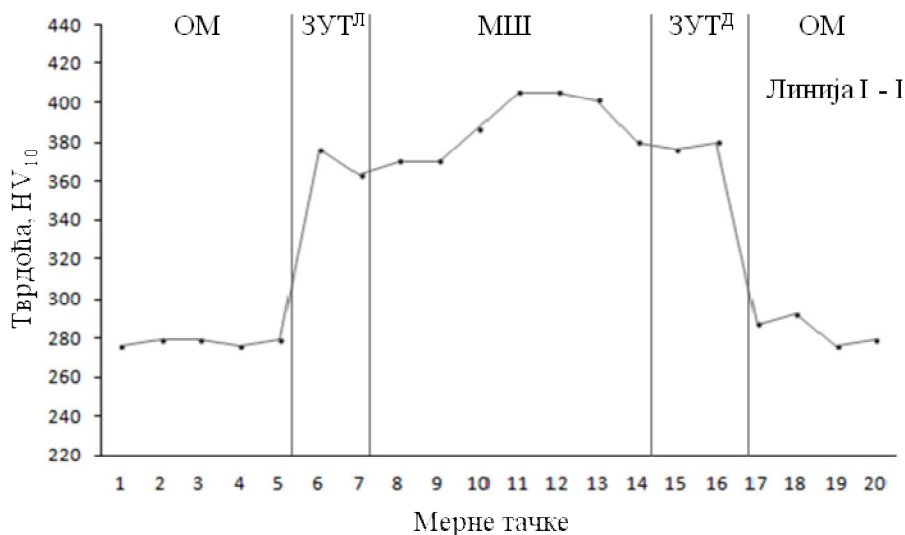
У коренским пролазима метала шава може да се констатује ниска вредност тврдоће. Овако измерене вредности на овом месту директно су повезане са јачином додатног материјала. Сврха додатног материјала коришћеног за извођење коренских

пролаза у наведеним технологијама је да повећа пластичност споја, умањи заостале напоне и апсорбује евентуалне микропрслине у завареном споју. Јачина метала шава се добија на основу завава попуне, додатним материјалом јачине сличне јачини ОМ.

5.1.3. Испитивање микроструктуре

У узорцима добијеним из заварених плоча према датим технологијама уочава се прилично уједначен распоред тврдоће, што је у директној повезаности са микроструктуром заварених спојева. Углавном се свуда задржала ситнозрна структура – што приближно одговара структури основног материјала.

Само на појединим местима повећана тврдоћа последица је повећања зрна, а самим тим и добијена структура отпуштеног мартензита. Код обе заварене плоче направљен је пропуст што последњи пролаз, са стране лица и са стране корена, није заварен по средини шава и изостала је накнадна термичка обрада претходних пролаза. Изостанком те термичке обраде дошло је до укрупњавања зрна и повећања тврдоће што се посебно види на линији I – I (тачке од 6 до 16) узорак два, плоча два (сл. 5.1.).



Слика 5.1. Дијаграм тврдоће – узорак два плоча два

5.1.4. Испитивање ударне жилавости

Резултати добијени при испитивању жилавости друге плоче указују на пад вредности жилавости у завареном споју у односу на основни материјал. Ово је неповољан случај са становишта хомогености и сигурности завареног споја у целини. Јавила су се места са ниском ударном жилавошћу у којима може да дође до повећања концентрације напона и уз евентуалне заостале укључке до појаве микропрслина које могу да доведу у крајњој мери до лома конструкције.

Уколико се упореде вредности ударне жилавости на лицу метала шава, у корену шава и на линији стапања у корену за ове две технологије, јасно се уочава да су при

заваривању РЕЛ / МАГ технологијом добијене знатно веће вредности него код технологије МАГ / МАГ.

Табела 5.1. Упоредне вредности енергије лома и ударне жилавости

Место испитивања	Број узорка	Енергија лома, J		Ударна жилавост, J / cm ²	
		Плоча 1 РЕЛ / МАГ	Плоча 2 МАГ/ МАГ	Плоча 1 РЕЛ/ МАГ	Плоча 2 МАГ/ МАГ
Лице шава	1.	44,54	25,27	55,68	31,58
	2.	52,05	30,23	65,07	37,78
	3.	47,31	24,84	59,14	31,05
	4.	49,21	26,29	61,52	32,87
	5.	35,95	35,30	44,94	44,13
Корен шава	1.	30,67	16,94	38,34	21,18
	2.	27,33	20,36	34,16	25,45
	3.	45,03	17,65	56,29	22,06
	4.	26,12	15,32	32,65	19,15
Корен шава – линија стапања	1.	50,53	18,44	63,16	23,05
	2.	28,29	25,95	35,36	32,44
	3.	34,84	18,52	43,55	23,15
	4.	34,66	24,50	43,32	30,63
	5.	34,93	29,78	43,67	37,23

5.1.5. Закључно разматрање

На основу испитивања затезањем, макроскопског и микроскопског испитивања и мерења тврдоће, није било могуће да се одреди која је од ове две технологије повољнија, јер су им вредности биле сличне.

Коначну оцену, у поређењу технологија заваривања, донеле су вредности ударне жилавости, која је у технологији РЕЛ / МАГ имала знатно више вредности него у технологији МАГ / МАГ, па из тог разлога прва технологија није замењена.

5.2. КОМЕНТАР ДРУГОГ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНОГ ИСПИТИВАЊА

Коментар се односи на испитивање тврдоће, микроструктуре и жилавости заварених спојева према технологијама РЕЛ / МАГ и МАГ / МАГ при извођењу коренских пролаза у заштити мешавине гаса $\text{Ar} + \text{CO}_2 = 82\% + 18\%$.

5.2.1. Испитивање тврдоће

Металографски узорци плоча 1 и 2 за испитивање макроструктуре јасно указују издвојене зоне које су заварене различитим додатним материјалима. У обе варијанте 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. Ако поредимо измерене тврдоће линије I – I варијанте 1 са линијом I – I варијанте 2 уочавамо врло сличне вредности тврдоће, што је и очекивано с обзиром да се ради о истом додатном материјалу. Вредности тврдоће по правцима II – II и III – III у обе варијанте су међусобно врло уједначене иако су заварене различитим поступцима заваривања.

Уједначеност измерених вредности тврдоће указује да се у металу шава добила врло слична структура у обе заварене плоче.

Критичне вредности тврдоће у обе варијанте нису забележене што наводи на закључак да је при заваривању обе плоче извршено контролисано предгревање и одржавање међупролазне температуре.

5.2.2. Испитивање микроструктуре

Микроструктурни преглед је извршен 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 материјалу шава.

5.2.2.1. Варијанта 1 – плоча заварена коришћењем РЕЛ / МАГ технологије

Основни материјал има ситнозрнасту сорбитну структуру.

У ЗУТ-у је дошло до незнатног укрупњавања зрна, али се и даље задржала врло повољна сорбитно – перлитна структура.

На линији II – II, у металу шава уочена је микропрслина која је вероватно последица локалне концентрације напона.

5.2.2.2. Варијанта 2 – плоча заварена коришћењем МАГ / МАГ технологије

Испитивање микроструктуре на овом узорку јасно указује уједначеност величине зрна по целом пресеку шава, што је врло повољно. При заваривању коришћењем ове технологије у ЗУТ-у, а нарочито у металу шава није дошло до деградације основног материјала. У ЗУТ-у, у сва три правца, је дошло до незнатног укрупњавања зрна, односно сорбитна структура основног материјала је прешла у сорбитно – перлитну структуру. Нарочито повољно за изабрану технологију је што је у металу шава добијена иста, сорбитна, структура као у основном материјалу.

5.2.3. Испитивање ударне жилавости

До завршетка овог рада није извршено испитивање ударне жилавости, па из тог разлога резултати овог испитивања нису приказани.

5.2.4. Закључни коментар

Добијени резултати испитивања макроструктуре и микроструктуре као и измерене вредности тврдоће нису довољни да се оцени која је технологија заваривања повољнија. Тек по добијању резултата испитивања ударне жилавости моћи ће да се оцени која ће се технологија заваривања применити.

6. ЗАКЉУЧАК

Заваривање челика повишене јачине данас се успешно остварује применом конвенционалних поступака заваривања топљењем. Добијају се заварени спојеви који се својим механичким карактеристикама апсолутно приближавају карактеристикама основног материјала. Челици повишене јачине повољном ценом, механичко – металуршким особинама, смањеном тежином конструкције и доброј заварљивости намећу се као опште прихваћени конструкциони материјали за израду високо одговорних конструкција.

Имајући у виду да је добијање челика повишене јачине условљено применом комплексних комбинација металуршких и термомеханичких процеса, од посебног је значаја очување њихових повољних особина при заваривању. У овом раду дата су општа објашњења везана за проблематику заварљивости ових челика. Нарочито се указује на:

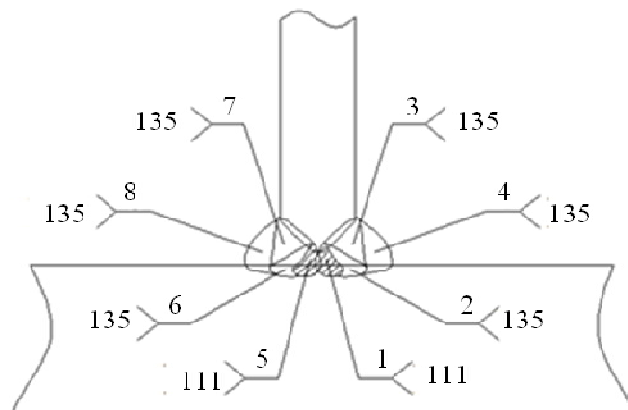
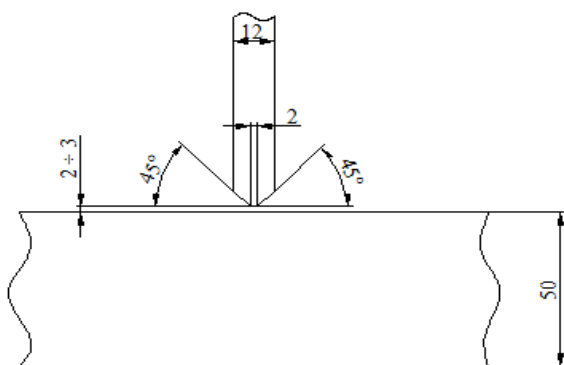
- врсте челика повишене јачине;
- могућности повећања јачине челика;
- металуршке и технолошке проблеме заварљивости;
- експерименталне методе за оцену заварљивости;
- проблеме заварљивости челика повишене јачине;
- заварљивост и склоност челика S690 QL ка образовању прслина, као и мерама за њихово спречавање;
- експериментална испитивања у циљу прописивања најповољније технологије заваривања челика S690 QL.

После детаљне анализе најважнијих својстава основног материјала и процене његове заварљивости, избора најповољније комбинације додатних материјала, поступка и технологије заваривања, као и спроведених испитивања утврђена је најповољнија технологија заваривања, која је нашла своју примену у пракси.

Пресудан утицај на избор оптималне технологије испитивања дали су резултати испитивања ударне жилавости, јер се на основу осталих параметара испитивања спојеви изведени РЕЛ / МАГ и МАГ / МАГ технологијама нису много разликовали. Повољнију ударну жилавост има спој изведен РЕЛ / МАГ технологијом. Иако је стално присутан захтев за повећањем продуктивности, у случају заваривања челика S690 QL, технологија заваривања мора да се изабере на основу експерименталних резултата испитивања који испуњавају механичке карактеристике конструкције. Основни захтев при конструисању је поузданост, па продуктивност при изради конструкције, као утицајни фактор, не сме да има предност при одабиру оптималне технологије заваривања.

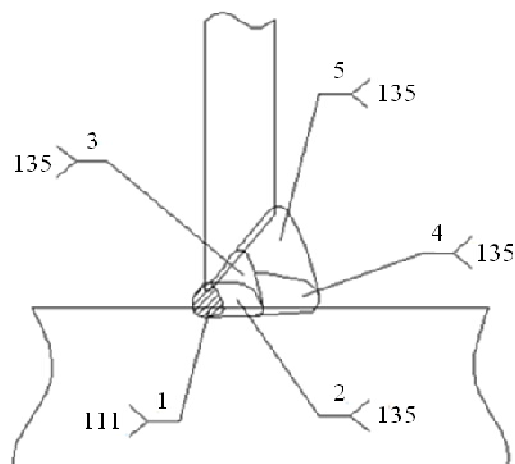
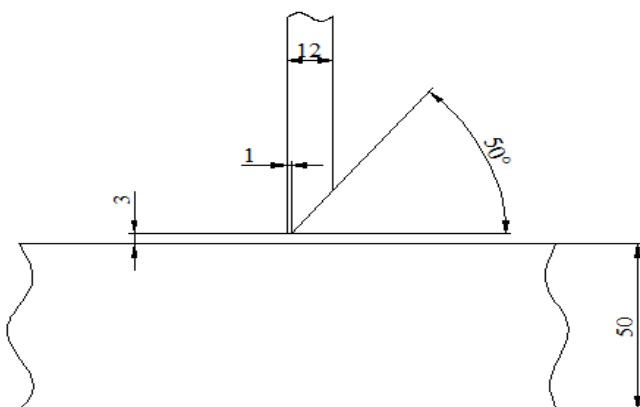
ТЕХНОЛОШКИ ЛИСТ ЗА ЗАВАРИВАЊЕ БР. 1

1.	Назив производа		Склоп 1		НАПОМЕНА: 4. ОБЛИК ЖЛЕБА (SRPS CT3.011) BW – сучеони спој FW – угаони спој S – сечење маказама G – гасно сечење P – сечење плазмом ARC - AIR – поступак M – машинско сечење 5. ДОДАТНИ МАТЕРИЈАЛ Nm – без ДМ Wm – са ДМ (SRPS, DIN, ISO, фабр. ознака) 6. ПРЕДГРЕВАЊЕ GG – гасни грејач EG – електрични грејач PT – пећ за термичку обраду TS – термо креде CT – контактни термометар TE – термо пар 6.1 Поступак мерења температуре LM – ласерски мерач 7. ПОСТУПАК ЗАВАРИВАЊА 111 – РЕЛ 141 – ТИГ 131 – МИГ 311 – Г 135 – МАГ 121 – ЕПП 136 – МАГ (пуњена жица) 7.1 Положај заваривања РА – положен РЕ – надглавни РФ – вертикални на горе РГ – вертикални на доле 10. КОНТРОЛА V – визуелна Rö – радиографска Uz – ултразвучна MF – магнетофлуks PT – пенетранти
	Назив /врста дела				
	Број цртежа				
2.	Број шава				
3.	Основни материјал (ОМ)		WELDOX 700		
4.	Тип споја (дебљина у mm)		BW K12	BW K12	
	Начин припреме		M	M	
5.	Ознака материјала		INOX B 18/8/6	MIG 75	
	Пречник у mm		φ3,25	φ1,2	
	Темп. (°C) / време сушења (h)		300 °C/2h		
	Врста гаса – праха			M21 EN 14175	
6.	Температура предгревања T _p у °C		200 °C	200 °C	
	Међупрол. температура T _{interpass} у °C		200 ÷ 225 °C	200 ÷ 225 °C	
	Температура одржавања				
	Поступак мерења		TS / CT	TS / CT	
	Уређај за грејање		LM	LM	
7.	Поступак заваривања		111	135	
	Положај заваривања		PB	PB	
	Јачина струје у А		120 ÷ 140	240 ÷ 250	
	Напон лука у V		24 ÷ 26	24 ÷ 26	
	Брзина додавања жице у m/min				
	Брзина заваривања у cm/s			0,35 ÷ 0,45	
	Проток заштитног гаса у l/min			14 ÷ 18	
	Број пролаза		2	6	
	Уређај за заваривање		LCH 375	K 4000 / K 400	
8.	Оспособљеност заваривача		SRPS EN 287 – 1		
9.	Термичка обрада	Врста			
		Темп. (°C) / време (h)			
10.	Контрола (врста, %)		V – 100%	V – 100%	
				PT – 100%	
				Uz – 100%	



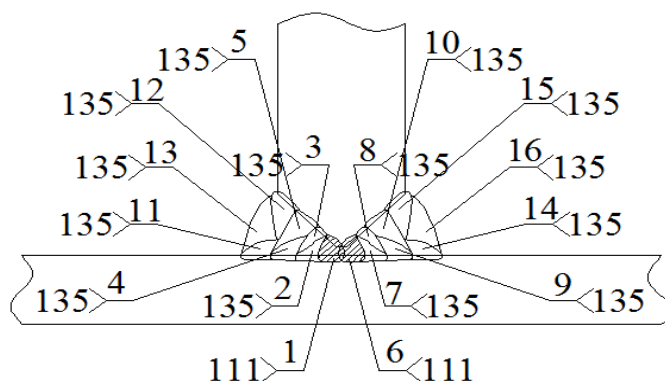
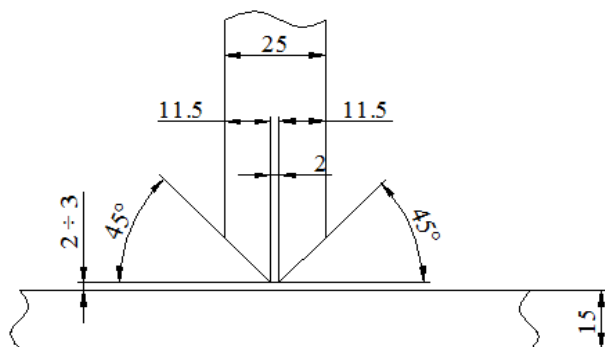
ТЕХНОЛОШКИ ЛИСТ ЗА ЗАВАРИВАЊЕ БР. 2

1.	Назив производа		Склоп 1		НАПОМЕНА: 4. ОБЛИК ЖЛЕБА (SRPS CT3.011) BW – сучеони спој FW – угаони спој S – сечење маказама G – гасно сечење P – сечење плазмом ARC - AIR – поступак M – машинско сечење 5. ДОДАТНИ МАТЕРИЈАЛ Nm – без ДМ Wm – са ДМ (SRPS, DIN, ISO, фабр. ознака) 6. ПРЕДГРЕВАЊЕ GG – гасни грејач EG – електрични грејач PT – пећ за термичку обраду TS – термо креде CT – контактни термометар TE – термо пар 6.1 Поступак мерења температуре LM – ласерски мерач 7. ПОСТУПАК ЗАВАРИВАЊА 111 – РЕЛ 141 – ТИГ 131 – МИГ 311 – Г 135 – МАГ 121 – ЕПП 136 – МАГ (пуњена жица) 7.1 Положај заваривања PA – положен PE – надглавни PF – вертикални на горе PG – вертикални на доле 10. КОНТРОЛА V – визуелна Rö – радиографска Uz – ултразвучна MF – магнетофлуks PT – пенетранти
	Назив /врста дела				
	Број цртежа				
2.	Број шава				
3.	Основни материјал (ОМ)		WELDOX 700		
4.	Тип споја (дебљина у mm)		BW ½V12	BW ½V12	
	Начин припреме		M	M	
5.	Ознака материјала		INOX B 18/8/6	MIG 75	
	Пречник у mm		φ3,25	φ1,2	
	Темп. (°C) / време сушења (h)		300 °C/2h		
	Врста гаса – праха			M21 EN 14175	
6.	Температура предгревања T _p у °C		200 °C	200 °C	
	Међупрол. температура T _{interpass} у °C		200 ÷ 225 °C	200 ÷ 225 °C	
	Температура одржавања				
	Поступак мерења		TS / CT	TS / CT	
	Уређај за грејање		LM	LM	
7.	Поступак заваривања		111	135	
	Положај заваривања		PB	PB	
	Јачина струје у A		120 ÷ 140	240 ÷ 250	
	Напон лука у V		24 ÷ 26	24 ÷ 26	
	Брзина додавања жице у m/min				
	Брзина заваривања у cm/s			0,35 ÷ 0,45	
	Проток заштитног гаса у l/min			14 ÷ 18	
	Број пролаза		1	4	
	Уређај за заваривање		LCH 375	K 4000 / K 400	
8.	Оспособљеност заваривача		SRPS EN 287 – 1		
9.	Термичка обрада	Врста			
		Темп. (°C) / време (h)			
10.	Контрола (врста, %)		V – 100%	V – 100%	
				PT – 100%	
				Uz – 100%	



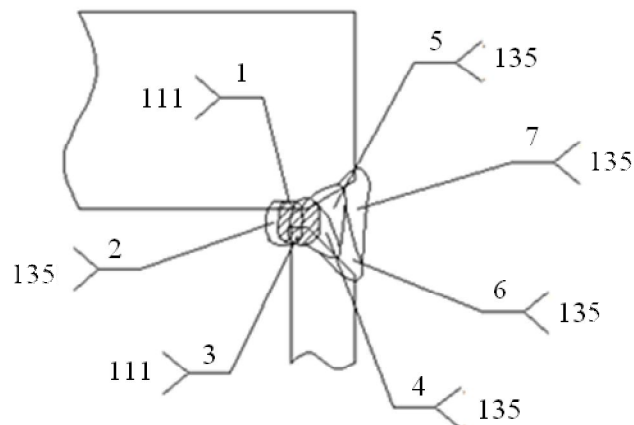
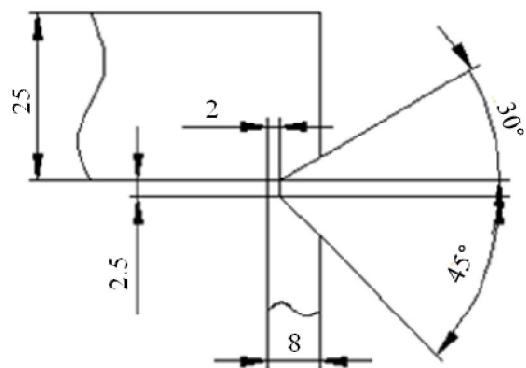
ТЕХНОЛОШКИ ЛИСТ ЗА ЗАВАРИВАЊЕ БР. 3

1.	Назив производа		Склоп 2		НАПОМЕНА: 4. ОБЛИК ЖЛЕБА (SRPS СТ3.011) BW – сучеои спој FW – угаони спој S – сечење маказама G – гасно сечење P – сечење плазмом ARC - AIR – поступак M – машинско сечење 5. ДОДАТНИ МАТЕРИЈАЛ Nm – без ДМ Wm – са ДМ (SRPS, DIN, ISO, фабр. ознака) 6. ПРЕДГРЕВАЊЕ GG – гасни грејач EG – електрични грејач PT – пећ за термичку обраду TS – термо креде CT – контактни термометар TE – термо пар 6.1 Поступак мерења температуре LM – ласерски мерач 7. ПОСТУПАК ЗАВАРИВАЊА 111 – РЕЛ 141 – ТИГ 131 – МИГ 311 – Г 135 – МАГ 121 – ЕПП 136 – МАГ (пуњена жица) 7.1 Положај заваривања РА – положен РЕ – надглавни РF – вертикални на горе РG – вертикални на доле 10. КОНТРОЛА V – визуелна Rδ – радиографска Uz – ултразвучна MF – магнетофлуks PT – пенетранти
	Назив /врста дела				
	Број цртежа				
2.	Број шава				
3.	Основни материјал (ОМ)		WELDOX 700		
4.	Тип споја (дебљина у mm)		BW K25	BW K25	
	Начин припреме		M	M	
5.	Ознака материјала		INOX B 18/8/6	MIG 75	
	Пречник у mm		φ3,25	φ1,2	
	Темп. (°C) / време сушења (h)		300 °C/2h		
	Врста гаса – праха			M21 EN 14175	
6.	Температура предгревања T _p у °C		200 °C	200 °C	
	Међупрол. температура T _{interpass} у °C		200 ÷ 225 °C	200 ÷ 225 °C	
	Температура одржавања				
	Поступак мерења		TS / CT	TS / CT	
	Уређај за грејање		LM	LM	
7.	Поступак заваривања		111	135	
	Положај заваривања		PB	PB	
	Јачина струје у A		120 ÷ 140	240 ÷ 250	
	Напон лука у V		24 ÷ 26	24 ÷ 26	
	Брзина додавања жице у m/min				
	Брзина заваривања у cm/s			0,35 ÷ 0,45	
	Проток заштитног гаса у l/min			14 ÷ 18	
	Број пролаза		2	14	
	Уређај за заваривање		LCH 375	K 4000 / K 400	
8.	Оспособљеност заваривача		SRPS EN 287 – 1		
9.	Термичка обрада	Врста			
		Темп. (°C) / време (h)			
10.	Контрола (врста, %)		V – 100%	V – 100%	
				PT – 100%	
				Uz – 100%	



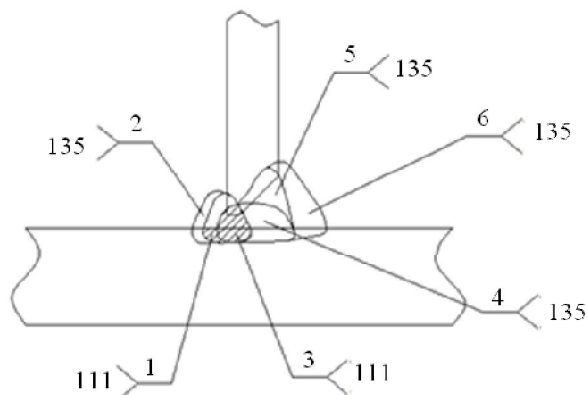
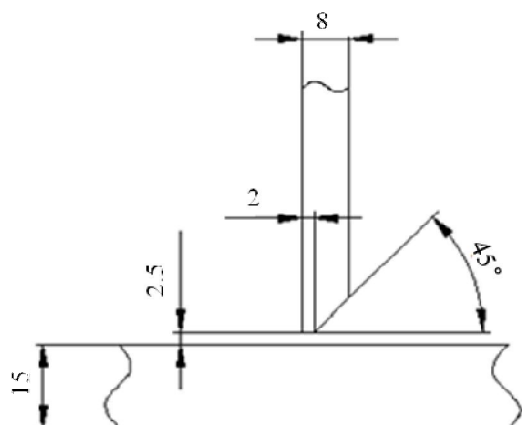
ТЕХНОЛОШКИ ЛИСТ ЗА ЗАВАРИВАЊЕ БР. 4

1.	Назив производа		Склоп 2		НАПОМЕНА: 4. ОБЛИК ЖЛЕБА (SRPS CT3.011) BW – сучеони спој FW – угаони спој S – сечење маказама G – гасно сечење P – сечење плазмом ARC - AIR – поступак M – машинско сечење 5. ДОДАТНИ МАТЕРИЈАЛ Nm – без ДМ Wm – са ДМ (SRPS, DIN, ISO, фабр. ознака) 6. ПРЕДГРЕВАЊЕ GG – гасни грејач EG – електрични грејач PT – пећ за термичку обраду TS – термо креде CT – контактни термометар TE – термо пар 6.1 Поступак мерења температуре LM – ласерски мерач 7. ПОСТУПАК ЗАВАРИВАЊА 111 – РЕЛ 141 – ТИГ 131 – МИГ 311 – Г 135 – МАГ 121 – ЕПП 136 – МАГ (пуњена жица) 7.1 Положај заваривања РА – положен РЕ – надглавни РФ – вертикални на горе РГ – вертикални на доле 10. КОНТРОЛА V – визуелна Rδ – радиографска Uz – ултразвучна MF – магнетофлуks PT – пенетранти
	Назив /врста дела				
	Број цртежа				
2.	Број шава				
3.	Основни материјал (ОМ)		WELDOX 700		
4.	Тип споја (дебљина у mm)		BW ½V12	BW ½V12	
	Начин припреме		M	M	
5.	Ознака материјала		INOX B 18/8/6	MIG 75	
	Пречник у mm		φ3,25	φ1,2	
	Темп. (°C) / време сушења (h)		300 °C/2h		
	Врста гаса – праха			M21 EN 14175	
6.	Температура предгревања T _p у °C		200 °C	200 °C	
	Међупрол. температура T _{interpass} у °C		200 ÷ 225 °C	200 ÷ 225 °C	
	Температура одржавања				
	Поступак мерења		TS / CT	TS / CT	
	Уређај за грејање		LM	LM	
7.	Поступак заваривања		111	135	
	Положај заваривања		PB	PB	
	Јачина струје у A		120 ÷ 140	240 ÷ 250	
	Напон лука у V		24 ÷ 26	24 ÷ 26	
	Брзина додавања жице у m/min				
	Брзина заваривања у cm/s			0,35 ÷ 0,45	
	Проток заштитног гаса у l/min			14 ÷ 18	
	Број пролаза		2	5	
	Уређај за заваривање		LCH 375	K 4000 / K 400	
8.	Оспособљеност заваривача		SRPS EN 287 – 1		
9.	Термичка обрада	Врста			
		Темп. (°C) / време (h)			
10.	Контрола (врста, %)		V – 100%	V – 100%	
				PT – 100%	
				Uz – 100%	



ТЕХНОЛОШКИ ЛИСТ ЗА ЗАВАРИВАЊЕ БР. 5

1.	Назив производа				НАПОМЕНА: 4. ОБЛИК ЖЛЕБА (SRPS CT3.011) BW – сучеои спој FW – угаони спој S – сечење маказама G – гасно сечење P – сечење плазмом ARC - AIR – поступак M – машинско сечење 5. ДОДАТНИ МАТЕРИЈАЛ Nm – без ДМ Wm – са ДМ (SRPS, DIN, ISO, фабр. ознака) 6. ПРЕДГРЕВАЊЕ GG – гасни грејач EG – електрични грејач PT – пећ за термичку обраду TS – термо креде CT – контактни термометар TE – термо пар 6.1 Поступак мерења температуре LM – ласерски мерач 7. ПОСТУПАК ЗАВАРИВАЊА 111 – РЕЛ 141 – ТИГ 131 – МИГ 311 – Г 135 – МАГ 121 – ЕПП 136 – МАГ (пуњена жица) 7.1 Положај заваривања РА – положен РЕ – надглавни РФ – вертикални на горе РГ – вертикални на доле 10. КОНТРОЛА V – визуелна Rö – радиографска Uz – ултразвучна MF – магнетофлуks PT – пенетранти
	Назив /врста дела		Склоп 2		
	Број цртежа				
2.	Број шава				
3.	Основни материјал (ОМ)		WELDOX 700		
4.	Тип споја (дебљина у mm)		BW ½V12	BW ½V12	
	Начин припреме		M	M	
5.	Ознака материјала		INOX B 18/8/6	MIG 75	
	Пречник у mm		φ3,25	φ1,2	
	Темп. (°C) / време сушења (h)		300 °C/2h		
	Врста гаса – праха			M21 EN 14175	
6.	Температура предгревања T _p у °C		200 °C	200 °C	
	Међупрол. температура T _{interpass} у °C		200 ÷ 225 °C	200 ÷ 225 °C	
	Температура одржавања				
	Поступак мерења		TS / CT	TS / CT	
	Уређај за грејање		LM	LM	
7.	Поступак заваривања		111	135	
	Положај заваривања		PB	PB	
	Јачина струје у А		120 ÷ 140	240 ÷ 250	
	Напон лука у V		24 ÷ 26	24 ÷ 26	
	Брзина додавања жице у m/min				
	Брзина заваривања у cm/s			0,35 ÷ 0,45	
	Проток заштитног гаса у l/min			14 ÷ 18	
	Број пролаза		2	4	
	Уређај за заваривање		LCH 375	K 4000 / K 400	
8.	Оспособљеност заваривача		SRPS EN 287 – 1		
9.	Термичка обрада	Врста			
		Темп. (°C) / време (h)			
10.	Контрола (врста, %)		V – 100%	V – 100%	
				PT – 100%	
				Uz – 100%	



ЛИТЕРАТУРА

1. **А. Тонејц:** *Физика наноматеријала*, Физички завод Природословно математичког факултета у Загребу, Загреб, 2011.
2. **С. Кожух:** Специјални челици, Свеучилиште у Загребу, Металуршки факултет, Сисак, 2010.
3. **С. Седмак, М. Николић, В. Војновић:** *Приручник законструисање процесне опреме*, Технолошко – Металуршки факултет, Универзитет у Београду, Београд, 1994.
4. **М. Јовановић, Д. Адамовић, В. Лазих:** *Технологија заваривања – приручник, друго издање*, помоћни универзитетски уџбеник, Крагујевац, 2011.
5. **Д. Арсић:** *Оцена заварљивости и избор најповољније технологије заваривања челика повишене јачине класе S690 QL*, мастер рад, Факултет Инжењерских Наука, Универзитет у Крагујевцу, Крагујевац, 2013.
6. EUROPEAN STRUCTURAL STEEL STANDARD EN 10025 : 2004
7. **А. Радовић:** *Металуршки и технолошки проблеми заварљивости*, Војнотехнички институт, Београд.
8. **В. Грабулов:** *Експериментална оцена особина заварених спојева – методе за оцену заварљивости*, Војнотехнички институт, Београд.
9. **М. Јовановић, В. Лазих:** *Упутство за заваривање челика повишене јачине Челик: WELDOX 700 (S690 QL)*, Универзитет у Крагујевцу, Факултет Инжењерских Наука, Крагујевац, Април 2012.
10. **М. Сарван:** *Технологија заваривања*, Универзитет у Приштини, Приштина, 1996.
11. **Н. Мишина, И. Полајнар, Ж.Билић:** *Производња и заварљивост микролегираних челика*, 6. Међународно знанствено – стручно савјетовање, Славонски Брод, 26 – 28 Листопад 2011.
12. **Н. Харачић:** *Бор и нисколегирани челици за цементацију и директно каљење*, Машински факултет у Зеници, Универзитет у Сарајеву, Машинство 4 (6), стране 215 – 226, 2002.
13. <http://www.masteel.co.uk/s690-ql.htm>, Јул 2013.
14. afrodita.rcub.bg.ac.rs/~rzoran/6-MM_ho.pdf, Јул 2013.
15. <http://afrodita.rcub.bg.ac.rs/~rzoran/ZAVAELEKT.pdf>, Јул 2013.
16. http://www.google.rs/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=5&sqi=2&ved=0CEsQFjAE&url=http%3A%2F%2Fwww.maf.unssa.rs.ba%2Findex.php%3Foption%3Dcom_docman%26task%3Ddoc_download%26gid%3D97%26Itemid%3D44&ei=ZRX5UfXwFI71sgaa54CoCg&usg=AFQjCNEvOpTlc6NzlfQsRAFiFIAt610ioQ&sig2=pIR6ZG49jOCreuUNEs5QPw&bvm=bv.49967636,d.Yms, Јул 2013.
17. http://www.google.rs/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=7&ved=0CF0QFjAG&url=http%3A%2F%2Fwww.maf.unssa.rs.ba%2Findex.php%3Foption%3Dcom_docm

an%26task%3Ddoc_download%26gid%3D94%26Itemid%3D44&ei=bjj-UbDGKeiN4gTvroCYAg&usg=AFQjCNGGV4KPbNRL7P_ocXdEG1zWf_IuJw&sig2=JFJmrBswNTszmx0PZYdYrQ&bvm=bv.50165853,d.bGE&cad=rja, Јул 2013.

18. <http://www.mf.unze.ba/materijali/Tehnoeduka-DINAMICKO%20ISPITIVANJE%20MATERIJALA.pdf>, Јул 2013.
19. <http://www.rgf.bg.ac.rs/predmet/RO/III%20semestar/Tehnologija%20materijala/Vezbe/vezba%204-P.pdf>, Јул 2013.
20. http://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar/io_dipl5/5_3_4.pdf, Јул 2013.
21. http://mit.mas.bg.ac.rs/E_Biblioteka/OWP_2010/Materijali1/lekcija1.html, Јул 2013.
22. <http://www.mf.unze.ba/materijali/dijagram.htm>, Јул 2013.