



УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ  
ФАКУЛТЕТ ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА  
УНИВЕРЗИТЕТА У КРАГУЈЕВЦУ

Милош С. Лазаревић

**ИСТРАЖИВАЊЕ ПРОЦЕСА ЕКСПЛОЗИВНОГ  
ЗАВАРИВАЊА И КАРАКТЕРИЗАЦИЈА  
ДОБИЈЕНОГ СПОЈА ВИСОКОЛЕГИРАНОГ  
АЛАТНОГ И НИСКОУГЉЕНИЧНОГ ЧЕЛИКА**

докторска дисертација

Крагујевац, 2023.



UNIVERSITY OF KRAGUJEVAC  
FACULTY OF ENGINEERING  
UNIVERSITY OF KRAGUJEVAC

Miloš S. Lazarević

**INVESTIGATION OF EXPLOSIVE WELDING  
PROCESS AND CHARACTERIZATION OF THE  
OBTAINED JOINT OF HIGH-ALLOY TOOL AND LOW  
CARBON STEEL**

Doctoral Dissertation

Kragujevac, 2023.

<b>Аутор</b>
Име и презиме: Милош С. Лазаревић
Датум и место рођења: 26.01.1993. године, Крагујевац
Садашње запослење:
<b>Докторска дисертација</b>
Наслов: ИСТРАЖИВАЊЕ ПРОЦЕСА ЕКСПЛОЗИВНОГ ЗАВАРИВАЊА И КАРАКТЕРИЗАЦИЈА ДОБИЈЕНОГ СПОЈА ВИСОКОЛЕГИРАНОГ АЛАТНОГ И НИСКОУГЉЕНИЧНОГ ЧЕЛИКА
Број страница:
Број слика:
Број библиографских података:
Установа и место где је рад израђен: Универзитет у Крагујевцу, Факултет инжењерских наука
Научна област (УДК): Машинско инжењерство/Високоенергетска обрада, обликовање експлозијом, итд.; Испитивање материјала, грешке материјала, заштита материјала
<b>Ментор/Коментор:</b> Др Богдан Недић, редовни професор, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу.
<b>Оцена и одбрана</b>
Датум пријаве теме: 22.04.2021. године
Број одлуке и датум прихватања теме докторске дисертације: IV-04-345/8 од 12.05.2021. године
Комисија за оцену научне заснованости теме и испуњености услова кандидата:
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Др Слободан Митровић, редовни професор, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу;</li> <li>2. Др Драган Адамовић, редовни професор, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу;</li> <li>3. Др Драган Џунић, доцент, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу</li> <li>4. Др Јовица Богданов, доцент, Војна академија, Универзитет одбране у Београду;</li> <li>5. Др Богдан Недић, редовни професор, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу.</li> </ol>
Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације:
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Др Слободан Митровић, редовни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу;</li> <li>2. Др Драган Адамовић, редовни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу;</li> <li>3. Др Драган Џунић, доцент, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу;</li> <li>4. Др Даница Бајић, доцент, Војна академија Универзитета одбране у Београду, Војнотехнички институт, Београд;</li> <li>5. Др Ана Алил, научни сарадник, Институт за хемију, технологију и металургију - ИХТМ, Универзитет у Београду.</li> </ol>
Датум одбране докторске дисертације:

## ЗАХВАЛНОСТ

На самом почетку, велику захвалност дугујем свом ментору проф. др Богдану Недићу, који ме је својим саветима водио кроз докторске студије.

Велику захвалност дугујем и доц. др Даници Бајић научном сараднику Војнотехничког института (ВТИ), која ми је омогућила извођење експеримента експлозивног заваривања у фирми „Traual“ у Крушевцу и помогла ми да урадим део лабораторијских испитивања.

Захваљујем и фирмама „Traual“ из Крушевца и Техничком ремонтном заводу из Крагујевца, који су ми обезбедили експлозив, пиротехнички тим који су учествовали у извођењу експеримента.

Велико хвала др Ани Алил научном сараднику Института за хемију, технологију и металургију (ИНТМ) на уступању опреме за испитивања узорака недеструктивним методама.

IMW институту, Крагујевац се захваљујем на коришћењу опреме и испитивању деструктивним методама.

Такође велико хвала Нади Илић и Александру Ћитићу истраживачима Војнотехничког института (ВТИ), на помоћи коју су ми пружили око анализе металографије споја добијених узорака и омогућили мерење микротврдоће истих.

Захваљујем се Ненаду Спасићу и Јасмини Зечевић за уступање радионице за обраду и припрему материјала.

Велико хвала др Ненаду Сакану, вишем научном сараднику, Института за физику у Београду и др Сањи Сакан, научном саветнику ИХТМ-а, Универзитета у Београду за моралну и пријатељску подршку.

Захваљујем се и осталим фирмама које су поменуте у докторској дисертацији.

Посебно се захваљујем Весни Мијаиловић Васанта за подстицај, помоћ и пријатељску подршку током мојих основних, мастер и докторских студија.

Неизмерно сам захвалан својим родитељима, мајци Мили и оцу Слободану Лазаревић за безграничну љубав, подршку и помоћ коју су ми пружили током школовања, одрастања и живота уопште. Њима у част, посвећујем ову дисертацију.

У Крагујевцу, август 2023. год.

Милош С. Лазаревић

## САЖЕТАК

У уводном делу дати су циљеви докторске дисертације, односно изучавање процеса примене неконвенционалног поступка експлозивног заваривања високолегираног алатног челика и нискоугљеничног конструктивног челика и дефинисане су методе за утврђивање квалитета добијеног споја. Дате су основне хипотезе од којих се полази. Дат је преглед основних метода које ће се користити за анализу експлозивног завареног споја. Оне обухватају аналитичке методе за анализу и обраду добијених резултата, и експерименталне методе уз примену савремене мерне опреме. Наведена је потенцијална примена експлозивног заваривања за израду индустријских ножева. Поседовање одговарајућих алата за сечење помоћи ће у побољшању процеса и повећању профитабилности. За добијање квалитетног реза ножеви се израђују од погодног материјала за своју намену у индустрији. Наведене су потенцијалне предности ножа добијене овим поступком.

Друго поглавље се бави теоријским аспектом експлозивног заваривања. Дати су основни појмови експлозивног заваривања. Дата је табела са комбинацијама метала који су успешно заварени. Описан је и неопходан прорачун за добијање већине параметара за извођење експеримента са образложењем важности истих.

Треће поглавље се бави безбедносним аспектом у процесу експлозивног заваривања. Приликом извођења поступка експлозивног заваривања мора се строго водити рачуна о безбедности. Приказан је прорачун критичног растојања чији је основни параметар био оштећење слуха. Кратак осврт је на прорачуну утицаја термалног ефекта. Дата је груба процена структуралних оштећења услед експлозије уз помоћ емпиријски изведених модела на основу анализе несрећа, испитивања и података о ратној штети. Остале потенцијалне опасности као што је разлетање фрагмената приликом детонације нису узете у обзир.

У четвртном поглављу су приказани прелиминарни прорачуни експлозивног заваривања два челика, прорачун критичног растојања неопходног за безбедно извођење експеримента, кратак опис коришћеног експлозива и пратеће опреме. Такође се приказује поступак експлозивног заваривања опружног челика у сврху прелиминарног испитивања и алатног челика као завршни експеримент. Приказана експериментална поставка обухватала је избор полазних материјала, експлозива, електродетонаторских каписли, плоча, кутијастих елемената, сечење и уклањање оксидног слоја плоча, формирање кутијастих елемената са уметком за електродетонаторску капислу. Обезбеђивање алата и прибора за теренске услове. Обезбеђивање адекватног полигона за извођење експеримента. Обезбеђивање пиротехничког тима за реализацију експеримента.

Пето поглавље се бави описом метода, мерне опреме и начином на који ће бити коришћена у анализи добијених плоча у изведеном експерименту.

Шесто поглавље се бави припремом узорака за различите тестове као што је, ултразвучна дефектоскопија, рендгенографска испитивања, металуршка испитивања, испитивање споја пенетрантима, кавитациона испитивања, испитивање механичких својстава и др. За сва испитивања је коришћена савремена мерна опрема. Резултати испитивања су систематизовани и презентовани у одговарајућим табелама и дијаграмима. Успостављене су међусобне зависности резултата експеримента које омогућавају јаснију слику о параметрима за оцену квалитета оствареног споја. Резултати

експерименталних испитивања ће омогућити стварање услова за будуће формирање нумеричких модела, примену методе коначних елемената и симулацију експлозивног заваривања.

У закључку на основу добијених резултата и анализе извршена је кратка дискусија истих. Приказан је допринос дисертације и дат је осврт на могућа ограничења која су примећена током писања овог рада. Представљени су и правци будућих истраживања експлозивног заваривања.

Кључне речи: Експлозивно заваривање, експлозија, критично растојање, алатни челик, опружни челик, конструкциони челик, испитивање.

## ABSTRACT

In the introductory part, the objectives of the doctoral dissertation are given, that is, the study of the process of applying the unconventional procedure of explosive welding of high-alloy tool steel and low-carbon structural steel and defining the methods for determining the quality of the resulting joint. Basic hypotheses from which to start are given. An overview of the basic methods that will be used for the analysis of an explosively welded joint is given. They include analytical methods for analyzing and processing the obtained results, and experimental methods with the application of modern measuring equipment. The potential application of explosive welding for the production of industrial knives is indicated. Having the right cutting tools will help improve processes and increase profitability. In order to obtain a quality cut, the knives are made of suitable material for their purpose in the industry. The potential advantages of the knife obtained by this process are listed.

The second chapter deals with the theoretical aspect of explosive welding. It describes what explosive welding is and what it includes. A table is given with the combinations of metals that have been successfully welded. The calculation necessary to obtain most of the parameters for performing the experiment is also described, with an explanation of their importance.

The third chapter deals with the safety aspect in the explosive welding process. When performing the explosive welding procedure, safety must be strictly taken into account. The calculation of the critical distance was presented, the main parameter of which was hearing damage. A short review is on the calculation of the influence of the thermal effect. A rough estimate of structural damage from air blasts is provided using empirically derived models based on accident analysis, testing and war damage data. Other potential hazards such as flying fragments during detonation were not taken into account.

In the fourth chapter are presented: the necessary preliminary calculations of the explosive welding of two steels, the calculation of the critical distance necessary for the safe execution of the experiment, a brief description of the explosive used and the accompanying equipment. The procedure of explosive welding of spring steel for the purpose of preliminary testing and tool steel as a final experiment are also shown.

The presented experimental set-up also includes the selection of starting materials, explosives, electro-detonating caps, plates, box elements, etc.

Cutting and removing the oxide layer of plates, forming box elements with an insert for an electric detonator capsule. Provision of tools and accessories for field conditions. Providing an adequate training ground for conducting the experiment.

The fifth chapter deals with the description of the measuring equipment and the way it will be used in the analysis of the plates obtained in the performed experiment.

The sixth chapter deals with the preparation of samples for various tests such as ultrasonic defectoscopy, X-ray tests, metallurgical tests, liquid penetrant testing, cavitation tests, mechanical properties tests, etc. Modern measuring equipment was used for all tests. The test results are systematized and presented in appropriate tables and diagrams. The mutual dependencies of the results of the experiments have been established, which enable a clearer picture of the parameters for evaluating the quality of the achieved joint. The results of the experimental tests will enable the creation of conditions for the future formation of a numerical model for the application of the finite element method for the simulation of explosive welding.

In conclusion, based on the obtained results and analysis, a short discussion of them was made. The contribution of the dissertation is presented and the limitations observed during the writing of this work are highlighted. Future directions of explosive welding research are also presented.

Key words: Explosive welding, explosion, critical distance, tool steel, spring steel, structural steel, testing.



## САДРЖАЈ

<b>1. УВОД</b> .....	<b>1</b>
1.1. Циљ истраживања.....	1
1.2. Основне хипотезе од којих се полази .....	3
1.3. Примењене методе у истраживању експлозивног заваривања .....	3
1.4. Потенцијална примена .....	4
1.5. Структура дисертације .....	5
<b>2. ТЕОРИЈСКИ АСПЕКТ ЕКСПЛОЗИВНОГ ЗАВАРИВАЊА</b> .....	<b>8</b>
2.1. Параметри заваривања .....	11
2.1.1. Уопштене претпоставке.....	12
2.1.2. Брзина удара .....	13
2.1.3. Угао удара и брзинатачке контакта.....	14
2.1.4. Однос масе експлозива и покретне плоче.....	16
2.1.5. Међусобно растојање.....	16
2.1.6. Површина подлоге .....	18
2.1.7. Завршна површинска обрада.....	18
2.1.8. Амплитуда и таласна дужина формираног споја.....	20
2.2. Поставка експлозивног заваривања .....	20
<b>3. БЕЗБЕДНОСНИ АСПЕКТ ИЗВОЂЕЊА ЕКСПЛОЗИВНОГ ЗАВАРИВАЊА</b> .....	<b>23</b>
3.1. Критично растојање у поступку експлозивног заваривања .....	23
3.2. Термални ефекти .....	27
3.3. Ефекти експлозије на објекте .....	27
<b>4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ПОСТАВКА</b> .....	<b>29</b>
4.1. Прорачун параметара експлозивног заваривања.....	29
4.2. Прорачун критичног растојања у поступку експлозивног заваривања.....	40
4.3. Услови експерименталних испитивања .....	46
4.3.1. Експеримент 1 - Прелиминарна испитивања заваривања опружног и конструктивног челика .....	49
4.3.2. Експеримент 2 - Заваривање алатног и конструктивног челика .....	52
<b>5. МЕТОДЕ ИСПИТИВАЊА И МЕРНА ОПРЕМА</b> .....	<b>56</b>
5.1. Метода одређивања брзине детонације.....	56
5.2. Оптичка емисиона спектрометрија.....	59

5.3.	Испитивање топографије површине .....	60
5.4.	Сечење воденим абразивним млазом .....	63
5.5.	Оптички микроскоп (металуршки) .....	64
5.6.	Кавитационо хабање - испитивање.....	64
5.7.	Скенирајући електронски микроскоп.....	68
5.8.	Испитивање ударне жилавости Шарпијевим клатном .....	69
5.9.	Vickers-ов тест тврдоће .....	72
5.10.	Рендгенографско испитивање .....	74
5.11.	Ултразвучна дефектоскопија.....	76
5.12.	Испитивање течним пенетрантима .....	77
5.13.	План испитивања .....	78
<b>6.</b>	<b>РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА.....</b>	<b>82</b>
6.1.	Мерење брзине детонације .....	82
6.2.	Испитивање хемијског састава.....	84
6.3.	Испитивање површине профилометром .....	85
6.4.	Ултразвучна дефектоскопија.....	90
6.5.	Рендгенографија .....	91
6.6.	Припрема и сечење узорака.....	94
6.7.	Резултати испитивања методом течним пенетрантима .....	96
6.8.	Термичка обрада алатног челика .....	100
6.9.	Металографска испитивања .....	101
6.9.1.	Металографска испитивања (опружни/конструкциони челик) .....	101
6.9.2.	Металографска испитивања (алатни/конструкциони челик).....	113
6.9.3.	Металографска испитивања након каљења (алатни/конструкциони челик) 125	
6.10.	Кавитационо испитивање .....	127
6.11.	Испитивања ударне жилавости .....	136
6.12.	Испитивање тврдоће по Vickers-у.....	142
6.13.	Испитивање тврдоће након каљења по Vickers-у.....	145
6.14.	Тест равним секачем .....	150
<b>7.</b>	<b>ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА .....</b>	<b>154</b>
<b>8.</b>	<b>ЛИТЕРАТУРА .....</b>	<b>158</b>

## СПИСАК СЛИКА

Ознака	Назив слике
Слика 1.1.	Разне врсте кружних ножева.
Слика 1.2.	Разне врсте назубљених ножева за одсецање.
Слика 1.3.	Разне врсте масивнијих равних ножева.
Слика 2.1.	Шематски приказ експлозивног заваривања: 1-продукти детонације, 2-облога за основни материјал, 3-експлозив, 4-дистанцери, 5-тачка спајања, 6-основни материјал.
Слика 2.2.	Подручје заваривања (Welding window).
Слика 2.3.	Геометрија паралелног заваривања.
Слика 2.4.	Основна геометрија нагнутог заваривања. Праве линије показују положаје детонације и фронта судара убрзо након иницирања
Слика 2.5.	Примери неповезаних површина (осенчено) повезани са иницираним пуњењем, (а) Угаона иницијација, (б) Централна иницијација.
Слика 2.6.	Уравнотежена паралелна геометрија (шема). Испрекидане линије показују положаје урушеног слоја када фронтови детонације достигну приказани положај.
Слика 4.1.	Област заварљивости у поступку експлозивног заваривања (Опружни челик).
Слика 4.2.	Област заварљивости у поступку експлозивног заваривања (Алатни челик).
Слика 4.3.	Експериментална поставка експлозивног заваривања.
Слика 4.4.	Критично растојање у зависности од притиска (6,9 kPa).
Слика 4.5.	Критично растојање у зависности од притиска (35 kPa).
Слика 4.6.	Критично растојање у зависности од притиска у случају привременог губитка слуха.
Слика 4.7.	Критично растојање у зависности од притиска у случају пуцања бубне опне.
Слика 4.8.	Матрица ризика критичног растојања.
Слика 4.9.	Поступак за мерење запреминске густине експлозивног материјала.
Слика 4.10.	Спољни изглед снопа електродетонаторских каписли (лево) и изглед попречног пресека електродетонаторске каписле <i>EK-40-69</i> (десно): 1 – електрични проводници; 2 – заптивач; 3 – тело каписле; 4 – електрична запаљива главица; 5 – навлака; 6 – покривка; 7 – иницијално (примарно) експлозивно пуњење; 8 – бризантно (секундарно) експлозивно пуњење.
Слика 4.11.	Спољни изглед (лево) и изглед уздужног пресека детонаторске каписле број 8: 1 – тело (чаура); 2 – покривка; 3 – иницијално (примарно) експлозивно пуњење ( <i>EП</i> ) од олово тринитрорезорцината; 4 – иницијално (примарно) од олово азида; 5 и 6 – бризантно (секундарно) <i>EП</i> .
Слика 4.12.	Експериментална поставка експлозивног заваривања, паралелна конфигурација. а) експериментална поставка, б) експериментална поставка у време експлозије, ц) увећани приказ.
Слика 4.13.	Металне плоче и кутије за заваривање експлозијом.
Слика 4.14.	Плоче добијене експлозивним заваривањем Опружни/Конструкциони челик.
Слика 4.15.	Металне плоче и кутије за заваривање експлозијом.
Слика 4.16.	Процес монтаже за извођење експеримента.

Слика 4.17.	Финална поставка пред активирање.
Слика 4.18.	Плоче добијене експлозивним заваривањем алатни/конструкциони челик.
Слика 5.1.	Принцип одређивања брзине детонације.
Слика 5.2.	Скица узорка за мерење брзине детонације.
Слика 5.3.	Фотодетектор са 16 независних канала.
Слика 5.4.	Изглед уређаја „Tektronix MSO2022B“ (лево), „Pendulum CNT-91“ десно.
Слика 5.5.	Основни концепт оптичке емисионе спектроскопије.
Слика 5.6.	Уређај „ISR-C002“ за мерење храпавости површина.
Слика 5.7.	Изглед и димензије стандардне мерне игле (у милиметрима)
Слика 5.8.	„MEIITechno“ оптички микроскопи (металуршки).
Слика 5.9.	Фазни дијаграм флуида.
Слика 5.10.	Приказ имплозије мехура.
Слика 5.11.	Карактеристична крива кавитационог разарања.
Слика 5.12.	Изглед уређаја (лево), шематски приказ уређаја (десно).
Слика 5.13.	Скенирајући електронски микроскоп „SEM“.
Слика 5.14.	Шематски приказ Шарпијевим клатном (лево), приказ улазних вредности Шарпијевим клатном (десно).
Слика 5.15.	Димензије епрувете по стандарду <i>ASTME-23</i> .
Слика 5.16.	Уређај за мерење тврдоће „Wilson DiaMet“.
Слика 5.17.	Поступак испитивања тврдоће по Vickers-у.
Слика 5.18.	Минимална удаљеност коју треба одржавати.
Слика 5.19.	Изглед уређаја „TELEDYNE ICM CP300D“.
Слика 5.20.	Објашњење чеоног панела коришћеног ултразвучног дефектоскопа.
Слика 5.21.	Процес испитивања завареног споја са објашњењем на екрану уређаја.
Слика 5.22.	Процес испитивања течним пенетрантима.
Слика 6.1.	Узорак експлозива Демекс за мерење брзине детонације у <i>PVC</i> цеви.
Слика 6.2.	Узорак експлозива Демекс за мерење брзине детонације у кутији.
Слика 6.3.	Уређај „ISR-C002“ за мерење храпавости површина.
Слика 6.4.	Мерна опрема за мерење топографије површине.
Слика 6.5.	Припремљене плоче за испитивање површинске храпавости.
Слика 6.6.	Профил површине конструкционог челика узорак 1.
Слика 6.7.	Профил површине конструкционог челика узорак 2.
Слика 6.8.	Профил површине конструкционог челика узорак 3.
Слика 6.9.	Профил површине конструкционог челика узорак 4.
Слика 6.10.	Профил површине алатног челика узорак 1.
Слика 6.11.	Профил површине алатног челика узорак 2.
Слика 6.12.	Профил површине алатног челика узорак 3.
Слика 6.13.	Ултразвучни дефектоскоп.
Слика 6.14.	Експлозивно заварене плоче угљеничног челика са алатним челиком (узорци 1-4).
Слика 6.15.	Процес испитивања плоче рендгеном.
Слика 6.16.	Рендгенографски снимци плоча.
Слика 6.17.	План сечења плоча.
Слика 6.18.	Нумерација исечених узорака.
Слика 6.19.	Нумерација и сечење лимова.
Слика 6.20.	Узорци спремни за даљу механичку обраду..
Слика 6.21.	Пенетрантски систем.

Слика 6.22.	а) Пенетрант на површини узорака за испитивање, б) Узорци за испитивање редом узорци 1-9,3-9,4-9,2-13.
Слика 6.23.	а) 1-9 узорак након 2 минута наношења влажног развијача, б) 1-9 узорак након 20 минута наношења влажног развијача.
Слика 6.24.	а) 2-13 узорак након 2 минута наношења влажног развијача, б) 2-13 узорак након 20 минута наношења влажног развијача.
Слика 6.25.	а) 3-9 узорак након 2 минута наношења влажног развијача, б) 3-9 узорак након 20 минута наношења влажног развијача.
Слика 6.26.	а) 4-9 узорак након 2 минута наношења влажног развијача, б) и с) 4-9 узорак након 20 минута наношења влажног развијача.
Слика 6.27.	Металографски узорци (Опружни/Конструкциони челик).
Слика 6.28.	Заварени спој експлозијом, узорак 2-4: а) излед макроструктуре, б) линија стапања – таласаста веза.
Слика 6.29.	а), б) Микроструктура челика <i>51CrV4</i> , узорак 2-4.
Слика 6.30.	а)÷г) Линија стапања – узорак 2-4.
Слика 6.31.	а), б) Линија стапања узорака 2-4, <i>SEM</i> .
Слика 6.32.	а), б) Микроструктура челика <i>S355J2</i> , узорак 2-4.
Слика 6.33.	Заварени спој експлозијом узорак, 3-4: а) излед макроструктуре, б) линија стапања – таласаста веза.
Слика 6.34.	а), б) Микроструктура челика <i>51CrV4</i> , узорак 3-4.
Слика 6.35.	а)÷ђ) Линија стапања – узорак 3-4.
Слика 6.36.	а) Линија стапања, узорак 3-4; б) мешање два челика у линији стапања; в) непровар у линији стапања, <i>SEM</i> .
Слика 6.37.	а)÷г) Микроструктура челика <i>S355J2</i> узорака 3-4.
Слика 6.38.	Заварени спој експлозијом, узорак 4-4: а) излед макроструктуре, б) линија стапања – таласаста веза.
Слика 6.39.	а), б) Микроструктура челика <i>51CrV4</i> , узорак 4-4.
Слика 6.40.	а)÷ђ) Линија стапања – узорак 4-4.
Слика 6.41.	а)÷г) Микроструктура челика <i>S355J2</i> , узорак 4-4.
Слика 6.42.	Заварени спој експлозијом, узорак 5-4: а) излед макроструктуре, б) линија стапања – таласаста веза.
Слика 6.43.	а), б) Микроструктура челика <i>51CrV4</i> , узорак 5-4.
Слика 6.44.	а)÷ђ) Линија стапања – узорак 5-4.
Слика 6.45.	а), б) Микроструктура челика <i>S355J2</i> , узорак 5-4.
Слика 6.46.	Металографски узорци (Алатни/Конструкциони челик).
Слика 6.47.	а) и б) челик <i>X155CrVMo12-1</i> ; в) и г) челик <i>S355J2</i> , узорак 1-10.
Слика 6.48.	а) и б) челик <i>X155CrVMo12-1</i> ; в) и г) челик <i>S355J2</i> , узорак 2-12.
Слика 6.49.	а) и б) челик <i>X155CrVMo12-1</i> ; в) и г) челик <i>S355J2</i> , узорак 3-11.
Слика 6.50.	а) и б) челик <i>X155CrVMo12-1</i> ; в) и г) челик <i>S355J2</i> , узорак 4-11.
Слика 6.51.	а) челик <i>X155CrVMo12-1</i> (горња половина слике); б) челик <i>S355J2</i> (доња половина слике), узорак 1-10. а) и б) ×100 увећање, в) и г) ×200 увећање, д) и ђ) ×500 увећање.
Слика 6.52.	а) челик <i>X155CrVMo12-1</i> (горња половина слике); б) челик <i>S355J2</i> (доња половина слике), узорак 2-12. а) и б) ×100 увећање, в) и г) ×200 увећање, д) и ђ) ×500 увећање.
Слика 6.53.	а) челик <i>X155CrVMo12-1</i> (горња половина слике); б) челик <i>S355J2</i> (доња половина слике), узорак 3-11. а) и б) ×100 увећање, в) и г) ×200 увећање, д) и ђ) ×500 увећање.

Слика 6.54.	а) челик <i>X155CrVMo12-1</i> (горња половина слике); б) челик <i>S355J2</i> (доња половина слике), узорак 4-11. а) и б) $\times 100$ увећање, в) и г) $\times 200$ увећање, д) и ђ) $\times 500$ увећање.
Слика 6.55.	<i>SEM</i> фотографије споја а) челик <i>X155CrVMo12-1</i> (горња половина слике); б) челик <i>S355J2</i> (доња половина слике), узорак 1-10.
Слика 6.56.	<i>SEM</i> фотографије споја а) челик <i>X155CrVMo12-1</i> (горња половина слике); б) челик <i>S355J2</i> (доња половина слике), узорак 2-12.
Слика 6.57.	<i>SEM</i> фотографије споја а) челик <i>X155CrVMo12-1</i> (горња половина слике); б) челик <i>S355J2</i> (доња половина слике), узорак 3-11.
Слика 6.58.	<i>SEM</i> фотографије споја а) челик <i>X155CrVMo12-1</i> (горња половина слике); б) челик <i>S355J2</i> (доња половина слике), узорак 4-11.
Слика 6.59.	Зависност таласне дужине таласа од количине експлозива.
Слика 6.60.	Зависност амплитуде таласа од количине експлозива.
Слика 6.61.	Микроструктура узорака: а) 1-13, б) 2-13, в) 3-13 и г) 4-13.
Слика 6.62.	Разлика у величини таласа.
Слика 6.63.	Шема експерименталне поставке испитивања.
Слика 6.64.	Кавитациона оштећења након 1h дејства.
Слика 6.65.	Узорци са траговима кавитационе ерозије у виду тачкица или јамица након 1h дејства.
Слика 6.66.	Кавитационо оштећење након 2h дејства.
Слика 6.67.	Узорци са траговима кавитационе ерозије у виду тачкица или јамица након 2h дејства.
Слика 6.68.	Кавитационо оштећење након 3h дејства
Слика 6.69.	Узорци са траговима кавитационе ерозије у виду тачкица или јамица након 3h дејства.
Слика 6.70.	Кавитационо оштећење након 4h дејства.
Слика 6.71.	Узорци са траговима кавитационе ерозије у виду тачкица или јамица након 4h дејства.
Слика 6.72.	Зависност губитка масе од времена (крива кавитационог хабања).
Слика 6.73.	Епрувете за испитивање ударне жилавости завареног споја.
Слика 6.74.	Изглед епрувете за испитивање ударне жилавости.
Слика 6.75.	Вредности ударне жилавости епрувета израђених од алатног и конструкционог челика.
Слика 6.76.	Зависност ударне жилавости од дужине контакта плоча (плоча 3 и 4).
Слика 6.77.	Изглед лома епрувета (плоча 1 и 2).
Слика 6.78.	Изглед лома епрувета (плоча 3 и 4).
Слика 6.79.	Дистрибуција тврдоће на месту спајања два челика (HV0.1 плоча 1).
Слика 6.80.	Дистрибуција тврдоће на месту спајања два челика (HV0.1 плоча 2).
Слика 6.81.	Дистрибуција тврдоће на месту спајања два челика (HV0.1 плоча 3).
Слика 6.82.	Дистрибуција тврдоће на месту спајања два челика (HV0.1 плоча 4).
Слика 6.83.	Дистрибуција тврдоће на месту спајања два челика (HV0.1 све плоче).
Слика 6.84.	Места мерења микротврдоће на узорцима: а) 1-13, б) 2-13, в) 3-13 и г) 4-13.
Слика 6.85.	Дистрибуција тврдоће на месту спајања два челика након каљења (HV0.1 плоча 1).
Слика 6.86.	Дистрибуција тврдоће на месту спајања два челика након каљења (HV0.1 плоча 2).

Слика 6.87.	Дистрибуција тврдоће на месту спајања два челика након каљења (HV0.1 плоча 3).
Слика 6.88.	Дистрибуција тврдоће на месту спајања два челика након каљења (HV0.1 плоча 4).
Слика 6.89.	Дистрибуција тврдоће на месту спајања два челика након каљења (HV0.1 све плоче).
Слика 6.90.	Место мерења микротврдоће на узорку 4-13, карбид.
Слика 6.91.	Шема испитивања раним секачем.
Слика 6.92.	Одабир узорака (лево), припрема узорака (десно).
Слика 6.93.	Испитивани узорци, а) лоше заварен спој (опружни челик), б) добро заварен спој (алатни челик).
Слика 6.94.	Узорци након теста (узорак 1-2 и 2-2).
Слика 6.95.	Узорци након теста (узорак 3-2 и 4-2).

## СПИСАК ТАБЕЛА

Ознака	Назив табеле
Табела 2.1.	Остварене комбинације метала спојених експлозивним заваривањем до 1964.
Табела 2.2.	Могући дефекти, узроци и решења при експлозивном заваривању.
Табела 3.1.	Коефицијенти $k_1$ , $k_2$ , $k_3$ за случај надземне експлозије TNT.
Табела 3.2.	Вредности коефицијента $\eta$ у зависности од типа тла.
Табела 3.3.	Параметри Kingery-Bulmash полинома за притисак на челу ударног таласа.
Табела 3.4.	Категорије оштећења стамбених објеката изграђених од цигле.
Табела 3.5.	$K_x$ фактор за различите степене оштећења.
Табела 4.1.	Механичке карактеристике челика 51CrV4, X155CrVMo12-1 и S355J2
Табела 4.2.	Карактеристике експлозива.
Табела 4.3.	Хемијски састав челика 51CrV4, X155CrVMo12-1 и S355J2
Табела 4.4.	Хемијски састав експлозива Амонекс/Демекс.
Табела 4.5.	Граничне вредности неопходне за формирање дијаграма са слике 4.1.
Табела 4.6.	Граничне вредности неопходне за формирање дијаграма са слике 4.2.
Табела 4.7.	Зависност ударне брзине од динамичког угла $\beta$ за Амонекс.
Табела 4.8.	Зависност ударне брзине од динамичког угла $\beta$ за Демекс.
Табела 4.9.	Димензионе карактеристике у функцији динамичког угла $\beta$ за Амонекс.
Табела 4.10.	Димензионе карактеристике у функцији динамичког угла $\beta$ за Демекс.
Табела 4.11.	Маса експлозивног пуњења и еквивалентна маса Демекс експлозива.
Табела 4.12.	Параметри Kingery-Bulmash полинома за притисак на челу ударног таласа.
Табела 4.13.	Табеларни приказ критичног растојања.
Табела 4.14.	Насипна густина Демекс и Амонекс експлозива.
Табела 4.15.	Маса експлозива Амонекс.
Табела 4.16.	Маса експлозива Демекса.
Табела 5.1.	Параметри топографије површине мерени помоћу уређаја „ISR-C002“.
Табела 5.2.	Основне карактеристике уређаја „HD4100“.

Табела 5.3.	Величине испитне силе према ISO стандарду по Vickers-у.
Табела 5.4.	Техничке карактеристике „TELEDYNEICMCP300D“.
Табела 5.5.	Технике испитивање без разарања.
Табела 5.6.	Технике испитивање са разарањем.
Табела 6.1.	Резултати мерења брзине детонације.
Табела 6.2.	Хемијски састав челика <i>51CrV4</i> , <i>X155CrVMo12-1</i> ( <i>X160CrMoV121</i> )и <i>S355J2</i> .
Табела 6.3.	Резултати мерења површинске храпавости.
Табела 6.4.	Параметри испитивања.
Табела 6.5.	Вредности тврдоће добијене Rockwell-овом методом.
Табела 6.6.	Вредности амплитуде и таласне дужине узорака.
Табела 6.7.	Измерене вредности ширине и висине таласа на линији стапања заварених спојева.
Табела 6.8.	Губитак масе након дејства кавитације.
Табела 6.9.	Стварне димензије попречног пресека епрувете на месту лома.
Табела 6.10.	Резултати испитивања ударне жилавости алатног и конструкционог челика.
Табела 6.11.	Услови за испитивање микротврдоће.
Табела 6.12.	Вредности микротврдоће завареног споја.
Табела 6.13.	Вредности микротврдоће завареног споја након каљења.

## СПИСАК СКРЋЕНИЦА

Скраћеница	Значење
$\alpha$	Статички угао удара.
$\beta$	Динамички угао удара.
$V_d$	Брзина детонационог таласа.
$V_p$	Ударна брзина покретне плоче.
$V_f$	Брзина покретне плоче.
$V_c$	Брзина тачке судара.
$P$	Притисак остварен у материјалу.
$P_A$	Притисак остварен у материјалу А.
$P_B$	Притисак остварен у материјалу Б.
$P_{min}$	Минималан притисак остварен у материјалу.
$\rho$	Почетна густина материјала.
$u$	Корак којим се површина деформише.
$U$	Брзина детонационог таласа кроз метал.
$\sigma$	Квази статички напон јаче компоненте.
$V_{p(min)}$	Минимална ударна брзина покретне плоче.
$E_A$	Јунгов модул еластичности материјала А.
$Re$	Рејнолдсов број.
$H_F$	Тврдоћа по Vickers-овој скали, (стационарна плоча).
$H_A$	Тврдоћа по Vickers-овој скали, (покретна плоча).
$\rho_F$	Почетна густина материјала (стационарна плоча).
$\rho_A$	Почетна густина материјала (покретна плоча).
$N$	Бездимензионална константа.



$T_m$	Тачка топљења, (покретна плоча).
$K$	Топлотна проводљивост.
$C_h$	Специфична топлота.
$t$	Дебљина покретне плоче.
$k_l$	Бездимензиона вредност у границама од 0.6 до 1.2 у зависности од површинске храпавости плоча.
$H_v$	Тврдоћа по Vickers-овој скали.
$e$	Количина експлозива.
$m$	Маса експлозива.
$k$	Бездимензионална константа.
$S$	Потребно међусобно растојање плоча.
$k$	$\cong 0,4$ и $\cong 0,7$ за брзине удара од 70% $V_p$ и 100% $V_p$ респективно.
$x_e$	Дебљина експлозива.
$C$	Маса експлозива.
$M$	Маса покретне плоче.
$x_f$	Дебљина покретне плоче.
$\theta$	Угао закретања покретне плоче.
$M_{TNTe}$	Еквивалентна маса тротила (TNT) у g.
$E_{deksp}$	Енергија детонације експлозива у kJ/kg.
$E_{dTNT}$	Енергија детонације тротила која износи 4184 kJ/kg.
$M_{eksp}$	Маса експлозива у g.
$\Delta p$	Натпритисак на фронту ударног таласа у барима (1 bar = $10^5$ Pa).
$m_e$	Маса експлозивног пуњења у kg.
$r$	Удаљеност од центра експлозије у m.
$k_1, k_2, k_3$	Емпиријски коефицијенти који зависе од врсте експлозивног пуњења.
$m_p$	Прорачунска маса експлозива.
$\eta$	Коефицијент.
$T$	Логаритам растојања са основом десет, m
$K_0, K_1$	Параметри Kingery-Vulmash полинома за притисак на челу ударног таласа.
$C_1 - C_9$	Параметри Kingery-Vulmash полинома за притисак на челу ударног таласа.
$R$	Растојање (m).
$d$	Пречник ватрене лопте, m.
$t$	Трајање ватрене лопте, s.
$Q$	Маса сагоревања, kg.
$R_x$	Опсег за ниво оштећења „x“, m.
$K_x$	Константа за ниво оштећења „x“.
$M_e$	Маса експлозива, kg.
$t$	Време.
$l$	Мерна база дужине.
$\lambda$	Таласна дужина формираног таласастог споја
$A$	Амплитуда формираног таласастог споја

# 1. УВОД

Континуално развијање нових производа, уређаја, индустријских машина и њихово усавршавање, повећањем квалитета, издржљивости, смањењем величине уз задржавање функционалности је последица континуираног развоја нових материјала добијених новим технолошким процесима.

Обрада нових материјала класичним поступцима је најчешће спора, неисплатива и све тежа. Увођењем нових технолошких процеса и њихово усавршавање обезбеђују већу продуктивност и економичност израде материјала. Једна од техника новијег датума је и добијање вишеслојних материјала експлозивним заваривањем.

Индустријска примена експлозивног заваривања у свету је почела средином двадесетог века, за разлику од других облика заваривања, као што је електролучно заваривање које је развијено крајем деветнаестог века појавом индустријске електричне енергије. Веома брзо се проширила на остале поступке обраде метала пластичним деформисањем. У данашње време број операција у којима се користи енергија добијена експлозијом је све већи (Рејџиновић, 2000).

Многобројним испитивањима на пољу нових технологија са импулсним оптерећењима показано је да се енергија експлозије може са успехом користити у поступцима као што су (Рејџиновић, 2000):

- Спајања метала,
- Отврдњавање површинског слоја метала, и
- Обрада материјала деформисањем.

## 1.1. Циљ истраживања

Предмет ове докторске дисертације представља истраживање у области примене неконвенционалног извора енергије - експлозије, за развој нових материјала и технолошких процеса. Поступак примене експлозивног заваривања за добијање вишеслојних (биметалних и плакираних) металних материјала постаје важан тренд научног и технолошког прогреса.

Вишеслојни метални материјали су настали са циљем испуњења захтева за специфичним карактеристикама материјала, уз њихову ниску цену. Вишеслојни алатни челици све више налазе примену као биметални челици за израду различитих сечива, односно ножева, посебно у графичкој индустрији, индустрији прераде дувана и преради неметала. Поред израде вишеслојних метала експлозивно заваривање се користи за израду плакираних материјала при чему је плакирање поступак заштите основног материјала слојем материјала првенствено отпорног на корозију или хабање. Дебљина плакираног слоја је најчешће око 10% укупне дебљине новонасталог материјала (плоче, лима, цеви) (TSSM, 2023). Плакирани материјали се користе у хемијској индустрији за израду цистерни, прехрамбеној индустрији за израду посуда, ножева, а такође и у војној индустрији за балистичку заштиту. О примени експлозивног заваривања за израду вишеслојних металних материјала има релативно мало података и они се углавном односе на плакирање нисколегираних челика алуминијумом за примену у бродоградњи

и плакирање нисколегираних челика нерђајућим челицима за примену у хемијској индустрији. У новије време све више се примена ове технологије користи и у аутомобилској индустрији за добијање материјала и делова каросерије аутомобила специфичних карактеристика које се другим поступцима не могу или веома тешко могу остварити. О експлозивном заваривању челика високе чврстоће као што су алатни челици са нисколегираним челицима у доступној литератури нема значајне количине података.

Истраживања у области заваривања експлозијом су веома ограничена на специјализоване институције, јер захтевају специфичну опрему, посебно обучен кадар и одговарајуће мере пиротехничке безбедности. Резултати истраживања углавном нису доступни, мада ова метода обраде метала постаје веома перспективна и све више заступљена. Оправдано се може закључити да је веома мала количина доступних података последица заштите таквих података као технолошке тајне.

У оквиру ове дисертације посебно се разматра примена експлозивног заваривања за добијање биметалног челика са комбинацијом високолегираних алатног челика и нискоугљеничног челика. Оваква комбинација челика најпре налази намену за израду различитих ножева (сечива) за графичку индустрију, индустрију прераде дувана и сл. Прелиминарна истраживања су реализована експлозивним заваривањем легираног опружног и нискоугљеничног челика.

Поступак примене енергије експлозије за израду вишеслојних металних материјала представља део сложеног техничког система. У случају неадекватног руковања експлозивом може доћи до велике опасности по радно окружење и околину, појаве инцидента или чак акцидента. Овај поступак се сматра високо ризичним поступком где је у највећој мери присутан утицај људског фактора. Поступак обухвата ручно или механичко постављање свих елемената система у потребни положај за детонацију и саму детонацију експлозива, што као такав са собом носи висок ниво ризика и ниску продуктивност. Због наведеног у дисертацији је посебно поглавље посвећено пиротехничкој безбедности.

Циљ истраживања докторске дисертације је био изучавање процеса примене неконвенционалног поступка експлозивног заваривања високолегираног алатног челика и нискоугљеничног конструктивног челика и дефинисање метода за утврђивање квалитета добијеног споја. Методе испитивања треба да обезбеде даље истраживање и развој у области овладавања технологијом за производњу нових експлозивно заварених металних материјала. Применом технологије заваривања експлозијом знатно се проширује број и врста технологија и материјала које све више налазе примену. Развој нових материјала, посебно у области алатних материјала треба да омогући добијање висококвалитетних материјала са нижом ценом. Циљ истраживања је био стварање услова за добијање и других вишеслојних материјала технологијом експлозивног заваривања: нерђајући челик - конструкциони нискоугљенични челик, алуминијум - челик, специјални сендвич материјали за балистичку заштиту и др.

У оквиру докторске дисертације реализована су експериментална истраживања применом савремене мерне опреме. Коришћени су оптички микроскоп, скенирајући електронски микроскоп и уређај за оптичку емисиону спектрометрију за одређивање металуршких и хемијских својстава. Применом ултразвучне дефектоскопије, пенетрантског испитивања и рендгенографије извршена су испитивања споја заварених плоча. Одређивање механичких својстава је обухватало испитивање ударне жилавости и кавитационе отпорности споја. За сва ова испитивања су били

припремљени, односно исечени узорци из плоча абразивним воденим млазом, према одговарајућем плану сечења.

Остваривањем циљева дисертације и развојем метода за одређивање својстава експлозивно заварених материјала дефинисан је утицај количине експлозива на карактеристике завареног споја. На тај начин створени су услови, односно полазни параметри за формирање нумеричког модела и симулацију експлозивног заваривања што може значајно смањити материјалне трошкове, време и бројна испитивања. Такође, тиме би се олакшала даља истраживања и омогућио даљи развој технологије експлозивног заваривања и плакираних материјала.

## **1.2. Основне хипотезе од којих се полази**

Полазне хипотезе у раду на докторској дисертацији су биле:

- Експлозивним заваривањем је могуће добити вишеслојни (биметални) алатни материјал бољих механичких карактеристика од основних материјала,
- Експлозивним заваривањем је могуће остварити континуиран заварени спој,
- Експерименталним и теоријским истраживањима је могуће утврдити врсту и потребну количину експлозива и друге параметре експлозивног заваривања за остваривање квалитетног завареног споја,
- Теоријска разматрања експлозивног заваривања могу се потврдити експерименталним испитивањима,
- Експлоатационе карактеристике алата од биметалног алатног челика су боље од алата израђеног само од алатног челика.

## **1.3. Примењене методе у истраживању експлозивног заваривања**

У оквиру ове докторске дисертације примењене су следеће научне методе:

- Аналитичке методе за анализу и обраду добијених резултата експеримената, и
- Експерименталне методе истраживања уз коришћење расположиве мерне опреме.

Аналитичким методама вршени су потребни прорачуни експлозивног заваривања. Добијене вредности су коришћене при извођењу експеримента експлозивног заваривања.

Експерименталне методе су обухватале примену савремене мерне опреме за одређивање хемијског састава, микротврдоће, ударне жилавости, ерозије споја, као и металуршка испитивања. Добијени резултати треба да послуже за оцену квалитета добијених двослојних материјала од челика.

## 1.4. Потенцијална примена

Потенцијална примена експлозивног заваривања алатних и конструктивних челика се може наћи у изради индустријских ножева у индустрији прераде папира, дувана и других неметалних материјала. За добијање квалитетног реза ножеви се израђују од погодног материјала за своју намену у индустрији. Најчешће су то челици легирани хромом, волфрамом, ванадијумом и молибденом (познати под називом *ОСР* челици). Након термичке обраде делови имају велику тврдоћу и кртост. Поступком експлозивног заваривања могуће је израдити ножеве чија је оштрица од алатног челика отпорног на хабање и велике тврдоће, док му конструкциони челик даје неопходну жилавост и спречава пуцање ножа. Друга предност је нижа цена и уштеда материјала. Код овако израђеног ножа само је оштрица од алатног челика, при чему је до 75% ножа израђено од конструкционог челика. Оштрење самог ножа, односно хабање брусне плоче је смањено због присуства конструкционог челика мање тврдоће. Спречена је могућност прогоревања оштрице у току каљења јер се топлота одводи на страну конструкционог челика (Рејџиновић, 2000). Индустријски ножеви се користе за сечење коже, текстила, дувана, пластике, гуме, папира, разних врста пена, воћа и поврћа.

Материјали од којих се израђују ножеви могу бити угљенични челик, нерђајући челик, итд.

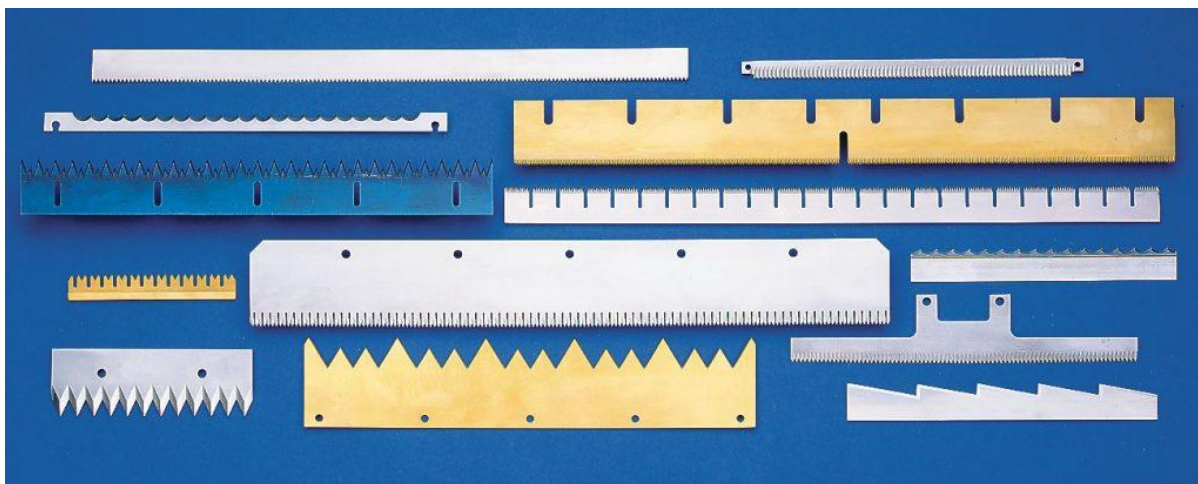
Према намени ножеви се могу поделити на (YS&K, 2023):

- Кружне ножеве (*Circular Knives*),
- Ножеве за одсецање (*Cutoff Blades*) и
- Праве ножеве (*Straight Knives*).



Слика 1.1. Разне врсте кружних ножева (YS&K, 2023).

Кружни ножеви (слика 1.1) и прави ножеви (слике 1.2 и 1.3) су различитих облика и димензија у зависности од машина и сечених материјала које се користе у различитим индустријама. Материјали сечива, дужина ивица и профили, површинска обрада и превлаке су прилагођене за сечење одговарајућих материјала, као што су: папир, картон, месо, фолије различитог порекла (полимерне и металне), храна, полимери, пекарски производи, производи од дрвета, машине за намотавање и др.



Слика 1.2. Разне врсте назубљених ножева за одсецање (YS&K, 2023).

Поред горе наведених материјала, назубљени ножеви (слика 1.2) могу се користити и за сечење при преради меса/хране, сечење пекарских и посластичарских производа, сечење туба фолија, резивање дрвећа и др.



Слика 1.3. Разне врсте масивних равних ножева (YS&K, 2023).

Резна ивица сваког равног ножа (слика 1.3) може се прилагодити како би се обезбедио најчистији и најефикаснији могући рез. Поред наведених материјала могу се користити и за сечење фолија/цеви, производа од дрвета, винила и др.

## 1.5. Структура дисертације

Садржај дисертације је проистекао из жеље и мотивације за истраживањем описаним у уводним разматрањима. Описан је предмет и циљ дисертације, као и полазне хипотезе. Експлозивно заваривање представља поступак у којем се за стварање завареног споја користи хемијска енергија експлозива. Део унутрашње енергије експлозива се претвара у кинетичку енергију гасовитих продуката детонације, који се користе за покретање металних делова и формирање завареног споја. Побољшани материјали добијени на овакав начин имају све већу примену у индустрији. Објашњене су предности овог процеса заваривања:

- Нема ограничења по питању комбинације метала који се заварује,
- Због физике процеса, експлозив је истовремено извор енергије и алат и
- Не постоји ограничење по питању величине површине које се заварују.

У другом поглављу дати су теоријски аспекти експлозивног заваривања. Неконвенционални поступак експлозивног заваривања првенствено се бави спајањем конструкционих материјала, као што су угљенични челик, са скупим материјалима високо отпорним на корозију, као што је нерђајући челик или алуминијум. Цена добијених материјала овим поступком је ближа цени конструкционог челика. Овако добијени материјал поседује високу корозиону отпорност површинског слоја, док основна структура има особине конструкционог челика. Друга примена експлозивног заваривања је израда биметалних резних алата и биметалних индустријских алата за сечење, чиме је односу на класичне алате омогућена уштеда скупих алатних челика, а добијени алати имају побољшана својства (повећану жилавост уз задржавање тврдоће резног дела алата). Ова технологија се може користити и за добијање тврдох оклопних плоча за балистичку заштиту при којем површине попримају особине тврдох челика док унутрашњи део задржава особине конструкционог челика. У овом поглављу је дат приказ литературних података везаних за теоријска разматрања и експериментална истраживања.

Треће поглавље описује безбедносне аспекте извођења неконвенционалног поступка експлозивног заваривања. Приликом извођења поступка експлозивног заваривања мора се строго водити рачуна о безбедности. Познавање правилника при раду са експлозивним средствима као једним од ризичних процеса је неопходно (Правилник, 2005). Процедуре за пиротехничку безбедност, процену ризика и опасности при извођењу експлозивног заваривања у нашој земљи нису дефинисане. Познавање и примена мера безбедности, односно целокупног система пиротехничке безбедности, одређивање штићених система, идентификација хазарда, опасности, управљање ризиком и његова процена, су основни услов за било какав озбиљнији рад са експлозивним средствима (Кековић, 2011). Због тога је у овом поглављу посебна пажња дата неопходним активностима специфичним за експлозивно заваривање и обезбеђење пиротехничке безбедности.

У наредном, четвртном поглављу описани су реализовани прорачуни и припреме за експерименте. Припреме за експериментална истраживања су обухватала прорачун параметара заваривања, обезбеђење полазних материјала, експлозива, електродетонаторских каписли, плоча, кутијастих елемената и др. Извршено је сечење узорака на потребне димензије и уклањање оксидног слоја, формирани су кутијасте елементи са местом за електродетонаторску капислу, ЕДК-8. Обезбеђени су алати и прибор за теренске услове и обезбеђени су адекватни полигони за извођење експеримента. За реализацију експеримента обезбеђена су стручна лица - пиротехничари.

У петом поглављу описане су методе испитивања и мерна опрема. Описан је начин припреме узорака за различите тестове: ултразвучна дефектоскопија, рендгенографска испитивања, металуршка испитивања, испитивање завареног споја течним пенетрантима, кавитациона испитивања, испитивање механичких својстава и др. За сва испитивања је коришћена савремена мерна опрема. Резултати испитивања су систематизовани и презентовани у одговарајућим табелама и дијаграмима.

Шесто поглавље садржи анализу добијених резултата истраживања. Анализа резултата експерименталних испитивања је омогућила дефинисање модела за процену квалитета

споја добијеног експлозивним заваривањем. Успостављањем међусобних зависности између услова и резултата експеримената омогућен је избор адекватних параметра за добијање завареног споја и оцену квалитета оствареног споја. Резултати експерименталних испитивања су створили услов за формирање нумеричког модела за симулацију експлозивног заваривања.

На основу доступне литературе, изведених експеримената, урађених испитивања, резултата мерења узорака и њихове анализе у седмом поглављу дат је закључак и правци будућих истраживања. Указано је на методе најпогодније за оцену квалитета заварених плоча. Наведен је допринос докторске дисертације, као и правци даљих експерименталних истраживања.

У последњем поглављу приказана је коришћена литература при изради дисертације.



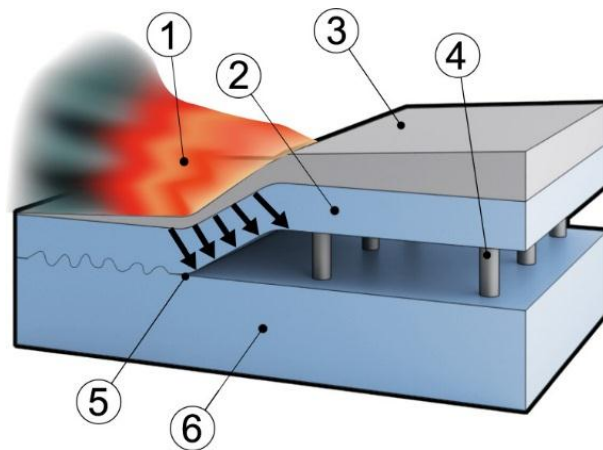
## 2. ТЕОРИЈСКИ АСПЕКТ ЕКСПЛОЗИВНОГ ЗАВАРИВАЊА

Експлозивно заваривање представља поступак у којем се за стварање завареног споја користи хемијска енергија експлозива. Део унутрашње енергије експлозива се претвара у кинетичку енергију гасовитих продуката детонације, који се користе за покретање металних делова и формирање завареног споја. Овај технолошки поступак се користи за спајање два разнородна материјала који се иначе не могу спојити класичним поступцима заваривања или је њихово спајање знатно отежано (Blazynski, 1983). Предност овог поступка је у томе што се са јефтиним материјалима, нпр. алуминијум и челик (Carvalho, 2018), (Kovacs, 2015), (Carvalho, 2020) могу формирати заварени спојеви материјала који имају одличне механичко-хемијске карактеристике, а при том нису скупи. Такође овим поступком је могуће добити вишеслојне материјале великих површина (Lazynski, 1983). Ова технологија налази примену у бродоградњи (Corigliano 2018), индустрији за израду криогених, електричних и конструкционих прелазних спојева, израду посуда и цилиндара (Nobelclad, 2023), (High Energy Metals, Inc, 2023), (Hermetic solutions group, 2023). Због коришћења привредног експлозива, поступак експлозивног заваривања прате одређене опасности. Имајући ово на уму мора се водити рачуна о свим безбедносним аспектима примене овог поступка, нарочито при руковању са експлозивима.

Спајање метала експлозијом остварује се услед веома брзог судара метала под дејством продуката детонације, уз појаву високог притиска и пластичних деформација у таласној форми на граници споја и адијабатског локалног загревања површинских слојева метала (Pejčinović, 2000), (Ghomi, 2009), (Bataev, 2019).

Процес спајања састоји се у томе да се плоче које се заварују поставе паралелно или под одређеним углом на одговарајућем међусобном растојању. На плочу која се потискује поставља се експлозивно пуњење одређене дебљине. Иницирање се најчешће врши у тачки на једној од бочних страна експлозивног пуњења. Након иницирања процеса детонације у експлозивном пуњењу, у продуктима детонације се ствара врло висок притисак. Продукти детонације потискују горњу плочу (слика 2.1), која се великом брзином судара са доњом плочом. Судар се изводи постепено, при чему се потискивана плоча закреће и прелази у квази течност. Истовремено се појављује тангенцијална компонента брзине судара у правцу простирања таласа детонације која за време пластичне деформације зону споја метала чини таласастом (Pejčinović, 2000), (Blazynski, 1983).

Експлозивно заваривање није увек најекономичнија техника. Свакако у случају једноставног заваривања, лемљења и закивања структура на лицу места, експлозивно заваривање ретко ће се такмичити као економична или чак практична алтернатива. Без обзира на то, процес је сада постао добар за бројне примене, укључујући производњу плакираних плоча за измењиваче топлоте, посуде под притиском, прирубнице и друге спојеве између различитих метала (Lazynski, 1983).



Слика 2.1. Шематски приказ експлозивног заваривања: 1-продукти детонације, 2-облога за основни материјал, 3-експлозив, 4-дистанцери, 5-тачка спајања, 6-основни материјал (Manufacturing Guide, 2020).

Плоче добијене заваривањем експлозијом се користе за посуде, хемијска постројења и цеви за измењиваче топлоте већ деценијама. Пре тога плакиране плоче су се производиле првенствено фузионим плакирањем (Scallan, 2003) завареног споја или топлим спајањем (Gale, 2004). Ови високотемпературни процеси ограничавају распон величине и комбинације материјала који се могу производити, а у неким случајевима, квалитет и конзистентност производа (Lazynski, 1983). Појава експлозивног плакирања значајно је повећала опсег и квалитет доступних плоча. Иако нерђајући челик остаје најчешће коришћен материјал за облоге, више ретких материјала као што су титанијум (Lazynski, 1983), (Yang, 2019), магнезијум (Habib, 2013) проналазе све већу примену. Нема горње границе у површини плоче која се може обложити у једном поступку (Lazynski, 1983). Успешно су коришћене плоча од нерђајућег челика површине до 15 m<sup>2</sup> и највеће дебљине 25 mm (Lazynski, 1983). У табели 2.1 дати су подаци о оствареним плакираним материјалима.

Према доступној литератури (Lazynski, 1983), (Radić, 2000), фактори који одређују могућност заваривања, укључују жилавост, тачку топљења, густину и дебљину плоча.

Материјали са ниском тачком топљења, под притиском се топе, тако да је тешко избећи топљење приликом удара на месту спајања. Заваривање постаје теже са већом разликом густина материјала. Ако је притисак много већи од напона који материјал може да издржи, материјали се понашају као флуиди чије је кретање (формирање таласа) и избацивање материјала са површине кумулативним млазом, у складу са законима хидродинамике (Јеремић, 2002). У присуству довољног притиска, та кретања зависе од густине али не и од напона материјала. Када компоненте имају сличне густине, завар има симетричан таласаст облик, сличан синусоиди. Ако се разлика у густини компоненти повећа, губитак симетрије постаје све израженији, мада површина споја може имати понављајуће облике сличне Von Karman-овим вртлозима или облике проузроковане Kelvin-Helmholtz-овом нестабилношћу (Carton, 2004), (Reid, 1974). Ако је површина равна, кумулативни млаз, због разлике у густини плоча, тежи да се окрене ка гушћој компоненти, задржавајући тако материјал унутар споја. Овај облик је мање пожељан од лепо формираног таласастог споја, који пенетрира у правцу нормално на површину.

Табела 2.1. Остварене комбинације метала спојених експлозивним заваривањем до 1964. (Blazynski, 1983).

Метали	37	36	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1		
1 Нискоугљенични челик, AISi 1004 до 1020	x					x	x			x		x					x	x	x	x	x					x	x	x									x		
2 Средњеугљенични челик, Astm A-285						x	x			x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				x	x	x									x		
3 Средњеугљенични челик, Astm A-201						x	x	x		x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				x	x										x		
4 Средњеугљенични челик, Astm A-212						x	x	x		x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				x	x										x		
5 Нисколегирани челик, Astm A-204													x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				x	x										x		
6 Нисколегирани челик, Astm A-302													x	x		x	x	x	x	x	x	x				x	x										x		
7 Нисколегирани челик, Astm A-387													x	x		x	x					x				x	x	x									x		
8 Легуре челика, ArSi 4130																											x										x		
9 Легуре челика, ArSi 4340																											x	x											
10 Нерђајући челик, ферит																	x																				x		
11 Нерђајући челик, 300 серија				x			x	x					x				x	x				x	x	x	x			x											
12 Нерђајући челик, 200 серија																						x	x				x												
13 Handfield-овчелик																							x																
14 Maraging-овчелик																																							
15 Алуминијум и Алуминијумове легуре																	x						x	x															
16 Бакар							x					x																											
17 Месинг																		x				x																	
18 Бакар-Никл																																							
19 Бронза																																							
20 Никл и Никл легуре									x	x								x	x																				
21 Титанијум и Титанијумове легуре GAI-4V					x			x																															
22 Цирконијум и Цирконијум легуре																																							
23 Mastelloy легуре b,c,f (c)																																							
24 Mastelloy легуре x (c)				x																																			
25 Haunes stellite легуре 6b (c)																																							
26 Тантал																																							
27 Легуре злата																																							
28 Сребро и легуре сребра																																							
29 Платина																																							
30 Ниобиуми легуре Ниобиума		x						x	x																														
31 Молибден						x		x																															
32 Магнезијум								x																															
33 Ниобиум								x																															
34 Волфрам																																							
35 TD Никл																																							
36 Легуре Паладијума																																							
37 Цинк	x																																						

**Напомене**

Празна места комбинације метала није покушана.  
То не значи да ти метали не могу бити заварени експлозијом.

Завариване су плоче, мањих дебљина, дебљине 0,1 mm (Chen, 2017) до 30 mm (Mahi, 2016). Потешкоће заваривања фолија се јављају због њене дебљине. Дебљина може бити упоредива са амплитудом таласа и може доћи до цепања фолије.

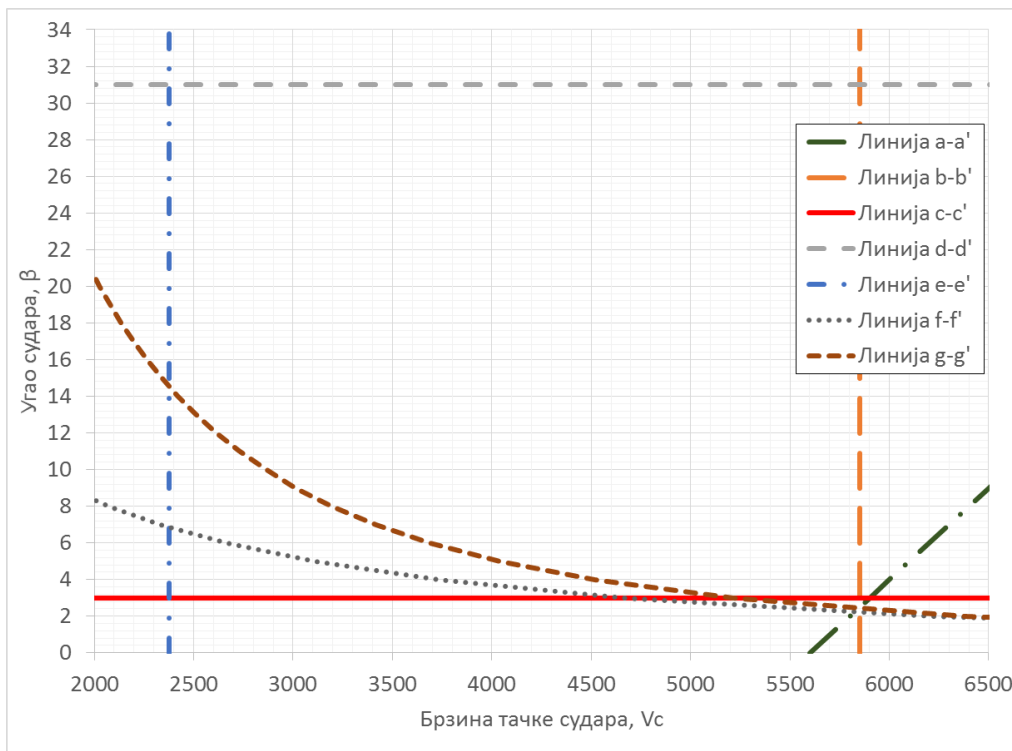
Заварене плоче се могу сећи и обликовати коришћењем конвенционалних поступака обраде. Поред претходно наведених примена у бродоградњи (Corigliano 2018), индустрији за израду криогених, електричних и конструкционих прелазних спојева, за посуде и цилиндри (Nobelclad, 2023), (High Energy Metals, Inc, 2023), (Hermetic solutions group, 2023), експлозивно заваривање се такође може користити за репарацију похабаних осовина и турбинских кола (Linse, 1974) или цилиндара.

## 2.1. Параметри заваривања

Експлозивно заваривање различитих материјала могуће је под одређеним условима, на које пре свега утичу особине материјала за спајање, као и сами параметри процеса. Подручје заваривања тзв. *welding window* (Crossland, 1982), (Deribas, 1974) ограничено је правим и кривим линијама као што је приказано на слици 2.2. Да би се подручје заваривања дефинисало, мора се успоставити однос између почетних услова – углава  $\alpha$ ,  $\beta$  и карактеристика експлозива.

Велики број геометријских и физичких параметара ограничава подручје заваривања ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $V_d$ ,  $V_p$ ,  $V_f$ ,  $V_c$ ) као и својства материјала (Ghomi, 2009), (Blazynski, 1983).

У наредном делу текста детаљно су описани наведени параметри.



Слика 2.2. Подручје заваривања (*Welding window*)

### 2.1.1. Уопштене претпоставке

У заваривању експлозивом два примарна параметра морају бити испуњена: (Blazynski, 1983), (Radić, 2000):

- Брзина судара удара  $V_c$  мора да генерише притисак, који је најмање десет пута већи од напона течења метала са већим вредностима карактеристика чврстоће.
- Угао удара  $\beta$  мора да пређе минималну вредност, са доступним притиском удара, дозвољавајући истицање површинског слоја из оба материјала.

Брзина удара и угао заједно, одређују брзину тачке контакта. Код паралелне поставке брзина тачке контакта једнака је брзини детонације експлозива.

Из доступне литературе (Blazynski, 1983), (Vaidyanathan, 1992) је познато да брзина тачке судара  $V_c$  мора остати подзвучна, док остали критеријуми оптималног притиска морају бити задовољени истовремено. Да би се испунила оба критеријума, мора се створити услов за формирање минималног угла удара  $\beta$  (Sherpa, 2021), (Jindrich, 2016). Формирање млаза ће бити успешно ако су испуњени услови на левој страни линије a-a'. Abrahamson (Abrahamson, 1961) предлаже следећи однос између  $\beta$  и  $V_c$ , једначина 2.1:

$$V_c = 10^3 \left( \frac{\beta}{10} + 5,5 \right) \quad (2.1)$$

У сваком случају брзина тачке контакта  $V_c$  мора бити мања од брзине звука у покретној плочи, увећане за 1,2 до 1,5 пута, линија b-b' (Ghomi, 2009).

На основу задатих услова, експлозивно заваривање два метала зависи од (Blazynski, 1983):

- Брзине детонације и динамичког угла  $\beta$  (које зависе од брзине детонације, дебљине, густине пуњења експлозива, дебљине покретне плоче, међусобног растојања између плоча и статичког угла) и
- Површинске обраде/храпавости материјала због утицаја на дејство избацавања нечистоћа површинског слоја (метал, оксиди и друге нечистоће) које се налазе између две плоче, кумулативним млазом.

Параметри при заваривању експлозивом су међусобно повезани. Ако површине нису довољно добро обрађене, брзина удара мора да буде већа од прорачунате. Већа брзина ће бити остварена повећањем размака између плоча. Такође, дебљина покретне плоче може да утиче на брзину удара. Већу брзину детонације могуће је остварити повећавањем дебљине слоја експлозива.

Избацавање нечистоћа између плоча ће трајати дуже ако су плоче дебље. Под претпоставком да се минимална дебљина материјала, стационарне плоче и покретне плоче уклања млазом, мора се обезбедити минимална дебљина самих плоча да би се омогућило заваривање. Ова минимална дебљина која се избацује млазом зависи од стања површине. Ако се ова дебљина једноставно постигне са дебљом покретном плочом, неће се постићи са тањом покретном плочом.

### 2.1.2. Брзина удара

Притисак  $P$  остварен у сваком материјалу је (Rice, 1958):

$$P = \rho \cdot u \cdot U \quad (2.2)$$

где су:

$\rho$  - почетна густина материјала,

$u$  - корак којим се површина деформише и

$U$  - брзина детонационог таласа кроз метал, приближно једнака брзини звука.

Ради очувања убрзања које се јавља, два различита метала  $A$  и  $B$  која се сударају при брзини  $V_p$  притисак судара је (Blazynski, 1983):

$$P = P_A = P_B = \frac{\rho_A V_p U_A}{1 + \rho_A U_A / \rho_B U_B} \quad (2.3)$$

За сличне метале ( $P_A = P_B = P$ ,  $U_A = U_B = U$ ) скраћено је:

$$P = \frac{1}{2} \rho V_p U \quad (2.4)$$

Емпиријском претпоставком  $P_{min} \cong 10\sigma$  (Radić, 2000), (Wright, 1967), где је  $\sigma$  квазистатички напон јаче компоненте, минимална брзина удара, која генерише овај притисак, може да се израчуна на два начина (Blazynski, 1983):

(1) различити метали (где је  $A$  јача компонента)

$$V_{p(min)} \cong 10\sigma_A \left[ \frac{1 + \rho_A U_A / \rho_B U_B}{\rho_A U_A} \right] \quad (2.5)$$

(2) слични метали

$$V_{p(min)} \cong \frac{20\sigma_A}{\rho_A U_A} \cong \frac{20\sigma_A}{\sqrt{\rho_A E_A}} \left( \text{since } U_A \cong \sqrt{\frac{E_A}{\rho_A}} \right) \quad (2.6)$$

где је:

$E_A$  - Young-ов модул еластичности материјала  $A$ .

Вредност  $V_{p(min)}$  је одређена напоном  $A$  и у мањој мери вредношћу модула еластичности.

Израчунате вредности заваривања експлозивом зависе од (Blazynski, 1983):

- Површине судара покретне и непокретне плоче које треба да буду глатке, чисте и одмашћене,

- Дебљине покретне плоче и растојања између плоча довољно да омогући трајање притиска одређено време и
- Начина фиксирања који ће онемогућити померање стационарне плоче и осигурати добар завар.

Иако је пожељно да се експлозивно пуњење смањи ради смањења трошкова, смањења ризика од експлозије и нивоа буке, неопходно је повећање пуњења од минималне вредности која одговара дебљини покретне плоче, нарочито у пословима комерцијалног плакирања, како би се гарантовао континуитет заваривања због евентуалне варијације у завршној површинској обради, и начину остваривања међусобног растојања (Blazynski, 1983).

### 2.1.3. Угао удара и брзинатачке контакта

Доњу и горњу границу динамичког угла  $\beta$  су, између осталих, експериментално одредили *Bahrani* и *Crossland* (Bahrani, 1964). Предложена је доња граница од  $2^\circ$ - $3^\circ$  и горња граница од  $31^\circ$  (линија c-c' линија d-d'), а објављени подаци се генерално слажу са овим вредностима. Горње и доње вредности почетног угла у нагнутој геометрији имају вредност од  $3^\circ$  до  $18^\circ$  (линија c-c' линија d-d') (Bahrani, 1964) респективно, док се границе стварног динамичког угла могу мерити брзом радиографијом или оптичким сондама (Kucera, 2016).

Брзина тачке удара мора бити мања од брзине звука у металу. За оптималне услове заваривања, међутим, брзина тачке удара мора бити одржавана знатно испод брзине звука и унутар опсега, који одговара материјалима и брзини покретне плоче, која се користи. Такође се чини, да неки минимални динамички угао удара мора бити остварен, како би се произвело заваривање. Амплитуда таласа постаје већа са повећањем динамичког угла до одређене вредности док се даљим повећањем угла амплитуда смањује (Vaidyanathan, 1992). У овом случају динамички угао према прорачуну износи  $8^\circ$  за челик/челик. Динамички угао ће произвести додатну силу на ток млаза док се креће испред тачке судара (Blazynski, 1983).

Брзина тачке судара такође утиче на понашање млаза и коначни облик површине споја. Ако брзина тачке судара пада испод одређене вредности која је зависна од материјала, површина завара постаје равна. Заварена површина може садржати континуирани истопљени слој, који ће ретко дати задовољавајући спој, јер ће садржати већи удео оксида, који је првобитно присутан као филм на површинама метала и може садржати поре.

На средњим брзинама у тачки судара понашање млаза је константно, успоставља се стабилан таласни образац на површини и добија се максимална чврстоћа споја. При овим условима настаје наизменична деформација површина стационарне и покретне плоче правилним осциловањем млаза непосредно испред тачке судара пре него што он напусти спој као слободан млаз. Овако настала наизменична деформација површина доприноси чврстоћи споја. Такође таласна форма може да изазове јачање повећањем површине контакта (Blazynski, 1983).

Амплитуда таласа се може значајно повећати повећањем угла судара и/или брзине удара преко повећаног растојања, при константној брзини тачке судара. Чак и за метале који не формирају интерметална једињења, таласни облик са већим врхом (мали однос  $\lambda/a$ )

може дати јаче спојеве. Ово може бити резултат повећане површине завареног споја о којој је претходно дискутовано и веће дубине отврдњавања ударом уоченог код вршних таласа. У литератури је наведено да ће са односом  $\lambda/a \leq 7$  код угљеничних челика бити добијен задовољавајући квалитет споја (Blazynski, 1983).

Међутим, максимална статичка чврстоћа везе се обично постиже са добро развијеним таласастим спојем, односно, када је брзина тачке судара знатно већа од те вредности где површина постаје равна (Keller, 1968), (Vaidyanathan, 1992). Дефинисана је као прелазна брзина  $V_T$  (прелаз из турбулентног у ламинарни ток). Cowan је показао да брзина судара зависи од одређених својстава метала који се заварују, у складу са хидродинамичком теоријом (Blazynski, 1983), (Cowan, 1971).

$$V_c = \sqrt{\frac{2(H_F + H_A)R_e}{(\rho_F + \rho_A)}} \quad (2.7)$$

где су:

$R_e$  - Рејнолдсов број,

$H$  - тврдоћа по Vickers-овој скали и

$F$  и  $A$  - представљају покретну и стационарну плочу респективно.

Рејнолдсов број који одговара овим вредностима има просечну вредност од 10,6.

За облоге са паралелном геометријом, брзина детонације коришћеног експлозива треба да буде блиска оптималној брзини тачке судара. Ако би, при дебљини која је потребна за ову брзину, експлозив дао превисоку брзину покретне плоче, потребно је поставити облогу (најчешће је то гума) између покретне плоче и експлозива да би се компензовала брзина. Ако би, с друге стране, брзина покретне плоче била прениска, дебљина облоге се може смањити или пуњење набити (Blazynski, 1983). Остали фактори као што су дебљина и густина сваке компоненте су дефинисани материјалима који се заварују (Blazynski, 1983).

Топљење материјала се може користити као основа за израчунавање горње границе енергије удара и последично брзине  $V_p$ . Адијабатско загревање дејством енергије млаза изазива повећање температуре, што заузврат може да изазове топљење једне или обе заварене плоче праћено веома брзим хлађењем. Термофизичка својства нелегиране смеше на међупростору, као и топлотна проводљивост покретне и стационарне плочеће управљати овим процесом. Израз за максималну вредност ударне брзине покретне плоче  $V_p$  у смислу термичких својстава дао је Wittman (Carpenter, 1975):

$$V_p = \frac{1}{N} \frac{(T_m C)^{1/2}}{V_c} \left( \frac{K C C_h}{\rho t} \right)^{1/4} \quad (2.8)$$

где су:

$N$  - константа,

$T_m$  - тачка топљења,

$K$  - топлотна проводљивост,

$C_h$  - специфична топлота,

$V_c$  - брзина тачке судара и



$C$  - лонгитудинална брзина звука кроз плочу,  
 $\rho$  - густина покретне плоче  
 $t$  - дебљина покретне плоче.

У доступним радовима, коефицијент  $K$  може имати различите вредности (Bataev, 2019), (Deribas, 1974). То указује да је најважнији параметар ударна брзина плоче  $V_p$ . Међутим,  $V_p$  је веома тешко директно измерити због брзине процеса. Неки поступци мерења описани су у радовима (Radić, 2000), (Blazynski, 1983), (Smith, 1971).

Формула такође узима у обзир термалне ефекте (Wronka, 2010) који утичу на тврдоћу завареног споја, посебно у зони близу споја (Crossland, 1970). У једначини 2.8, параметар  $N$  није прецизно дефинисан. У различитим литературним изворима његове вредности варирају између 0,037 и 0,11 (Bataev, 2019).

Доња граница  $V_c$  (линија f-f') може се одредити при  $R_e = 10,6$ . Једначина 2.9 приказује доњу границу за заваривање (Ghomi, 2009), (Bataev, 2019).

$$V_c = \frac{k_1}{\beta} \sqrt{\frac{Hv}{\rho}} \quad (2.9)$$

где су:

$\beta$  - угао удара у степенима,  
 $Hv$  - тврдоћа по *Vickers*-овој скали,  
 $\rho$  - густина и  
 $k_1$  - бездимензиона вредност у границама од 0,6 до 1,2 у зависности од површинске храпавости плоча.

#### 2.1.4. Однос масе експлозива и покретне плоче

Једначина 2.10, је експериментално одређена формула која повезује масу експлозива и масу покретне плоче (Ghomi, 2009), (Addison, 1969).

$$e/m = \frac{4 \sin \frac{\beta}{2}}{\left(k - 2 \sin \frac{\beta}{2}\right)} \quad (2.10)$$

где су:

$e$  - количина експлозива,  
 $m$  - маса експлозива и  
 $k$  - бездимензионална константа,  $k = 0,612$  (Ghomi, 2009),  $k = 0,578$  (Addison, 1969) и  $k = 0,55$  (Carvalho, 2018).

#### 2.1.5. Међусобно растојање

Покретна плоча се у почетку убрзава ударним таласом, који настаје услед притиска детонације, а затим гасовитим продукцима детонације који се шире. Ако је растојање између покретне и стационарне плоче довољно велико, покретна плоча ће на крају

достиги крајњу брзину дату одговарајућом Gurney-евом једначином (Gurney, 1970). У нормалним условима, када фронт детонације путује паралелно са површином покретне плоче, крајња брзина се постиже у времену које је потребно гасовима да се прошире до седам пута веће запремине експлозива (Kury, 1965). Из тога следи да, што је већа брзина детонације и густина експлозива, то је потребно мање међусобно растојање.

Размак  $S$  који је потребан за постизање максималне брзине плоче  $V_p$  може се добити комбиновањем теоретских резултата (Aziz, 1961), (Kennedy, 1970).

$$S = 3kx_e C/M \quad (2.11)$$

гдесу:

$k=0,4$  и  $k=0,7$  за брзине удара од 70%  $V_p$  и 100%  $V_p$  респективно (Radić, 2000) и  $x_e$  - дебљина експлозива.

Достизање 70% вредности брзине  $V_p$  би било оптимум јер није ни неопходно ни пожељно постићи брзину при којој се јављају израженији термални ефекти из следећих разлога: (Blazynski, 1983), (Vaidyanathan, 1992):

- Корисни део крајње брзине се постиже рано у фази убрзања,
- Максимална брзина, практично нема потисну енергију која би се супротставила силама одбијања које могу имати тенденцију да раздвоје покретну и стационарну плочу у времену када још увек постоји растопљени материјал,
- Задовољавају све захтеве везивања и
- Елиминише се могућност стварања недостатака завара.

Такође, превелика брзина је непожељна због потенцијалне могућности недостатака и оштећења покретне плоче (Vaidyanathan, 1992).

Дакле, према Stivers-у и Wittman-у, (Deribas, 1967) практична минимална вредност растојања за облагање може се добити из следеће емпиријске једначине:

$$S = 0,2(x_e + x_f) \quad (2.12)$$

где су:

$x_f$  - дебљина покретне плоче и  
 $x_e$  - дебљина експлозива.

У паралелној геометрији где се жели побољшати облик таласа повећањем угла судара, без повећања брзине тачке судара, може се користити међусобно растојање веће од растојања дефинисаног једначином (2.12) али мање него што је дато једначином (2.11), са  $k = 0,7$  (Blazynski, 1983).

Када је потребно велико међусобно растојање, постаје важно осигурати да се потенцијалне поремећајне силе и ивични ефекти минимизирају. Стога се мора повећати дебљина експлозива, као и површина покретне плоче и експлозива у односу на површину стационарне плоче.

### 2.1.6. Површина подлоге

Ако се зазор значајно повећа без одговарајућег повећања дебљине експлозива, потисни притисак може пасти до таквог нивоа да не може да се супротстави сили која настаје када се талас компресије произведен при удару рефлектује. Поремећајне силе сличне величине могу настати са доње стране танке или слабо ослоњене стационарне плоче. Ако подлога није у блиском контакту са доњом страном покретне плоче, може доћи до формирања одбојног таласа који ће тежити одвајању покретне од стационарне плоче (Blazynski, 1983).

Са увећаним пуњењем, одвајање обично није проблем под условом да је дебљина стационарне плоче најмање два, а пожељно најмање три пута већа од дебљине покретне плоче. У овом случају улога подлоге је да обезбеди погодну радну површину, да ограничи кретање заварених плоча које би иначе могле да буду закопане на дубину од неколико десетина центиметара и искривљене. У овим околностима подлога од сабијеног песка може бити пожељнија од челичне или бетонске подлоге. Стога је пешчана површина јефтинија и може се лако изравнати након сваке операције заваривања (Blazynski, 1983).

Ако је стационарна плоча веома танка у односу на покретну плочу, неопходно је да стационарна плоча буде у блиском контакту са одговарајућим металном подлогом како би се спречило рефлектовање ударног таласа. У том случају се може применити спајање стационарне плоче и металне подлоге (Blazynski, 1983).

### 2.1.7. Завршна површинска обрада

Завршна површинска обрада и услови површине су важни из неколико разлога:

- Величина површинске храпавости одређује степен ефикасности одношења материјала кумулативним млазом, а тиме и степен додатног топљења на површини завареног споја, јер се кинетичка енергија млаза претвара у топлоту.
- Ако је величина таласа мала у поређењу са површинском храпавошћу, немогуће је развити стални таласни облик. Дистрибуција количине топлоте ће бити непредвидљива.
- Припрема површине може дефинисати степен очвршћавања. Високо полиране површине могу се произвести брушењем. У процесу припреме површине плоче, може доћи до површинског отврдњавања које утиче на заваривање, када се користи мања количина експлозива.

Фина завршна обрада површина је толерантнија за контаминирани слојеве као што су уље, маст и вода. Глатка површина плоче омогућава лакше избацивање нечистоћа кумулативним млазом.

У идеалном случају, ако је потребан завар, који је највишег квалитета, површине плоча треба да буду полиране. У комерцијалним условима, одређен степен жртвовање квалитета заваривања може се толерисати, јер високи степени полирања нису економски прихватљиви. Ипак, заваривање прихватљивог квалитета, генерално се добија са завршном обрадом која је боља од 2-3  $\mu\text{m}$  (Blazynski, 1983).

Дефекти, узроци и решења проблема приказани су у табели 2.2.

Табела 2.2. Могући дефекти, узроци и решења при експлозивном заваривању (Vaidyanathan, 1992)

Дефекти	Узроци	Решење
Спорадични завар	Материјал интерфејса померен као млаз	Смањење брзине плоче Адекватна припрема површине плоче
Љуштење	Таласи створени унутар покретне плоче	Експлозив мале брзине детонације и чврста земљана подлога.
Одвајање везе и лом покретне плоче	Екстензивни крајњи ефекат	Смањење ефекта масе и међусобног растојања. Постављање експлозива и изван покретне плоче. Повећање дебљине пуњења дуж ивице.
Незаварено подручје	Употреба металних одстојника	Употреба честица полистирена или ваздуха под притиском.
Незаварено подручје	Угао судара(нижи од критичног) због смањене брзине покретне плоче	Коришћење експлозива мале брзине детонације, високоенергетски појачивач (ако је потребно) и минимално међусобно растојање. Нагнути покретну плочу ако је мала.
Подручја високе тврдоће	Притисак изазван променом кристалне фазе и обрнуто	Мања брзина плоче. Жарење након заваривања.
Присуство спајања	Веома јако пластично течење	Одабир тачних параметара.
Топљење у вртлозима, расхладним шупљинама и тврдим и кртим интерметалним зонама.	Нагли пораст температуре због велике брзине смицања у екстремним условима	Смањење брзине покретне плоче. Исправни услови заваривања. Заваривање у вакууму.
Меки дендритски регион дуж споја	Својства материјала и температура споја	Исправни услови заваривања. Заварити у вакууму.
Растопљени спој, крте интерметалне зоне, појава пукотина приликом хлађења	Превисока кинетичка енергија плоча. Термичка контракција. Утицај разлике у топлотној проводљивости.	Пажљиво изаберите параметре заваривања.
Концентрације оксида, формирање слојева и стварање рупа у материјалу	Заробљен кумулативни млаз	Измените параметре процеса.

## 2.1.8. Амплитуда и таласна дужина формираног споја

Сваки добро заварен спој формира понављајуће таласасте форме. Као што је описано у тачки 2, такве форме имају облик синусоиде за материјале који су сличне густине, док за материјале различитих густина имају вртложни карактер. Према теоријским и експерименталним подацима очекује се да ће челици приближно сличних густина имати синусоидални карактер. Формиран облик заваара се може описати таласном дужином и амплитудом. Према раду (Ghomi, 2009) теоријска таласна дужина споја може се написати у следећем облику:

$$\lambda = 28h \sin^2 \frac{\beta}{2} \quad (2.13)$$

Такође, амплитуда споја може се написати у облику:

$$A = 0,2\lambda \quad (2.14)$$

где су:

$h$  - дебљина покретне плоче и  
 $\beta$  - угао судара.

## 2.2. Поставка експлозивног заваривања

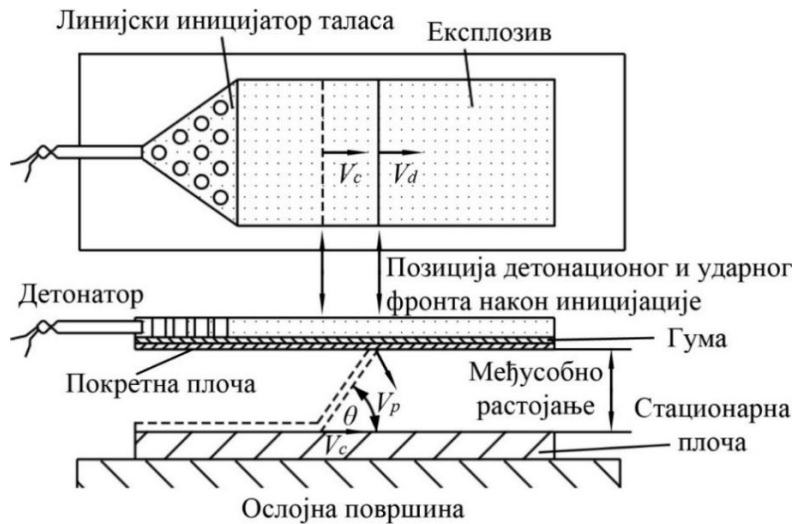
У овим делу дисертације су описане основне поставке за добијање заварених плоча експлозијом. Пажња је усмерена на две поставке, паралелна и нагнута које се користе за добијање заварених плоча већих димензија. При наредним разматрањима нису анализиране поставке за добијање заварених цилиндричних цеви.

У случају паралелне (константно одстојање) поставке (слика 2.3), брзина тачке судара,  $V_c$ , је једнака брзини детонације  $V_d$ , тако да је избор експлозива важан, како би се обезбедило да се  $V_c$  налази унутар „радног опсега“ материјала. Разматрано је да је брзина детонације константна приликом плакирања. Однос  $V_d = V_c$  одређује, да ли покретни део има константну брзину или убрзава у тренутку пре удара (нпр.  $V_c$  зависи од међусобног растојања). Ово је зато што, у паралелном случају, угао закретања  $\theta$  покретне плоче у тренутку судара једнак углу  $\beta$ , чији се синус приближно повећава линеарно са повећањем одбаченог дела  $V_p$  (једначина 2.13). Зато:

$$V_c = \frac{V_p}{2 \sin \theta/2} = \frac{V_p}{2 \sin \beta/2} \cong \frac{V_p}{\sin \beta} \cong V_d = constant \quad (2.13)$$

$$V_d = V_c = \frac{V_p}{2 \sin \theta/2}$$

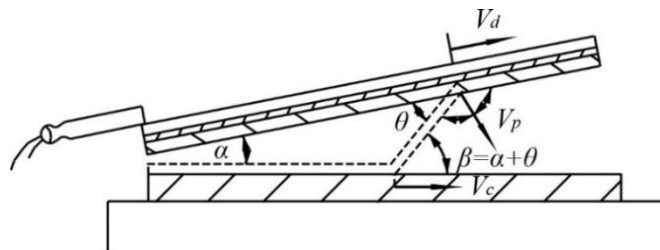
$$V_c = \frac{V_p}{\sin \beta} = \frac{V_p}{\sin \left( \alpha + \arcsin \frac{V_p}{V_d} \right)}$$



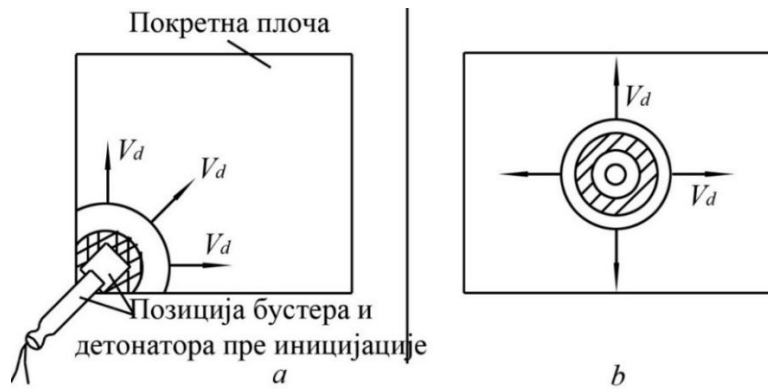
Слика 2.3. Геометрија паралелног заваривања (Blazynski, 1983).

Ове геометрије се користе комерцијално, приликом плакирања великих размера, где је дужина плакирања сувише велика, да би дозволила употребу статичког угла (слика 2.4) између покретне плоче и мете, због превеликог међусобног растојања које се јавља чак и на растојањима од само 0,25 m од места иницирања. Велика међусобна растојања често доводе до изобличења покретне плоче и одлепљивања услед превеликог губитка импулсног притиска у време судара и повећаних учесталих недостатка одлепљивања око периферије плоче, услед превеликих ивичних ефеката.

Немогуће је остварити стационарне услове детонације/судара у зони која је у непосредној близини иницијације експлозивног пуњења. Зато је угаона иницијација (слика 2.5a) често економична техника за заваривање са максималном површином уз коришћење најмање масе експлозивног пуњења. Ако се заварује плоча кружног облика, централно иницирање је оптимално. Централно иницирање производи мале незаварене зоне непосредно испод детонатора/иницијалног пуњења (слика 2.5б).

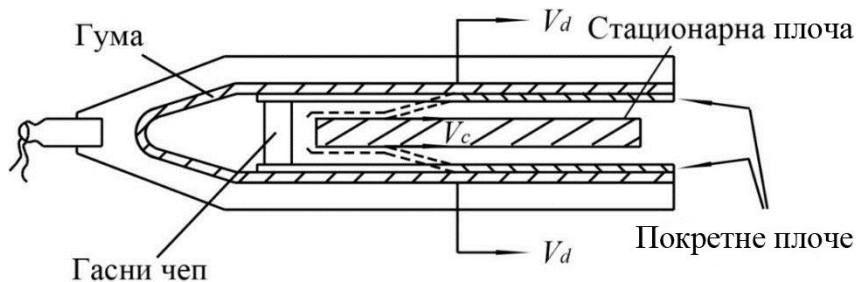


Слика 2.4. Основна геометрија нагнутног заваривања. Праве линије показују положаје детонације и фронта судара убрзо након иницирања (Blazynski, 1983).



Слика 2.5. Примери неповезаних површина (осенчено) повезани са иницираним пуњењем, (а) угаона иницијација, (б) централна иницијација.

Уравнотежена паралелна сендвич техника (слика 2.6), која отклања употребу подлоге, је занимљива у пракси ако се главна површина сваке плоче, може држати у вертикалној равни, како би се избегло одбацавање плоча у ваздух, услед реакције са земљом. Држање плоче у таквом положају, међутим, повећава тешкоће приликом руковања, а поред тога проблем представља и то што експлозив мора бити фиксиран за сваку покретну плочу.



Слика 2.6. Уравнотежена паралелна геометрија (шема). Испрекидане линије показују положаје урушеног слоја када фронтови детонације достигну приказани положај (Blazynski, 1983)

Очигледно бочни потисак може изазвати проблеме ако су моменти ове две покретне плоче знатно другачији. Још један недостатак ове технике је да подзвучно детонирајући експлозиви, морају бити у прашкастом или грануластом облику због чега стварају проблеме приликом униформног паковања, када су равне плоче вертикалне.

### 3. БЕЗБЕДНОСНИ АСПЕКТ ИЗВОЂЕЊА ЕКСПЛОЗИВНОГ ЗАВАРИВАЊА

#### 3.1. Критично растојање у поступку експлозивног заваривања

При извођењу поступка експлозивног заваривања, због безбедности запослених потребно је водити рачуна о минималном растојању између запослених и места експлозије у тренутку експлозије. Немарност или нехат може проузроковати привремени губитак слуха и пуцање бубне опне. Теже последице и смрт су изазвани оштећењем плућа и других унутрашњих органа. На основу масе експлозивног пуњења, која је потребна за експлозивно заваривање, одреди се критично растојање под условом максималног граничног притиска када долази до привременог губитка слуха односно максималног граничног притиска за пуцање бубне опне (Lazarević, 2020).

Оштећење слуха настаје услед дејства ударних таласа ( $UT$ ) у ваздуху, који су последица дејства експлозије. При експлозији настаје примарни талас (талас сабијања или компресије) и секундарни талас (талас разређења). Оштећења органа слуха под дејством ударног таласа зависе од удаљености лица од центра експлозије, од положаја органа слуха у односу на ударни талас, као и од претходног стања оштећеног ува (присуство упалних процеса и сл.).

Утврђено је да до привременог губитка слуха може доћи са нивоом притиска нижим од 6,9 kPa (Beveridge, 1998), док је праг пуцања бубне опне при притиску од 35 kPa који настаје при експлозији (Stewart, 2006).

Повреде проузроковане ударним таласом експлозије сразмерне су количини експлозива и обрнуто сразмерне удаљености од места експлозије. (Solomos, 2020). У случају експлозије 8 kg тротила, на удаљеностима 1-3,5 метара смртност је преко 99% док је на растојању око 5 метара смртност преко 50%. На даљинама 6-8,5 метара смртност је преко 20% док је при растојању преко 10 метара смртност мања од 5% (Icnomlegde, 2015). Потребно је нагласити да су усвојене критичне вредности условне. У радовима (BlackBox Biometrics, 2018) (Stamatović, 1995) се могу наћи подаци о вредностима натпритиска ударног таласа за различите степене повреде.

#### TNT еквивалент

Већина једначина за прорачун ударног таласа и импулса базира се на TNT еквиваленту. Због тога је за различите експлозиве пожељно познавати њихову еквивалентну масу.

Еквивалентна маса експлозивног пуњења се израчунава на основу израза (Jeremić, 2002):

$$M_{TNTe} = \frac{E_{deksp}}{E_{dTNT}} M_{eksp} \quad (3.1)$$

где су:

- $M_{TNTe}$  - еквивалентна маса тротила (TNT) у g,
- $E_{deksp}$  - енергија детонације експлозива у kJ/kg,
- $E_{dTNT}$  - енергија детонације тротила која износи 4184 kJ/kg и
- $M_{eksp}$  - маса експлозива у g.



Више о прорачуну еквивалентне масе и TNT еквивалента налази се у радовима (Вајић, 2009), (Papowicz, 2016).

Прорачун TNT еквивалента најчешће се базира на енергији, која се ослобађа приликом експлозије. Енергија може да се одреди на различите начине. Методе које се најчешће користе базирају се на хидродинамичким или термодинамичким параметрима.

### Одређивање критичног растојања експлозије

Главне карактеристике ударног таласа су натпритисак на фронту ударног таласа и време трајања таласа сабијања чије вредности зависе од врсте експлозива, масе експлозива и удаљености од места експлозије.

Поред формуле *Sadovskog* (*Sadovskii*, 1952), постоје бројне новије релације за одређивање натпритиска на фронту ударног таласа као што је *Brode* формула (*Brode*, 1955), *Kinney-Graham* формула (*Kinney & Graham*, 1985), *Kingery-Bulmash* формула, (*Gilbert & Bulmash*, 1984) итд. Овај рад ће се ради једноставности базирати на формули *Sadovskog* са две групе коефицијената  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  (табела 3.1) и *Kingery-Bulmash* методом.

За сферичне ударне таласе, који настају детонацијом одређене масе TNT, *Sadovski* (*Sadovskii*, 1952) је предложио емпиријску једначину за прорачун натпритиска на фронту ударног таласа у облику:

$$\Delta p = k_1 \frac{m_e^{\frac{1}{3}}}{r} + k_2 \frac{m_e^{\frac{2}{3}}}{r^2} + k_3 \frac{m_e}{r^3}$$

Сређивањем једначине добија се:

$$\Delta p \cdot r^3 - k_1 m_e^{\frac{1}{3}} r^2 - k_2 m_e^{\frac{2}{3}} r - k_3 m_e = 0 \quad (3.2)$$

где су:

$\Delta p$  - натпритисак на фронту ударног таласа у барима ( $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$ ),

$m_e$  - маса експлозивног пуњења у kg,

$r$  - удаљеност од центра експлозије у m и

$k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  - емпиријски коефицијенти који зависе од врсте експлозивног пуњења.

За тротил (TNT) у случају надземне експлозије (на бесконачној удаљености од тла) емпиријски коефицијенти могу се усвојити према табели 3.1. У даљем раду биће приказани резултати са различитом групом коефицијената  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  из табеле 3.1.

Табела 3.1. Коефицијенти  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  за случај надземне експлозије TNT (Orlenko, 2004) (Вајић, 2009)

Коефицијент	Надземна експлозија (Orlenko, 2004)	Надземна експлозија (Вајић, 2009)
$k_1$	0,84	1,02
$k_2$	2,70	4,36
$k_3$	7,00	14,00

У случају површинске експлозије, ударни талас у ваздуху се шири у облику полусфере (дупло мања запремина), па је натпритисак у том случају већи. Зато се у једначини (3.3) за масу експлозивног пуњења узима двострука вредност масе (Orlenko, 2004).

Како при површинској експлозији долази до деформације тла потребно је увести и коефицијент  $\eta$  који зависи од врсте тла (табела 3.2), тако да се еквивалентна (прорачунска) маса експлозива може израчунати помоћу једначине (3.3):

$$m_p = 2 \cdot \eta \cdot M_{TNTe} \quad (3.3)$$

Табела 3.2. Вредности коефицијента  $\eta$  у зависности од типа тла (Orlenko, 2004)

Тип препреке	Челична плоча	Армирано бетонска проча	Бетон, стена	Тврдо земљиште	Средње тврдо земљиште	Вода
$\eta$	1	0,95-1,00	0,85-0,90	0,70-0,80	0,60-0,65	0,55-0,60

У овом раду усвојене су вредности коефицијената  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  према раду (Orlenko, 2004) и према раду (Вајић, 2009) приказани у табели 3.1. У оба случаја претпоставља се да се у прорачуну експлозивног заваривања усваја двострука маса експлозивног пуњења  $m_p$  према једначини (3.3) и коефицијент  $\eta$  за челичну плочу. Остале вредности коефицијента  $\eta$  се неће разматрати.

Решење једначине (3.2) добија тако што се иста сведе на следећи облик:

$$y^3 + p \cdot y + q = 0$$

где  $p$  и  $q$  имају следеће вредности:

$$p = -\frac{m_p^{\frac{2}{3}}(k_1^2 + 3k_2\Delta p_\varphi)}{3\Delta p_\varphi^2}$$

$$q = -\frac{m_p(27k_3m_p\Delta p_\varphi^2 + 9k_1k_2\Delta p_\varphi + 2k_1^3)}{27\Delta p_\varphi^3}$$

Израчунавање дискриминанте  $D$  врши се по следећој једначини:

$$D = \frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}$$

Помоћу Kardanove једначине добијају се решења по у:

$$y = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{D}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{D}}$$

За добијање решења кубне једначине, користи се следећа једначина:

$$r = y - \frac{k_1 m_p^{\frac{1}{3}}}{3\Delta p_\varphi} \quad (3.4)$$

Поред *Sadovskogy* овом раду се користи и метода *Kingerey-Bulmash*. Метода *Kingerey-Bulmash* се користи у међународним прописима (IATG 01.80, 2015) и применљивија је у овом случају.

За случај површинске експлозије *Kingery-Bulmash* полином за притисак на челу ударног таласа је:

$$Y = C_0 + C_1 U + C_2 U + C_3 U \dots\dots\dots C_n U \quad (3.5)$$

$$U = K_0 + K_1 T \quad (3.6)$$

$$T = \log_{10}(R\sqrt[3]{M_{TNTe}}) \quad (3.7)$$

где су:

- T - Логаритам растојања са основом десет (m),
- K<sub>0</sub>, K<sub>1</sub> - коефицијенти,
- C<sub>1</sub>, C<sub>9</sub> - коефицијенти и
- R - растојање (m).

Ове једначине имају опсег применљивости од 0,05 до 40 m.

Параметри *Kingery-Bulmash* полинома за притисак на челу ударног таласа приказани су у табели 3.3. Нумеричке вредности за константе „C“ и „K“ су вредности за 1 kg TNT еквивалента. За остале експлозиве захтева се да се прво процени TNT еквивалент.

Многе државе користе правила која се заснивају на експлозивима, њиховој количини и удаљености од експлозива на месту где су људи у ризику. Ова правила су позната као критеријуми количина-удаљеност (*Q-D*), (AASTP-1, 2010) и заснивају се на приступу изведеном из *Hopkinson-Cranz* закона о скалирању, који је надаље допуњаван низом коефицијената (једначина 3.7) (IATG 01.80, 2015).

Табела 3.3. Параметри Kingery-Bulmash полинома за притисак на челу ударног таласа (IATG 01.80, 2015).

Параметри	Бројчана вредност
$K_0$	-0,214362789151
$K_1$	1,35034249993
$C_1$	2,78076916577
$C_2$	-1,6958988741
$C_3$	0,154159376846
$C_4$	0,514060730593
$C_5$	-0,0988534365274
$C_6$	-0,293912623038
$C_7$	-0,0268112345019
$C_8$	0,109097496421
$C_9$	0,00162846756311

Ови критеријуми су основ великог дела рада на процени одговарајућих количина и раздаљине раздвајања.

### 3.2. Термални ефекти

Прорачун топлотног флукса се врши или са модела тачкастог извора (ако се однос пречника ватрене кугле и удаљености може апроксимирати овом претпоставком) или коришћењем дијаграма које су дали *Baker* и остали (IATG 01.80, 2021).

$$d = 3,86 Q^{0.32}$$

$$t = 0,299 Q^{0.32}$$

где су:

$d$  - пречник ватрене лопте, m,

$t$  - трајање ватрене лопте, s и

$Q$  - маса сагоревања, kg.

### 3.3. Ефекти експлозије на објекте

Грубе процене структуралних оштећења услед ваздушних експлозија могу се добити из емпиријски изведених модела на основу анализе несрећа, испитивања и података о ратној штети. Ова анализа корелира структурно оштећење са удаљености од експлозије и укљученом масом пуњења.

Најобимнији подаци доступни су за конструкције изграђене од цигле због студија спроведених у Другом светском рату. Развијене су категорије оштећења изазваних експлозијом за стамбене објекте изграђене од цигле које се могу користити у анализи последица експлозије да би се илустровала потенцијална озбиљност ефеката нежељеног експлозија.

Табела 3.4. Категорије оштећења стамбених објеката изграђених од цигле (IATG 01.80, 2021).

Категорија	Дефиниција	Примедбе
A	Куће потпуно срушене.	
B	Куће су толико оштећене да се не могу поправити и захтевају рушење.	- Уништено 50% - 75% спољне цигле. - Преостали зидови имају веома видљиве пукотине које се не могу поправити.
C <sub>B</sub>	Куће су постале неупотребљиве, али се могу поправити уз обимне радове.	- Делимично или потпуно урушавање кровне конструкције. - Делимично рушење зидова до 25% од целине. - Тешка оштећења носивих преграда која захтевају рушење и замену.
C <sub>A</sub>	Куће су постале неупотребљиве, али се могу поправити релативно брзо.	- Не прелази мања оштећења конструкције. - Преграде и столарија отргнути од окова.
D	Куће које захтевају поправке да би се отклониле озбиљна оштећења, али остају уселјиве.	- Оштећење плафона и плочица. - Мањи ефекти фрагментације на зидовима и застакљивању.

Анализа података коришћена за израду табеле 3.4 довела је до формирања емпиријске формуле за процену опсега оштећења (табела 3.5).

$$R_x = \frac{K_x M_e^{\frac{1}{3}}}{\left(1 + \left(\frac{3175}{M_e}\right)^2\right)^{\frac{1}{6}}}$$

где су:

$R_x$  - Опсег за ниво оштећења „x“, m,

$K_x$  - Константа за ниво оштећења „x“ (Табела 3.5) и

$M_e$  - маса експлозива, kg.

Вредности за  $K_x$  је првобитно извео Jarrett, а затим су их ревидирали Gilbert, Leesi Scilli. Ревидиране вредности узимају у обзир фактор кућишта, који представља степен енергије пренесене примарним фрагментима из кућишта, чиме се смањује расположива енергија експлозије (IATG 01.80, 2021).

Табела 3.5.  $K_x$  фактор за различите степене оштећења (IATG 01.80, 2021)

$K_x$ за категорију штете	Jarrett	Gilbert, Leesi Scilly
A	3,80	4,80
B	5,60	7,10
C <sub>B</sub>	9,60	12,40
C <sub>A</sub>	28,00	21,30
D	56,00	42,60

## 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ПОСТАВКА

У овом поглављу приказан је неопходан прелиминарни прорачун експлозивног заваривања два челика, прорачун критичног растојања неопходног за безбедно извођење експеримента, кратак опис коришћеног експлозива и пратеће опреме. Такође приказане се поступак експлозивног заваривања опружног челика који је рађен у сврху карактеризације и провере квалитета завареног споја. Прелиминарни резултати који су добијени, допринели су бољем разумевању процеса. На основу стеченог искуства, урађен је главни експеримент, односно извршено је експлозивно заваривање алатног и конструкционог челика, чија је карактеризација тема ове докторске дисертације. Резултати који су добијени у процесу заваривања опружног челика у већој мери су слични резултатима алатног челика. Из тог разлога поједини, слични резултати нису приказани, већ су приказани резултати заваривања алатног челика који су у међувремену проширени новим методама.

### 4.1. Прорачун параметара експлозивног заваривања

Експлозивно заваривање различитих материјала могуће је под одређеним условима, односно зависи од особина материјала који се заварују и услова самог процеса експлозивног заваривања.

Подручје заваривања тзв. *welding window* је ограничено правим и кривим линијама као што је објашњено у поглављу 2.1 и приказано на слици 2.2. На сликама 4.1 и 4.2 су приказане области заваривања при извођеним експериментима. У оквиру припреме експеримента успостављени су односи између почетних услова – углова  $\alpha$ ,  $\beta$  и карактеристика експлозива. Подручје заваривања је ограничено са 7 параметара  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $V_d$ ,  $V_p$ ,  $V_f$ ,  $V_c$  и својствима материјала.

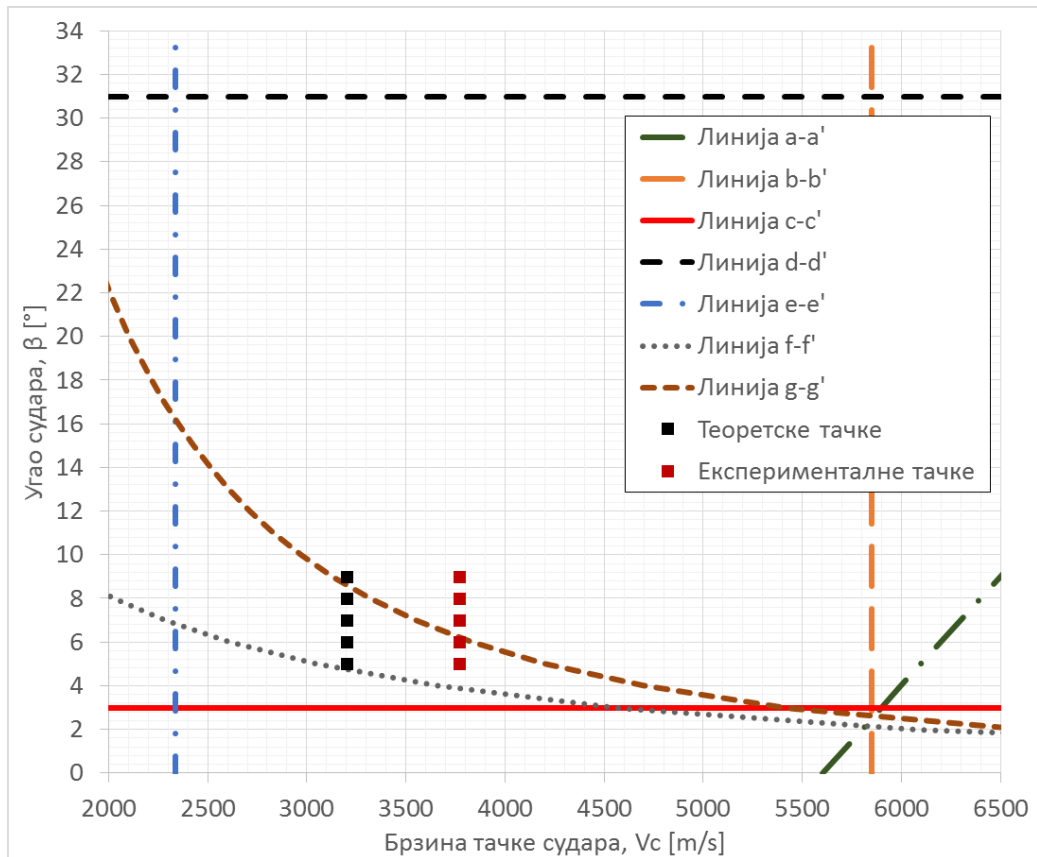
Растојање између плоча мора бити такво да покретна плоча може да убрза до жељене брзине удара. Минимални зазор је емпиријски одређен половином дебљине покретне плоче једначина 4.1. Емпиријска формула за израчунавање потребног размака између плоча из (Blazynski, 1983), (Radić, 2000) дата је:

$$S = 3kh_e \frac{C}{M} \quad (4.1)$$

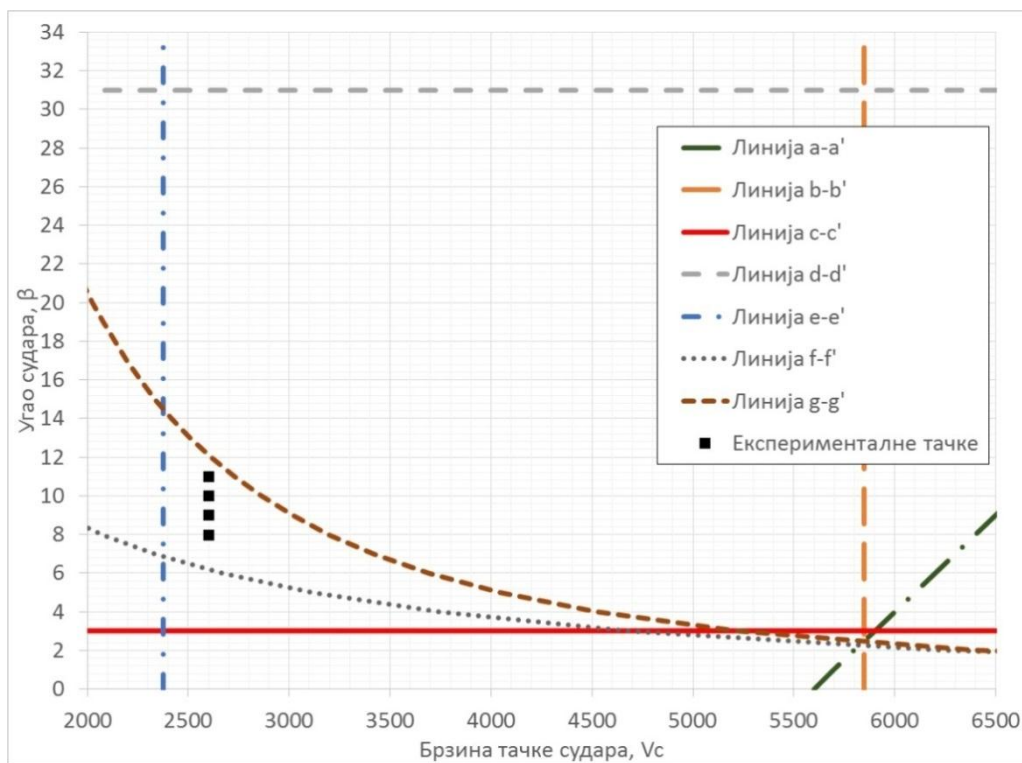
где су:

- $S$  - представља међусобно растојање између плоча,
- $k$  - бездимензионална константа,
- $M$  - маса покретне плоче,
- $C$  - маса експлозива и
- $h_e$  - дебљина експлозива.

Вредност  $k$  је у опсегу између 0,4 и 0,7 и зависи од брзине удара (70% и 100%  $V_p$ , респективно) (Radić, 2000).



Слика 4.1. Област заварљивости у поступку експлозивног заваривања (опружни челик)



Слика 4.2. Област заварљивости у поступку експлозивног заваривања (алатни челик)

Најважнији услов за заваривање је формирање млаза, који је представљен линијом а-а' на слици 4.1. То се мора десити на месту контакта за успешно заваривање. Из теорије је

познато да  $V_c$  мора остати подзвучна док остали критеријуми оптималног притиска морају бити задовољени истовремено. Да би се испунила оба критеријума, мора се остварити минимални угао  $\beta$  (Shepra, 2021), (Jindrich, 2016). Формирање млаза ће бити успешно ако су испуњени услови на левој страни линије a-a'. Абрахамсон (Abrahamson, 1961) предлаже следећи однос између  $\beta$  и  $V_c$  једначина 4.2:

$$V_c = 10^3 \left( \frac{\beta}{10} + 5,5 \right) \quad (4.2)$$

У сваком случају брзина тачке контакта  $V_c$  мора бити мања од брзине звука у покретној плочи, увећане за 30% линија b-b'.

Доњу и горњу границу динамичког угла  $\beta$  су, између осталих, експериментално одредили *Bahrani* и *Crossland* (Bahrani, 1964). Предложена је доња граница од  $2^\circ$ - $3^\circ$  и горња граница од  $31^\circ$  (линија c-c' линија d-d'),

Cowan (Blazinski, 1983), (Cowan, 1971) је дефинисао доњу границу  $V_c$  (линија e-e') једначине 4.3, према хипотези флуида, како следи:

$$V_c = \sqrt{\frac{2(H_F + H_A)Re}{(\rho_F + \rho_A)}} \quad (4.3)$$

где су:

$Re$  - Рејнолдсов број,  
 $H$  - тврдоћа по Vickers-овој скали и  
индекси  $F$  и  $A$  представљају покретну и стационарну плочу респективно.

Доња граница  $V_c$  (линија f-f') може се одредити на прелазној граници која се јавља при  $Re = 10,6$ . Једначина 4.4 приказује доњу границу за заваривање (Ghomi, 2009).

$$V_c = \frac{k_1}{\beta} \sqrt{\frac{Hv}{\rho}} \quad (4.4)$$

где су:

$\beta$  - угао удара у степенима,  
 $Hv$  - тврдоћа према Vickers-овој скали,  
 $\rho$  - густина и  
 $k_1$  - бездимензионална вредност између 0,6 и 1,2 у зависности од хrapавости површине плоча (Bataev, 2019).

У доступним радовима коефицијент  $k_1$  може имати различите вредности (Bataev, 2019), (Deribas, 1974). Како је објашњено у подпоглављу 2.1.3, најважнији параметар је брзина удара плоче  $V_p$ , међутим како је брзину  $V_p$  веома тешко директно мерити због брзине процеса заваривања експлозијом, за одређивање горње границе (линија g-g') предложена је експериментална формула 2.8. За извођење експеримента у паралелној геометрији, прикладнија једначина се може добити уврштавањем једначине 2.13 у једначину 2.8 тако да је:

$$V_c = \frac{(T_m C_b)^{\frac{1}{4}}}{\sqrt{2N \sin \frac{\beta}{2}}} \left( \frac{k C_p C_b}{\rho h} \right)^{\frac{1}{8}} \quad (4.5)$$



где су:

$N$  - константа,  
 $T_m$  - тачка топљења,  
 $K$  - топлотна проводљивост,  
 $C_h$  - специфична топлота,  
 $V_c$  - брзина тачке судара и  
 $C$  - лонгитудинална брзина збука кроз плочу.  
 $\rho$  - густина покретне плоче  
 $t$  - дебљина покретне плоче.

Формула такође узима у обзир термичке ефекте (Wronka, 2010), који утичу на тврдоћу завареног споја, посебно у зони близу споја (Crossland, 1970). У једначини 4.5, параметар  $N$  није прецизно дефинисан. У зависности од радова, његове вредности варирају између 0,037 и 0,11 (Bataev, 2019).

У подпоглављу 2.1.4 дата је експериментално одређена једначина за однос масе експлозива и покретне плоче. Овај израз је искоришћен да се одреди маса експлозива при извођеним експериментима на основу масе завариваних плоча.

$$\frac{e}{m} = \frac{4\sin\frac{\beta}{2}}{(k-2\sin\frac{\beta}{2})} \quad (4.6)$$

где су:

$e$  - количина експлозива,  
 $m$  - маса експлозива,  
 $k$  - бездимензионална константа,  $k=0,612$  (Ghomi, 2009),  $k=0,578$  (Addison, 1969),  
и  $k=0,55$  (Carvalho, 2018).

### **Својства челика и експлозива**

Механичке карактеристике опружног челика  $51CrV4$  (Č4830), алатног челика  $X155CrVMo12-1$  (Č4850,  $X160CrMoV121$ ) и нелегираног челика  $S355J2$  (Č0563), неопходне за прорачун експлозивног заваривања, приказане су у табели. 4.1.

Табела 4.1. Механичке карактеристике челика *51CrV4*, *X155CrVMo12-1* и *S355J2*

Ознака	Јединица	Покретна плоча Опружни/Алатни челик	Базна плоча
$C_b$ – Брзина звука у материјалу	<i>m/s</i>	$4,5 \cdot 10^4$	
$Re_{cr}$ – Реинолсов број		10,6	
$H_{v,f}$ , $H_{v,p}$ – Тврдоћа Vickers	<i>Pa</i>	$2,20 \cdot 10^9 / 2,30 \cdot 10^9$	$1,84 \cdot 10^9$
$\rho_f$ , $\rho_p$ – Густина (Ovako, 2023)	<i>kg/m<sup>3</sup></i>	$7,80 \cdot 10^3$	$7,85 \cdot 10^3$
$k_1$ – Емпиријска константа (Bataev, 2019), (Mendes, 2013).		0,6	
$N$ – Емпиријска константа (Bataev, 2019)		0,062	
$T_m$ – Температура топљења материјала	<i>°C</i>	1454,0	
$C_p$ – Специфична топлота	<i>J/kgK</i>	500,0	
$k$ – Термална проводљивост	<i>W/mK</i>	21,4	
$h$ – Дебљина покретне плоче	<i>m</i>	0,003	0,010
$\sigma_{Tf}$ , $\sigma_{Tp}$ – Затезна чврстоћа (Henan, 2023), (MEADinfo, 2023).	<i>Pa</i>	$7,0 \cdot 10^8 / 8,6 \cdot 10^8$	$6,3 \cdot 10^8$
$\sigma_f$ , $\sigma_p$ – Граница еластичности (Henan, 2023).	<i>Pa</i>	$5,5 \cdot 10^8 / 4,2 \cdot 10^8$	$3,55 \cdot 10^8$

За реализацију експеримента коришћене су две врсте привредног експлозива, произвођача компаније Trayal из Крушевца, Република Србија: експлозиви Амонекс и Демекс. Изабрани су експлозиви са најмањом брзином детонације у складу са претходним прорачунима. Њихове карактеристике су представљене у табели 4.2.

Табела 4.2. Карактеристике експлозива (Trayal corporation, 2022)

	Јединица	Амонекс	Демекс
Густина	<i>g/cm<sup>3</sup></i>	0.96-1.04	0,5-0,8
Насипна густина	<i>g/cm<sup>3</sup></i>	0,5	0,75
Брзина детонације, мин.	<i>m/s</i>	3200	1950-2050
Запремина гасовитих продуката	<i>dm<sup>3</sup>/kg</i>	1004	
Биланс кисеоника	%	+ 0,17	
Топлота експлозије	<i>kJ/kg</i>	3892	
Температура експлозије	<i>K</i>	2661	
Притисак детонације	<i>kbar</i>	27	
Иницирање		КД-8	

Хемијски састав опружног челика *51CrV4* (Č4830), алатног челика *X155CrVMo12-1* (Č4850, *X160CrMoV121*) и нелегираног челика *S355J2* (Č0563) у масеним процентима, дати су у табели 4.3. Испитивање је обављено апаратом „Spektrometar SpectroLab LACM12“ методом оптичког емисионог спектрометра (OEC), према стандарду *SRPS C.A1.011:2004* у Институту IMW, Крагујевац.

OEC је намењен за квантитативну хемијску анализу легура метала из чврстог узорка. Техника испитивања се заснива на компаративној анализи, инструмент је фабрички калибрисан на основу сертифицираних референтних материјала који су складиштени у меморији спектрометра. Према таласним дужинама карактеристичног зрачења, које се детектују, инструмент одређује врсту елемента, а према њиховом интензитету, количину

садржаја, упоређујући их са познатим интензитетима карактеристичног зрачења (IMW Institut, 2023).

Табела 4.3. Хемијски састав челика *51CrV4*, *X155CrVMo12-1* и *S355J2*

Јединица	теж. %													
Елемент	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N	Ti	Nb	V	Al
Садржај <i>51CrV4</i>	0,491	0,257	0,816	0,0134	0,0052	0,988	0,194	0,051	0,250	0,012	<0,001	0,003	0,128	0,015
Садржај <i>X155CrVMo12-1</i>	1,58	0,26	0,32	0,01	0,01	12	-	0,9	-	-	-	-	0,7	-
Садржај <i>S355J2</i>	0,160	0,033	1,382	0,0132	0,0052	0,027	0,028	<0,001	0,029	0,007	0,008	0,029	0,004	0,038

Испитивани узорци одговарају опружном, алатном, и конструкционом нелегираном челику респективно.

Хемијски састав Амонекс/Демекс који је декларисао произвођач приказан је у табели 4.4.

Табела 4.4. Хемијски састав експлозива Амонекс/Демекс (Traual corporation, 2022)

Врста експлозива	Процент хемијског састава Амонекс	Процент хемијског састава Демекса
Амонијум нитрат - $\text{NH}_4\text{NO}_3$	86,5%	95,5%
TNT - $(\text{NO}_2)\text{C}_6\text{H}_2\text{CH}_3$	4,5%	2,0%
Дрвене букове струготине без смола	7,0%	0,625%
Карбоксиметил целулоза	0,7%	0,8%
Калцијум стеарат - $\text{C}_{36}\text{H}_{70}\text{CaO}_4$	0,3%	0,5%
Базно парафинско уље	1,0%	0,575%

У подпоглављу 2.1.8 дата је експериментално одређена једначина за одређивање таласне дужине:

$$\lambda = 28h \sin^2 \frac{\beta}{2} \quad (4.7)$$

Такође, је дата једначина за одређивање амплитуде формираног таласа:

$$A = 0,2\lambda \quad (4.8)$$

где су:

$h$  - дебљина покретне плоче и  
 $\beta$  - угао судара.

У наредним табелама дате су вредности добијене одговарајућим прорачунима неопходним за креирање кривих на дијаграмина на сликама 4.1 и 4.2.

Табела 4.5. Граничне вредности неопходне за формирање дијаграма са слике 4.1

Угао судара	Линија а-а'	Линија б-б'	Линија с-с'	Линија д-д'	Линија е-е'	Линија ф-ф'	Линија г-г'
$\beta$ , °	$V_c$ , m/s	$V_c$ , m/s	$\beta$ , °	$\beta$ , °	$V_c$ , m/s	0,6	
0	0	5850	3	31	2339,38360	-	-
1	5600	5850	3	31	2339,38360	394,4053	9386,6490
2	5700	5850	3	31	2339,38360	394,4053	6637,4895
3	5800	5850	3	31	2339,38360	394,4053	5419,6595
4	5900	5850	3	31	2339,38360	394,4053	4693,7713
5	6000	5850	3	31	2339,38360	394,4053	4198,4765
6	6100	5850	3	31	2339,38360	394,4053	3832,9347
7	6200	5850	3	31	2339,38360	394,4053	3548,9009
8	6300	5850	3	31	2339,38360	394,4053	3320,0089
9	6400	5850	3	31	2339,38360	394,4053	3130,4722
10	6500	5850	3	31	2339,38360	394,4053	2970,1850
11	6600	5850	3	31	2339,38360	394,4053	2832,3379
12	6700	5850	3	31	2339,38360	394,4053	2712,1532
13	6800	5850	3	31	2339,38360	394,4053	2606,1663
14	6900	5850	3	31	2339,38360	394,4053	2511,7954
15	7000	5850	3	31	2339,38360	394,4053	2427,0720
16	7100	5850	3	31	2339,38360	394,4053	2350,4653
17	7200	5850	3	31	2339,38360	394,4053	2280,7646
18	7300	5850	3	31	2339,38360	394,4053	2216,9979
19	7400	5850	3	31	2339,38360	394,4053	2158,3749

Табела 4.6. Граничне вредности неопходне за формирање дијаграма са слике 4.2

Угао судара	Линија a-a'	Линија b-b'	Линија c-c'	Линија d-d'	Линија e-e'	Линија f-f'	Линија g-g'
$\beta$ , °	$V_c$ , m/s	$V_c$ , m/s	$\beta$ , °	$\beta$ , °	$V_c$ , m/s	0,6	
0	0	5850	3	31	2376,0986	-	-
1	5600	5850	3	31	2376,0986	18686,1462	9038,5511
2	5700	5850	3	31	2376,0986	9343,0731	6391,3424
3	5800	5850	3	31	2376,0986	6228,7154	5218,6748
4	5900	5850	3	31	2376,0986	4671,5366	4519,7058
5	6000	5850	3	31	2376,0986	3737,2292	4042,7786
6	6100	5850	3	31	2376,0986	3114,3577	3690,7928
7	6200	5850	3	31	2376,0986	2669,4495	3417,2921
8	6300	5850	3	31	2376,0986	2335,7683	3196,8885
9	6400	5850	3	31	2376,0986	2076,2385	3014,3806
10	6500	5850	3	31	2376,0986	1868,6146	2860,0376
11	6600	5850	3	31	2376,0986	1698,7406	2727,3025
12	6700	5850	3	31	2376,0986	1557,1789	2611,5747
13	6800	5850	3	31	2376,0986	1437,3959	2509,5183
14	6900	5850	3	31	2376,0986	1334,7247	2418,6471
15	7000	5850	3	31	2376,0986	1245,7431	2337,0656
16	7100	5850	3	31	2376,0986	1167,8841	2263,2998
17	7200	5850	3	31	2376,0986	1099,1851	2196,1839
18	7300	5850	3	31	2376,0986	1038,1192	2134,7819
19	7400	5850	3	31	2376,0986	983,4814	2078,3330

Табела 4.7. Зависност ударне брзине од динамичког угла  $\beta$  за Амонекс

Угао судара	Максимална доња граница ударне брзине	Максимална ударна брзина	Ударна брзина	Однос брзина	Усвојена ударна брзина
$\beta, ^\circ$	$V_p, \text{ m/s}$	$V_{pmax}, \text{ m/s}$	$V_p, \text{ m/s}$	$V_p/V_d$	$V_p, \text{ m/s}$
0	-	-	55,8498	0	-
1	318,6469	163,8258	111,6954	0,0174	-
2	318,6348	231,6803	167,5324	0,0349	-
3	318,6146	283,7402	223,3567	0,0523	-
4	318,5862	327,6205	279,1640	0,0697	-
5	318,5499	366,2699	334,9501	0,0872	-
6	318,5054	401,2006	390,7106	0,1046	334,9501
7	318,4528	433,3104	446,4414	0,1220	390,7106
8	318,3922	463,1842	502,1382	0,1395	446,4414
9	318,3235	491,2280	557,7967	0,1569	-
10	318,2467	517,7373	613,4128	0,1743	-
11	318,1618	542,9351	668,9821	0,1916	-
12	318,0689	566,9944	724,5005	0,2090	-
13	317,9679	590,0528	779,9637	0,2264	-
14	317,8588	612,2217	835,3676	0,2437	-
15	317,7417	633,5929	890,7078	0,2610	-
16	317,6166	654,2431	945,9802	0,2783	-
17	317,4834	674,2369	1001,1805	0,2956	-
18	317,3422	693,6297	1056,3046	0,3128	-
19	317,1929	712,4692	55,8498	0,3300	-

Табела 4.8. Зависност ударне брзине од динамичког угла  $\beta$  за Демекс

Угао судара	Максимална доња граница ударне брзине	Максимална ударна брзина	Ударна брзина	Однос брзина	Усвојена ударна брзина
$\beta, ^\circ$	$V_p, \text{ m/s}$	$V_{pmax}, \text{ m/s}$	$V_p, \text{ m/s}$	$V_p/V_d$	$V_p, \text{ m/s}$
0	-	-	0	0	-
1	326,1306	157,7505	45,3780	0,0175	-
2	326,1182	223,0886	90,7525	0,0349	-
3	326,0975	273,2180	136,1201	0,0524	-
4	326,0685	315,4709	181,4774	0,0698	-
5	326,0313	352,6871	226,8208	0,0872	-
6	325,9858	386,3223	272,1470	0,1047	-
7	325,9320	417,2414	317,4524	0,1221	-
8	325,8699	446,0073	362,7337	0,1395	362,7337
9	325,7996	473,0112	407,9873	0,1569	407,9873
10	325,7210	498,5374	453,2099	0,1743	453,2099
11	325,6341	522,8007	498,3979	0,1917	498,3979
12	325,5390	545,9678	543,5480	0,2091	-
13	325,4357	568,1711	588,6567	0,2264	-
14	325,3241	589,5179	633,7206	0,2437	-
15	325,2042	610,0966	678,7362	0,2611	-
16	325,0761	629,9809	723,7001	0,2783	-
17	324,9398	649,2333	768,6089	0,2956	-
18	324,7953	667,9070	813,4592	0,3129	-
19	324,6425	686,0478	858,2476	0,3301	-

Табела 4.9. Димензионе карактеристике у функцији динамичког угла  $\beta$  за Амонекс

Угао судара	Однос масе експлозива и плоче	Дебљина експлозива	Количина експлозива по пуњењу	Размак између плоча (мин)	Таласна дужина зава	Амплитуда зава
$\beta, ^\circ$	$e/m$	$L, \text{mm}$	$m, \text{g}$	$h, \text{mm}$	$\lambda, \text{mm}$	$A, \text{mm}$
0	0	0	0	0	0	0
1	0,0655	3,0675	41,2069	1,1494	0,0064	0,0013
2	0,1355	6,3427	84,9190	1,7323	0,0256	0,0051
3	0,2104	9,8470	131,3417	2,3512	0,0576	0,0115
4	0,2907	13,6051	180,7407	3,0099	0,1023	0,0205
5	0,3770	17,6453	233,4076	3,7121	0,1598	0,0320
6	0,4701	22,0002	289,6732	4,4623	0,2301	0,0460
7	0,5707	26,7077	349,9148	5,2655	0,3131	0,0626
8	0,6797	31,8120	414,5641	6,1275	0,4087	0,0817
9	0,7984	37,3651	484,1177	7,0549	0,5171	0,1034
10	0,9280	43,4284	559,1495	8,0553	0,6381	0,1276
11	1,0700	50,0751	640,3270	9,1377	0,7717	0,1543
12	1,2263	57,3929	728,4303	10,3124	0,9178	0,1836
13	1,3993	65,4885	824,3774	11,5917	1,0765	0,2153
14	1,5917	74,4917	929,2562	12,9901	1,2476	0,2495
15	1,8069	84,5638	1044,3654	14,5249	1,4311	0,2862
16	2,0493	95,9059	1171,2682	16,2169	1,6270	0,3254
17	2,3242	108,7735	1311,8632	18,0915	1,8352	0,3670
18	2,6388	123,4951	1468,4799	20,1797	2,0556	0,4111
19	3,0022	140,5013	1644,0078	22,5201	2,2882	0,4576



Табела 4.10. Димензионе карактеристике у функцији динамичког угла  $\beta$  за Демекс

Угао судара	Однос масе експлозива и плоче	Дебљина експлозива	Количина експлозива по пуњењу	Размак између плоча (мин)	Таласна дужина завара	Амплитуда завара
$\beta, ^\circ$	$e/m$	$L, \text{ mm}$	$m, \text{ g}$	$h, \text{ mm}$	$\lambda, \text{ mm}$	$A, \text{ mm}$
0	0	0	0	0	0	0
1	0,0655	2,3859	52,2504	1,1772	0,0075	0,0015
2	0,1355	4,9332	108,0372	1,6866	0,0298	0,0060
3	0,2104	7,6588	167,7274	2,2318	0,0672	0,0134
4	0,2907	10,5817	231,7403	2,8163	0,1194	0,0239
5	0,3770	13,7241	300,5579	3,4448	0,1865	0,0373
6	0,4701	17,1112	374,7361	4,1222	0,2684	0,0537
7	0,5707	20,7726	454,9205	4,8545	0,3652	0,0730
8	0,6797	24,7427	541,8643	5,6485	0,4769	0,0954
9	0,7984	29,0617	636,4523	6,5123	0,6033	0,1207
10	0,9280	33,7777	739,7306	7,4555	0,7444	0,1489
11	1,0700	38,9473	852,9454	8,4895	0,9003	0,1801
12	1,2263	44,6390	977,5932	9,6278	1,0708	0,2142
13	1,3993	50,9355	1115,4866	10,8871	1,2559	0,2512
14	1,5917	57,9380	1268,8428	12,2876	1,4555	0,2911
15	1,8069	65,7718	1440,4031	13,8544	1,6696	0,3339
16	2,0493	74,5935	1633,5973	15,6187	1,8982	0,3796
17	2,3242	84,6016	1852,7747	17,6203	2,1411	0,4282
18	2,6388	96,0518	2103,5337	19,9104	2,3982	0,4796
19	3,0022	109,2788	2393,2057	22,5558	2,6696	0,5339

## 4.2. Прорачун критичног растојања у поступку експлозивног заваривања

### Карактеристике експлозива

Анализиран је могући утицај експлозива Демекс (табела 4.15). То је прашкасти експлозив израђен на бази амонијум нитрата (AN) и тротила (TNT).

Демекс је прашкасти експлозив за специјалне намене. То је нискобризантни експлозив који се успешно примењују при спајању и обради метала експлозијом. Може се користити за заваривање, површинску обраду-отврдњавање, спајање метала итд. Користи се и у рударству (Trayal корпорација, 2020).

Не смеју се користити у рудницима где долази до појаве метана и експлозивне угљене прашине. Испоручују се у прашкастом стању. По специјалном захтеву купца, могу се испоручити и патронирани у калибру 28 mm (Trayal корпорација, 2020).

Маса експлозива у појединим експериментима одређена је на основу прорачуна (Ghomi, 2009) и на основу димензија плоче које износе  $200 \times 150$  mm. Маса експлозива у распону од 540-850 g задовољава све критеријуме наведеног прорачуна. Експериментална поставка експлозивног заваривања изведеног на полигону фирме Traual у Крушевцу приказана је на слици 4.3.



Слика 4.3. Експериментална поставка експлозивног заваривања.

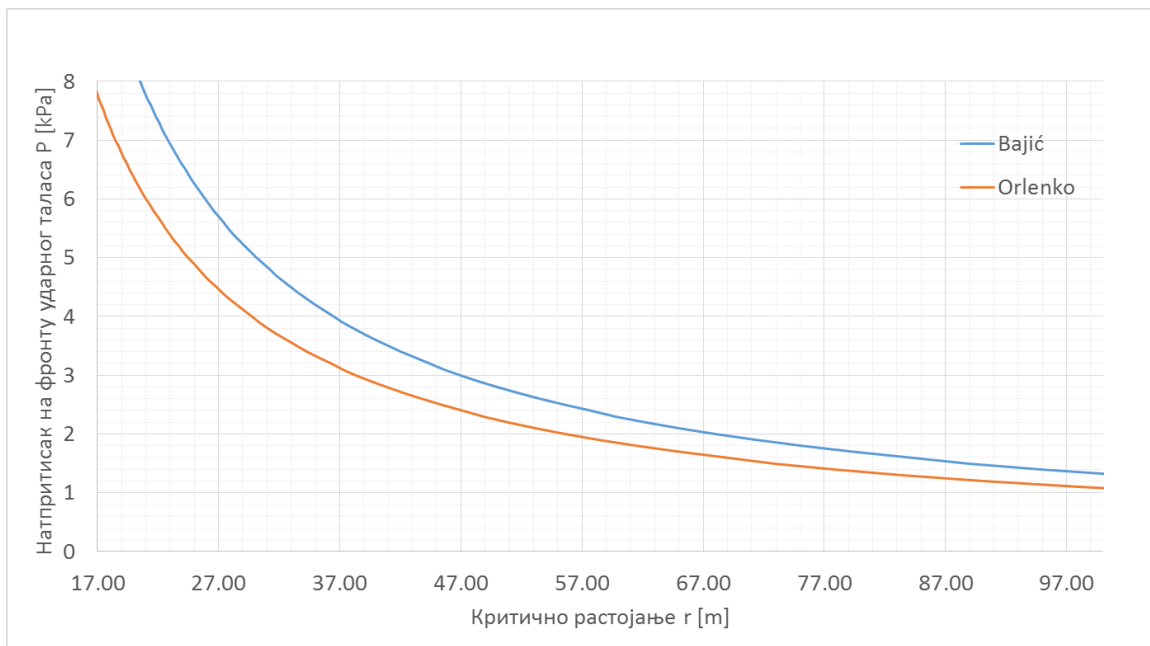
За прорачун критичног растојања експлозивног заваривања, из безбедносних разлога, коришћене су највеће вредности количине Демекса. Прорачунате вредности еквивалентних маса експлозива Демекса у зависности од масе експлозивног пуњења за потребне прорачуна критичног растојања, приказани су у табели 4.11.

Табела 4.11. Маса експлозивног пуњења и еквивалентна маса Демекс експлозива

Врста експлозива	Јединице	Демекс				
		1	2	3	4	5
Број експеримента $N$						
Маса експлозивног пуњења $M_{eksp}$	g	540	540	640	740	850
TNT еквивалент $E_{deksp}/E_{dTNT}$		0,981				
Еквивалентна маса експлозива $M_{TNTe}$	g	530	530	630	725	833
Еквивалентна маса експлозива $m_p$ површинска експлозија	g	795	795	945	1088	1250

## Одређивање критичног растојања експлозије

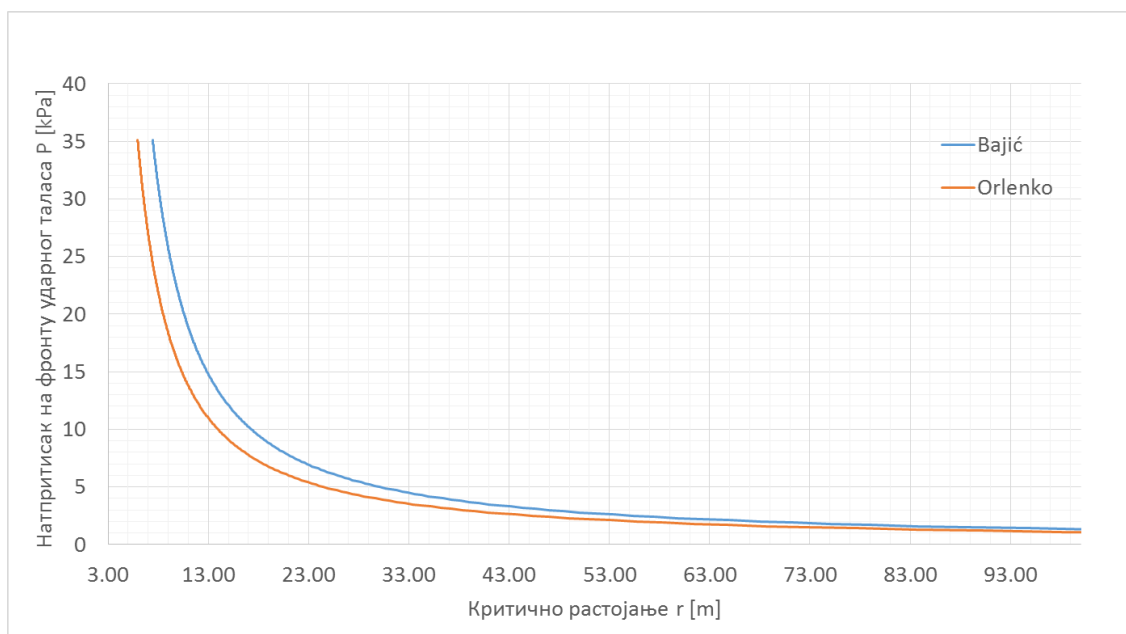
Зависност критичног растојања у функцији притиска за случај привременог губитка слуха у случају највеће количине експлозива (метода Sadovskog) приказана је на слици 4.4.



Слика 4.4. Критично растојање у зависности од притиска (6,9 kPa)

На слици 4.4. усвојени су коефицијенти  $k_1$ ,  $k_2$ , и  $k_3$  према раду (Orlenko, 2004), односно према раду (Бајић, 2009) табела 3.1.

Зависност критичног растојања у функцији притиска за случај пуцања бубне опне у случају највеће количине експлозива (метода Sadovskog) приказана је на слици 4.5.



Слика 4.5. Критично растојање у зависности од притиска (35 kPa)

Параметри Kingery-Bulmash полинома за притисак на челу ударног таласа приказани су у табели 4.12.

Табела 4.12. Параметри Kingery-Bulmash полинома за притисак на челу ударног таласа, (IATG 01.80, 2015).

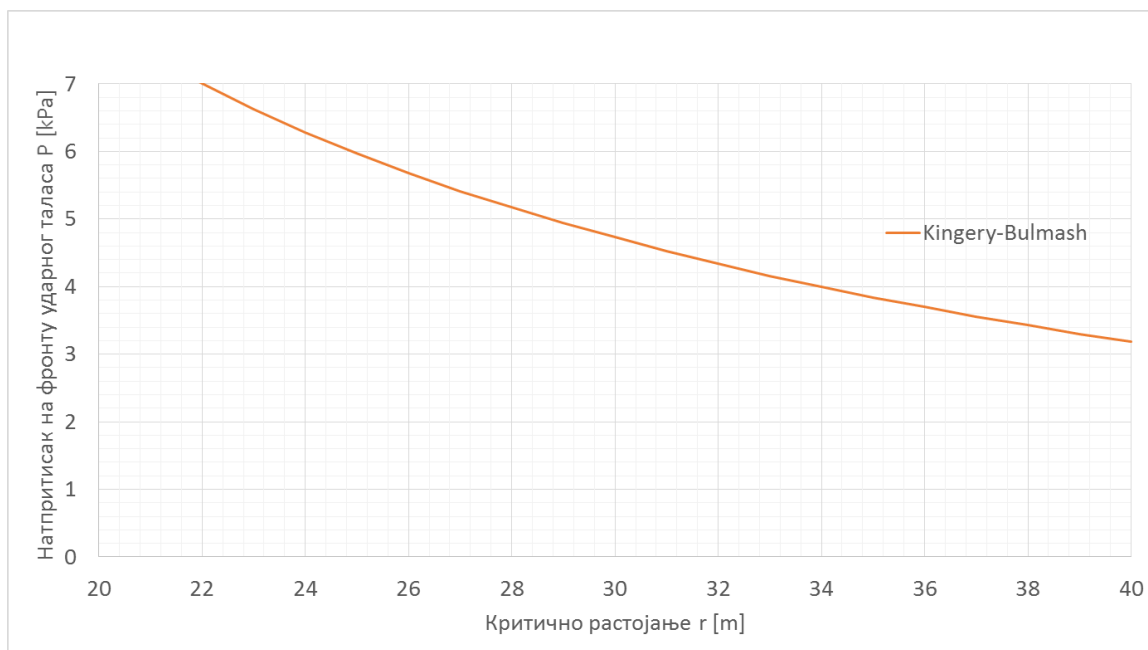
Параметри	Бројчана вредност
$K_0$	-0,14362789151
$K_1$	1,35034249993
$C_1$	2,78076916577
$C_2$	-1,6958988741
$C_3$	0,154159376846
$C_4$	0,514060730593
$C_5$	-0,0988534365274
$C_6$	-0,293912623038
$C_7$	-0,0268112345019
$C_8$	0,109097496421
$C_9$	0,00162846756311

Нумеричке вредности за константе „ $C$ “ и „ $K$ “ су вредности за 1 kg TNT еквивалента. За остале експлозиве захтева се да се прво процени TNT еквивалент.

Многе државе користе правила која се заснивају на експлозивима, њиховој количини и удаљености од експлозива на месту где су људи у ризику. Ова правила су позната као критеријуми количина-удаљеност ( $Q-D$ ), (AASTP-1, 2010) и заснивају се на приступу изведеном из Норкинсон-Сгранз закона о скалирању, који је надаље допуњаван низом коефицијената (једначина 3.7) (IATG 01.80, 2015).

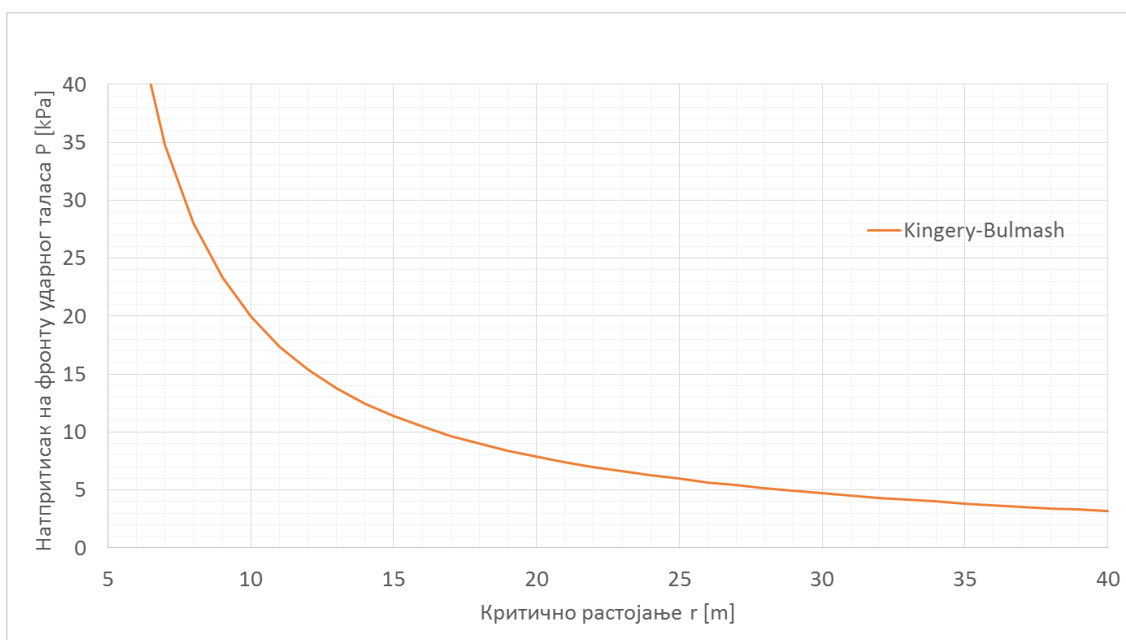
Основа великог дела рада базирана је на процени одговарајућих количина и раздаљине раздвајања.

Зависност критичног растојања у функцији притиска за случај привременог губитка слуха (Kingery-Bulmash метода) приказана је на слици 4.6.



Слика 4.6. Критично растојање у зависности од притиска у случају привременог губитка слуха

Зависност критичног растојања у функцији притиска за случај пуцања бубне опне (Kingery-Bulmash метода) приказана је на слици 4.7.



Слика 4.7. Критично растојање у зависности од притиска у случају пуцања бубне опне  
Одређивање критичног растојања вршено је у два гранична случаја:

- Критично растојање у случају привременог губитка слуха и
- Критично растојање у случају пуцања бубне опне.

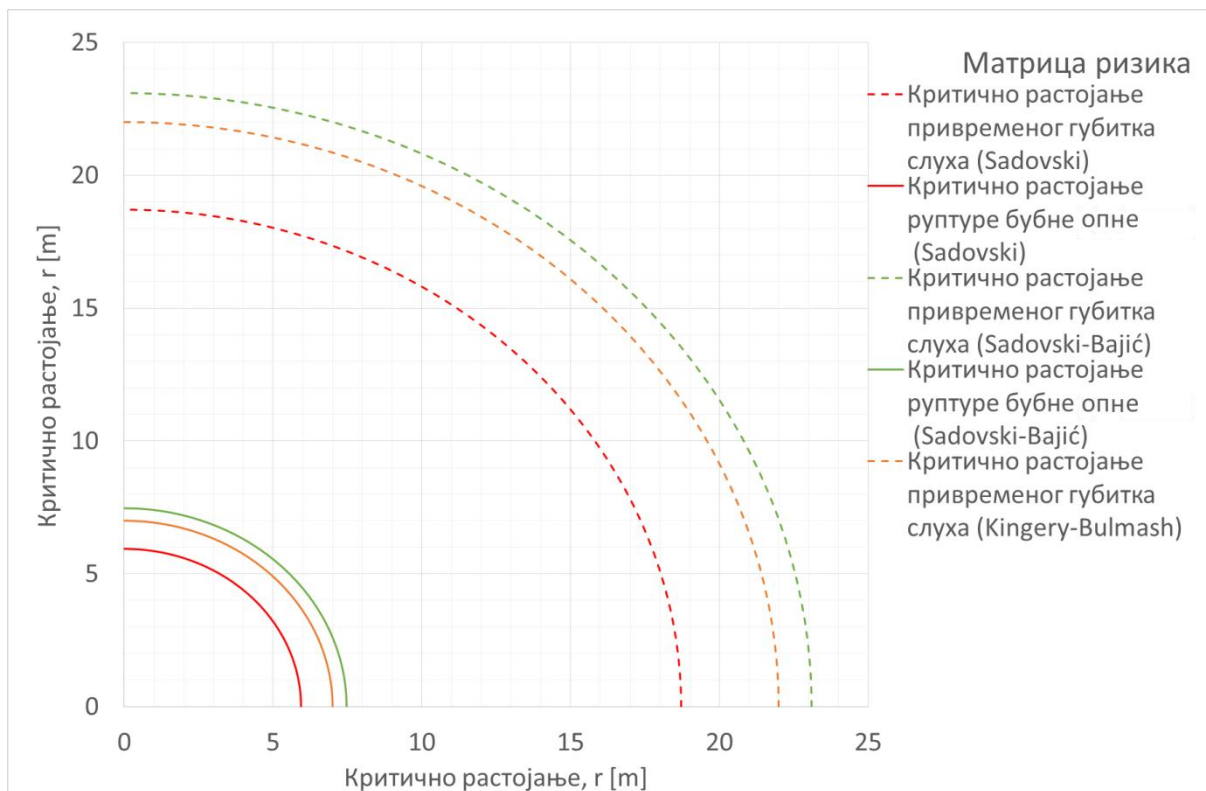
Оба случаја претпостављају да се експлозија при извођењу експлозивног заваривања дешава на средње тврдој земљи (коэффициент  $\eta = 0,5$ , табела 3.2). Уврштавањем

коэффицијената  $k_1$ ,  $k_2$  и  $k_3$  (табела 3.1), еквивалентних маса експлозива добијених једначином (3.1) и граничног притиска у случају привременог губитка слуха од 6,9 kPa односно 35 kPa у случају пуцања бубне опне у једначину (3.2), добија се критично растојање код површинске експлозије.

Имајући у виду наведене резултате формирана је матрица ризика. Матрица ризика је приказана на слици 4.8. Усвојене су максималне вредности критичног растојања. Критично растојање добијено методом Sadovskog, у случају највеће еквивалентне масе експлозива Демекс, за случај привременог губитка слуха износи 23,10 m односно 18,73 m, док критично растојање у случају највеће еквивалентне масе експлозива Демекс, за случај пуцања бубне опне износи 7,47 m, односно 5,94 m.

Критично растојање добијено Kingery-Bulmash методом, у случају највеће еквивалентне масе експлозива Демекс, за случај привременог губитка слуха износи 22,00 m, док критично растојање у случају највеће еквивалентне масе експлозива Демекс, за случај пуцања бубне опне износи 7,00 m.

Прорачун критичног растојања у случају коришћења Амонекса, као експлозивну материју није рађен. Употребљена је мања количина експлозива те су и критична растојања мања.



Слика 4.8. Матрица ризика критичног растојања.

На слици 4.8, наранџасте линије представљају критична растојања добијена Kingery-Bulmash методом. Црвене и зелене линије представљају критична растојања добијена методом Sadovskog са коэффицијентима  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  према раду (Orlenko, 2004) односно према раду (Вајић, 2009), респективно. Пуне линије представљају критична растојања чијим прекорачењем би дошло до пуцања бубне опне, док испрекидане линије представљају критична растојања чијим прекорачењем би дошло до привременог губитка слуха. У зони унутар пуних линија може доћи до озбиљнијих повреда.

У табели 4.13 су приказана критична растојања под условом максималног притиска привременог губитка слуха односно максималног притиска пуцања бубне опне респективно.

Табела 4.13. Табеларни приказ критичног растојања.

Метода испитивања	Јединице	Растојање
Критично растојање $R$ , методом Sadovskog (6,9 kPa) (Orlenko, 2004)	m	18,71
Критично растојање $R$ , методом Sadovskog (6,9 kPa) (Bajić, 2009)	m	23,10
Критично растојање $R$ , Kingery-Bulmash метода (6,9 kPa)	m	22,00
Критично растојање $R$ , методом Sadovskog (35 kPa) (Orlenko, 2004)	m	5,94
Критично растојање $R$ , методом Sadovskog (35 kPa) (Bajić, 2009)	m	7,47
Критично растојање $R$ , Kingery-Bulmash метода (35 kPa)	m	7,00

### 4.3. Услови експерименталних испитивања

Насипна (гравиметријска) густина дефинише се као густина која се постиже при слободном паду експлозива, односно насипању у одређени суд само под дејством силе гравитације, без икаквог додатног сабијања. Изражава се у јединици масе по јединици запремине, kg/l или g/dm<sup>3</sup>. Зависи од величине и облика кристала – гранулометријског састава, висине са које експлозив пада, садржаја воде итд. (Савић, 2000).

Амонекс припада појачаним прашкастим експлозивима израђеним на бази *TNT*-а и амонијум нитрата. Овакви експлозиви мало су осетљиви на удар и трења, због чега спадају у експлозиве сигурне за руковање и транспорт а такође су и нешкодљиви за околину. При ниским температурама нису осетљиви и не мрзну се. Примењују се, пре свега за масовна рударска мињања у подземној и површинској експлоатацији, за мињање од меких до јако чврстих стенских маса, где нису присутни метан и експлозивна угљена прашина. Иницирају се класичним средствима за иницирање: рударском капислом, електродетонаторима, неелектричним системом иницирања и детонирајућим штапином. Због своје слабе водоотпорности користе се за мињања у сувим и влажним минским бушотинама, а нису погодни за мињање у бушотинама у којима има воде (Trauyl corporation, 2022).

Насипна густина експлозива одређена је на следећи начин. Коришћени прибор сачињавали су: постоље, месингана посуда, запремине 100 cm<sup>3</sup> и одређене масе у празном стању, пластични левак и месингана шпакла. Прашкасти експлозив се насипао слободним падом кроз левак у припремљену посуду дефинисаних карактеристика, без сабијања, притискања или било каквих вибрација да се на тај начин не би утицало на његово паковање. Потом се левак уклонио и месинганом шпаклом се експлозив поравнао са врхом посуде. Измерена је укупна маса посуде. Маса насутог експлозива израчуната је посредно, тј. када се од укупно измерене масе одузела вредност масе празне посуде.

На слици 4.9 приказани су сегменти поступака припреме и мерења насипне густине експлозива.



Слика 4.9. Поступак за мерење запреминске густине експлозивног материјала

У табели 4.14 приказани су резултати одређивања насипне густине прашкастог експлозива добијени као средња вредност три мерења.

Табела 4.14. Насипна густина Демекс и Амонекс експлозива

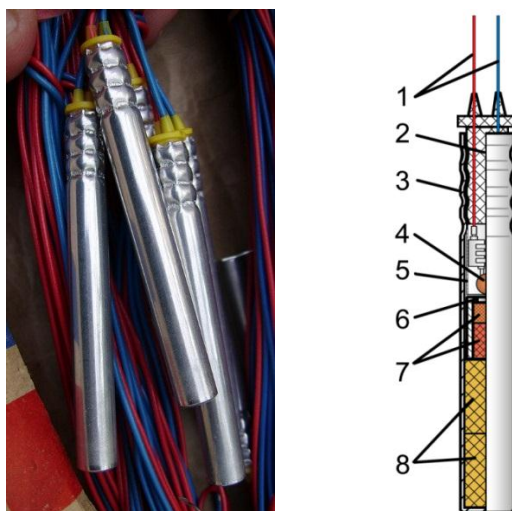
Узорак	Врста експлозива	Измерена вредност насипне густине ( $\text{g}/100 \text{ cm}^3$ )	Просечна вредност насипне густине ( $\text{g}/\text{dm}^3$ )	Стандардна девијација ( $\text{g}/\text{dm}^3$ )	Маргина грешке (интервал поверења)
1	Демекс	561,34	561,0	0,723	0,443
2		560,28			
3		561,4			
1	Амонекс	76,68	761,8	0,633	0,365
2		76,58			
3		75,29			

Може се закључити да је Демекс уједначеног квалитета односно гранулације, с обзиром да су остварени резултати сва три мерења слични. Одступање износи око  $0,723 \text{ g}/\text{dm}^3$ . Амонекс је такође уједначеног квалитета односно гранулације. Одступање Амонекса износи око  $0,633 \text{ g}/\text{dm}^3$ .

Електродетонаторска каписла *ЕК-40-69*.

Електродетонаторска каписла *ЕК-40-69* (слика 4.10.) се примењује за рушење појединачним или групним активирањем експлозивних пуњења. Активирање каписле врши се електричним путем (Богданов, 2015). Извор електричне енергије може бити уређај за електрично активирање, акумулатор, батерија, градска електрична мрежа или неки други извор електричне енергије (МСМ, 2023). Активирање електричним путем је безбедније и поузданије у односу на КД-8.





Слика 4.10. Спољни изглед снопа електродетонаторских каписли (лево) и изглед попречног пресека електродетонаторске каписле ЕК-40-69 (десно):

1 – електрични проводници; 2 – заптивач; 3 – тело каписле; 4 – електрична запаљива главица; 5 – навлака; 6 – покривка; 7 – иницијално (примарно) експлозивно пуњење; 8 – бризантно (секундарно) експлозивно пуњење (Богданов, 2016), (Богданов, 2015).

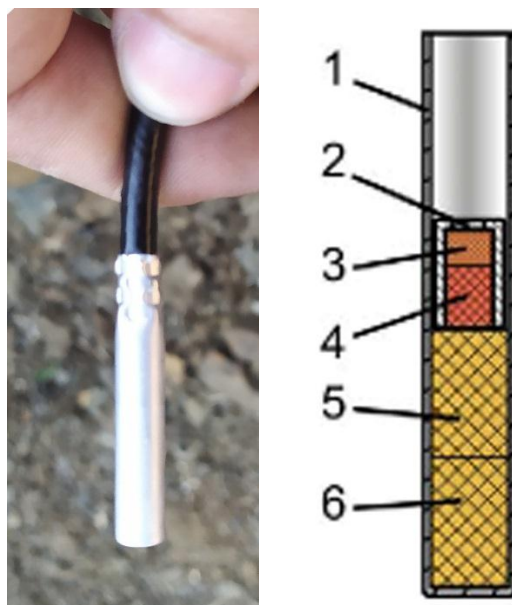
Кроз заптивач пролазе електрични проводници. Херметичност, чврстину електричне запаљиве главице и заштиту од влаге унутрашњег склопа обезбеђује заптивач. Тело каписле је од алуминијума. Заптивач и навлака израђени су од *PVC* (Богданов, 2016).

Запаљива главица састоји се од ножица, држача ножица, изолатора, мостића и запаљиве пиротехничке смеше. Запаљива главица се налази у изолационој навлаци, која спречава кратак спој. Запаљива смеша је израђена од калијум-хлората, цирконијума и дрвеног угља, премазана лаком. За ножице запаљиве главице су залемљена два бакарна проводника, дужине 2 m и пречника 0.6 mm, око које је постављена *PVC* изолација (Богданов, 2015). Због сигурности при повезивању проводника у електрично коло, изолација жица је у различитим бојама (Богданов, 2016).

Изглед детонаторске азидне каписле број 8 приказан је на слици 4.11.

Иницијално (примарно) експлозивно пуњење састоји се од олово азида, пресвучен слојем олово тринитрорезорцината, укупне масе око 0,5 g (Богданов, 2015).

Бризантно (секундарно) експлозивно пуњење је смештено испод иницијалног. Израђено је од тротила, флегматизованог хексогена или пентрита, тетрила и сл., укупне масе око 0,8 g. Изнад иницијалног пуњења је чврсто упресована покривка са централним отвором, која штити експлозивно пуњење од растресања (Богданов, 2015).



Слика 4.11. Спољни изглед (лево) и изглед уздужног пресека детонаторске каписле број 8:1 – тело (чаура); 2 – покривка; 3 – иницијално (примарно) експлозивно пуњење (ЕП) од олово тринитрорезорцината; 4 – иницијално (примарно) од олово азида; 5 и 6 – бризантно (секундарно) ЕП (Богданов, 2015).

#### 4.3.1. Експеримент 1 - Прелиминарна испитивања заваривања опружног и конструктивног челика

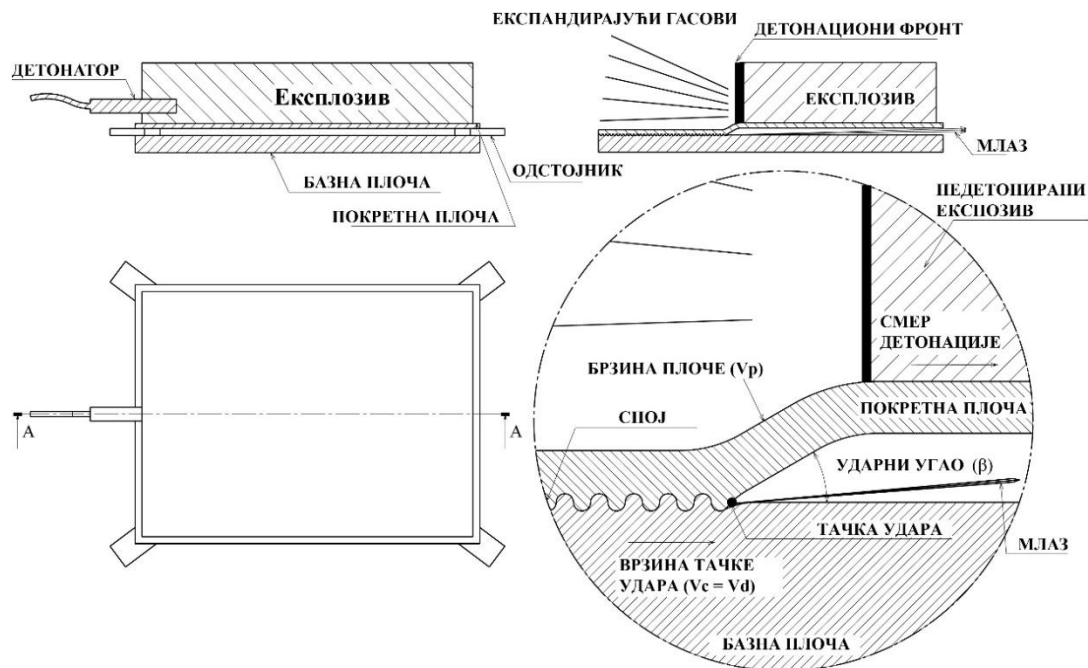
Да би се уштедео број плоча алатног челика и смањили трошкови извођења експеримената урађени су прелиминарни експерименти заваривања опружног уместо алатног челика. Опружни челик у таблама малих дебљина је лако доступан. Прелиминарни резултати су допринели бољем разумевању процеса експлозивног заваривања. На основу стеченог искуства, урађен је главни експеримент, односно извршено је експлозивно заваривање алатног и конструкционог челика (тачка 4.3.2).

Заваривање експлозијом у оквиру првог експеримента, изведено је на полигону „Техничког ремонтног завода“ у Крагујевцу. Извођење експеримента изведено је на основу паралелне поставке експлозивног заваривања која је детаљније описана у тачки 2.2 ове дисертације.

За успешно извођење експеримента припремљена је неопходна опрема:

- |  |        |
|--|--------|
| - Привредни експлозив Амонекс                        | 5 kg   |
| - Детонаторска каписла (КД-8)                        | 5 ком. |
| - Минерски кабл                                      | 100 m  |
| - Плоча (опружни челик) димензије 200×150×3mm        | 4 ком. |
| - Плоча (конструкциони челик) димензије 200×150×10mm | 4 ком. |
| - Дрвени рам 200×150 mmи подметачи                   | 4 ком. |
| - Вага   | 1 ком. |
| - Бушилица   | 1 ком. |
| - Бургије  | 1 ком. |
| - Креп трака   | 1 ком. |

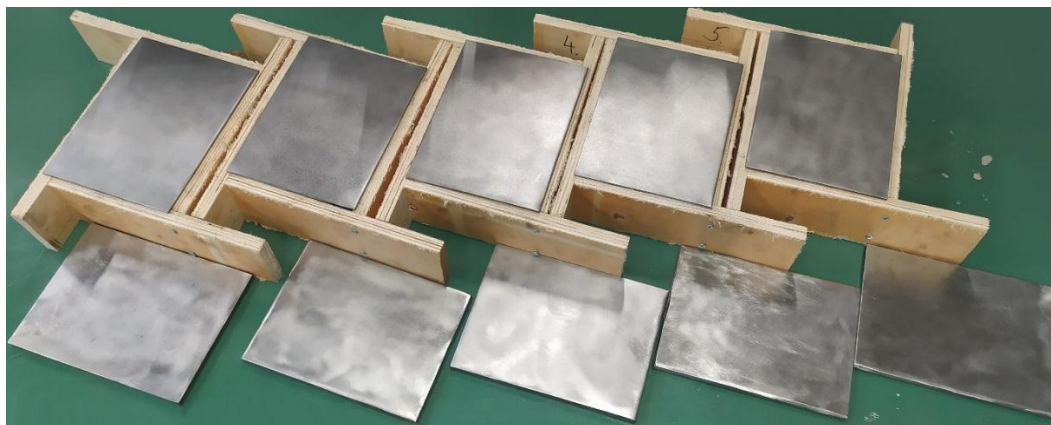
Попречни пресек експерименталне поставке је приказан на слици 4.12.



Слика 4.12. Експериментална поставка експлозивног заваривања, паралелна конфигурација. а) експериментална поставка, б) експериментална поставка у време експлозије, ц) увећани приказ (Olson, 1993).

Пре самог експлозивног заваривања извршена је провера иницирања експлозива. Иницирањем је извршено са најмањом количином експлозива од 230 g (табела 4.15) без постављених плоча. Установљено је да није дошло до гашења детонационог таласа.

За испитивања су коришћене плоче димензија  $200 \times 150$  mm од две врсте челика: *51CrV4* дебљине 3 mm и *S355J2* дебљине 10 mm. Све челичне плоче су очишћене и одмашћене. Кутијасте елементи израђени су од дрвета, тј. *ОСБ* табле. Димензије дрвених плоча су  $250 \times 80 \times 18$  mm. Кутија је израђена тако да су њене унутрашње димензије странаца за четири милиметра мање од странаца металне плоче. Намењене су да онемогуће расипање прашкастог експлозива код припреме експеримента. На унутрашњим странама сваке кутије нацртаном линијом је означена висина до које је требало насути експлозив. Такође, на одређеним препустима уписан је и редни број активирања. Изглед припремљених челичних плоча и дрвених кутија приказан је на слици 4.13.



Слика 4.13. Металне плоче и кутије за заваривање експлозијом.

За експериментално заваривање два челика *51CrV4* и *S355J2* растојање између плоча је износило тачно 4 mm, због могућности појаве прелина. Растојање између плоча остварено је дистанцерима од *PMMA* – Полиметилметакрилат који су постављени испод сваког угла горње плоче. Експеримент је реализован на земљаној подлози. Активирање прашкастог експлозива извршено је са детонаторском капислом ознаке *КД-8*. Дужина спорогорећег штапина износила је 1,5 m, а планирано време његовог сагоревања било је три минута и десет секунди.

Према теоријским разматрањима (поглавље 2), израчуната је маса експлозива која је задовољавала критеријуме квалитетног завареног споја. Да би се потврдили теоријски резултати извршена су још два додатна активирања која су делимично задовољила критеријуме експлозивног заваривања (број детонације 1 и 5). Укупно је урађено пет експеримената – активирања. Параметри експеримента су приказани у табели 4.15.

Табела 4.15. Маса експлозива Амонекс.

	Врста експлозива Амонекс				
Брзина детонације експлозива (Теоријска/Експериментална)	3200,0 m/s / 3769,8 m/s				
Број детонације	1	2	3	4	5
Маса експлозивног пуњења	230 g	290 g	350 g	415 g	485 g
Угао судара, $\beta$	5°	6°	7°	8°	9°

На слици 4.14. (лево) приказане су челичне плоче (од броја 1 до броја 5) добијене експлозивним заваривањем, као и плоча 6 спој алуминијума и челика (допунски експеримент који није разматран у овој дисертацији). На слици 4.14. (десно) приказана је деформисана плоча 5 услед дејства експлозије.



Слика 4.14. Плоче добијене експлозивним заваривањем Опружни/Конструкциони челик.

Визуелним прегледом уочено је, да на рубним деловима свих плоча, није дошло до спајања материјала. Нарочито није дошло до спајања на местима где су се налазили дистанцери. На слици 4.14 (десно) на растојању 5 mm од ивице плоче види се отисак продуката детонације.

### 4.3.2. Експеримент 2 - Заваривање алатног и конструктивног челика

На основу стеченог искуства у процесу заваривања опружног челика, урађен је главни експеримент, односно извршено је експлозивно заваривање алатног и конструкционог челика.

Заваривање експлозијом у оквиру другог експеримента, изведено је на полигону компаније „Trayal“ у Крушевцу. Извођење експеримента изведено је на основу паралелне поставке експлозивног заваривања која је детаљније описана у тачки 2.2.

За успешно извођење експеримента припремљена је неопходна опрема:

- Модификовани привредни експлозив Демекс	5 kg
- Електродетонаторска каписла(ЕК-40-69)	5ком.
- Уређај „Tektronix MSO2022B“ и „Pendulum CNT-91“	1 ком.
- Минерски кабл	100 m
- Плоча (алатни челик) димензије 200×150×3 mm	4ком.
- Плоча (конструкциони челик) димензије 200×150×10 mm	4 ком.
- Дрвени рам 200×150 mmи подметачи	4 ком.
- Вага	1 ком.
- Бушилица	1 ком.
- Бургије	1 ком.
- Креп трака	1 ком.

Попречни пресек експерименталне поставке је слична као у претходном експерименту (слика 4.11).

За експлозивно пуњење употребљава се прашкасти експлозив што мање брзине детонације, Демекс декларисане брзине детонације најмање 2600 m/s.

Као и у претходном случају, пре самог експлозивног заваривања извршена је провера иницирања експлозива. Иницирањем је извршено са најмањом количином експлозива од 540 g (табела 4.16) без постављених плоча. Установљено је да није дошло до гашења детонационог таласа.

За испитивања су коришћене плоче димензија 200×150 mm од две врсте челика: алатни челик X155CrVMo12-1 дебљине 3 mm и конструкционог челика S355J2 дебљине 10 mm. Све челичне плоче су очишћене и одмашћене. Изглед припремљених челичних плоча и дрвених кутија приказан је на слици 4.15.



Слика 4.15. Металне плоче и кутије за заваривање експлозијом.

Кутијаста елементи израђени су од дрвета, односно ламината. Димензије ламинатних плоча су  $200 \times 80 \times 6 \text{ mm}$ . Намењене су да онемогуће расипање прашкастог експлозива код припреме експеримента. Израђене су тако да њене унутрашње димензије страница за четири милиметра мање од страница металне плоче.

Након формирања кутије унутрашње странице формирају жлеб дубине 3 mm, тако да метална плоча чврсто упадне у њега. На овај начин спречено је просипање експлозива приликом сипања. Такође, на одређеним препустима избушена је рупа за монтажу електродетонаторске каписле и уписан је редни број активирања. На слици 4.16 приказан је процес монтаже, а) постављање плоча, б) постављање кутије за експлозив.



Слика 4.16. Процес монтаже за извођење експеримента.

За експериментално заваривање два челика (алатни/конструкциони) растојање између плоча је износило тачно 4,5 mm, због могућности појаве прелина. Растојање између плоча остварено је дистанцерима од пресованог дрвета који су постављени испод сваког угла горње плоче. Експеримент је реализован на тврдо утабаној пешчаној подлози. Активирање прашкастог експлозива извршено је са електродетонаторском капислом ознаке „ЕК-40-69“.

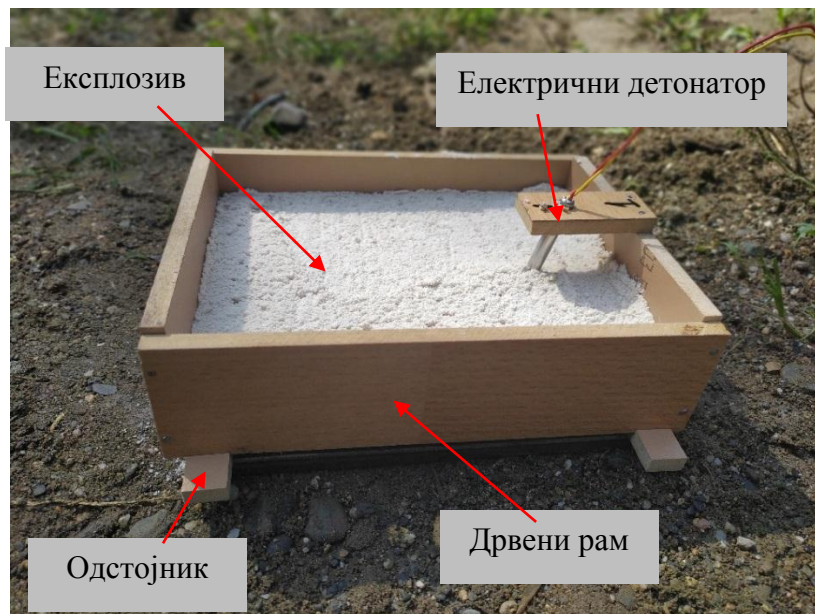
Према теоријским разматрањима (поглавље 2), израчуната је маса експлозива која је задовољавала критеријуме квалитетног завареног споја. Укупно је урађено четири експеримената – активирања.

Прво активирање је било пробно, са најмањом количином експлозива, без плоча, у сврху провере експлозива и опреме. Параметри експеримента су приказани у табели 4.16.

Табела 4.16. Маса експлозива Демекса.

	Тип експлозива Демекс				
Брзина детонације експлозива (Експериментална)	2600 m/s				
Број детонације	1	2	3	4	5
Маса експлозивног пуњења	540 g	540 g	640 g	740 g	850 g
Угао удара, $\beta$	-	8°	9°	10°	11°

На слици 4.17 је приказана финална поставка пред активирање.



Слика 4.17. Финална поставка пред активирање.

На слици 4.18 приказане су челичне плоче (од броја 1 до броја 4) добијене експлозивним заваривањем.



Слика 4.18. Плоче добијене експлозивним заваривањем алатни/конструкциони челик.

Визуелним прегледом уочено је, да на рубним деловима свих плоча, није дошло до спајања материјала. Нарочито није дошло до спајања на местима где су се налазили дистанцери.



## 5. МЕТОДЕ ИСПИТИВАЊА И МЕРНА ОПРЕМА

У оквиру овог поглавља приказана је коришћена мерна опрема за карактеризацију испитиваних експлозивно заварених материјала. Најпре су урађена прелиминарна испитивања хемијског састава добијених плоча методом оптичке емисионе спектрометрије. За извођење експеримента заваривања неопходно је дефинисати почетне параметре. Плоче су подвргнуте грубим и финим брушењем на машини за полирање у циљу добијања неопходних информација параметара храпавости. Мерном вагом измерена је количина експлозива за сваки експеримент посебно, док су параметри експлозива одређивани путем савремене мерне опреме.

Након заваривања плоче су подвргнуте испитивању најпре методама без разарања, првенствено површинским методама као што су визуелна метода и метода испитивања течним пенетрантима, а затим и запреминским методама као што су испитивање ултразвуком и рендгенографска испитивања.

Даља испитивања обухватају сечење (са предмером) добијених плоча абразивним воденим млазом на димензије прописане стандардом за испитивање ударне жилавости. Добијени су узорци и за испитивање споја равним секачем. Затим су следили поступци брушења и полирања на машини за полирање у циљу добијања узорака одговарајућег квалитета површине за испитивање тврдоће, металографска, пенетрантска и кавитациона испитивања споја. Аналитичким вагама је одређивана количина материјала која је уклоњена са површине узорка ерозивним дејством. Анализа споја захтевала је коришћење оптичких микроскопа, док је за прецизно одређивање споја неопходна анализа на скенирајућем оптичком микроскопу.

### 5.1. Метода одређивања брзине детонације

Као што је претходно објашњено, познавање параметара заваривања  $V_d$ ,  $V_c$ ,  $V_p$  и  $\beta$  је неопходно за претходне прорачуне везане за припрему и извођење заваривања експлозијом. Ти параметри се могу претпоставити са задовољавајућом тачношћу за практичну употребу одговарајућим теоријским и емпиријским подацима, али тамо где су услови критични и када плоча још увек значајно убрзава у тренутку пре удара, пожељно је више прецизних параметара.

Један од важних улазних параметара у процесу експлозивног заваривања представља брзина детонације експлозива. Такође, мерење брзине детонације експлозива омогућава процену ефикасности и одређивање уједначености квалитета коришћеног експлозива, који је неопходан за експлозивно заваривање већих размера.

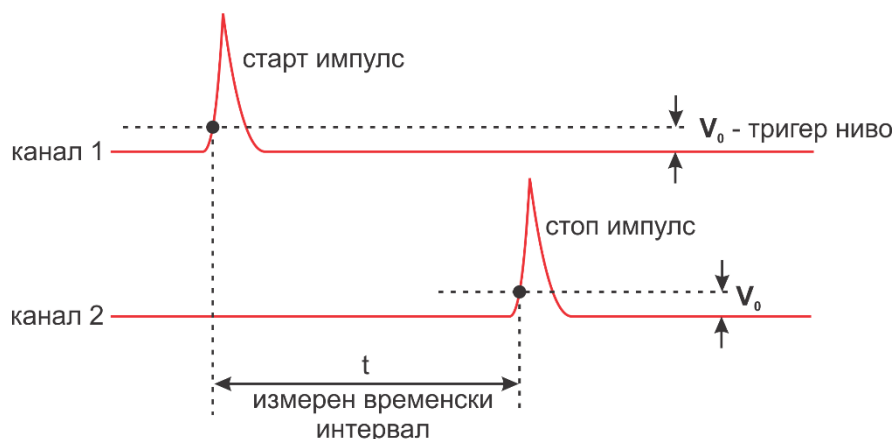
Раније коришћен систем мерења уз помоћ електроконтактних сонди, замењен је једноставнијим, практичнијим и пре свега безбеднијим системом оптичких сонди. Примена оптичких сонди има ту предност што су галвански изоловане од електричне мреже, поузданије у односу на електричне сонде, време одзива мерења је практично елиминисано, мерење брзине детонације прецизније и време припреме, односно постављање сонди је краће.

Након сваког мерења део оптичког влакна који је искидан или оштећен се исече под правим углом. Крај оптичког влакна је пожељно исполирати али није неопходно. Тако припремљен крај се поставља у предвиђену рупу у експлозиву и поставка је спремна за следеће мерење. Поступак мерења је тиме знатно поједностављен и убрзан у односу на електричне сонде и омогућава континуитет мерења нарочито када на терену временски услови нису најприкладнији.

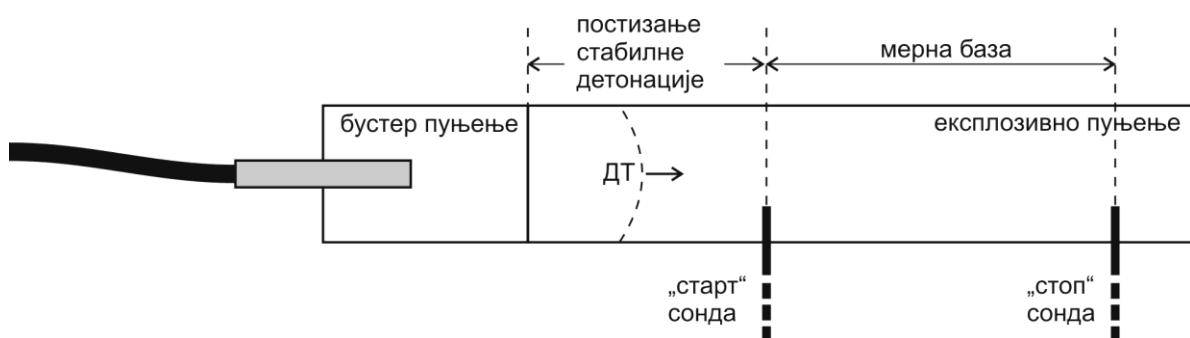
Вишеканално мерење брзине детонације уз помоћ електричних или оптичких сонди је идентично. Сонда у зависности да ли је оптичка или електрична региструје светлосни или електрични сигнал у тренутку наилаaska детонационог таласа на тачно дефинисаној позицији. Тачна позиција сонди и време које протекне између детекције сонди одређује вредност брзине детонације.

Сваки уређај за детекцију електричног сигнала има одређени број аналогних и дигиталних улаза (канала). Оптичка или електрична сонда, представља један канал. За једно мерење брзине неопходна су минимум два канала. У случају када је потребно одређивање просторног простирања детонационог таласа неопходно је коришћење већег броја сонди.

За једноставније одређивање брзине детонације користи се поставка са две сонде, „Start“ и „Stop“ сонда. Као што је претходно напоменуто познавање међусобног растојања сонди и протеклог времена омогућава директан прорачун брзине. Принцип одређивања брзине детонације приказан је на слици 5.1 и слици 5.2. Ниво окидања  $V_0$  је карактеристика коришћених електронских компоненти која најчешће износи 0,7 V.



Слика 5.1. Принцип одређивања брзине детонације (VTI, 2023).



Слика 5.2. Скица узорка за мерење брзине детонације (VTI, 2023) (Анђелић, 2018).

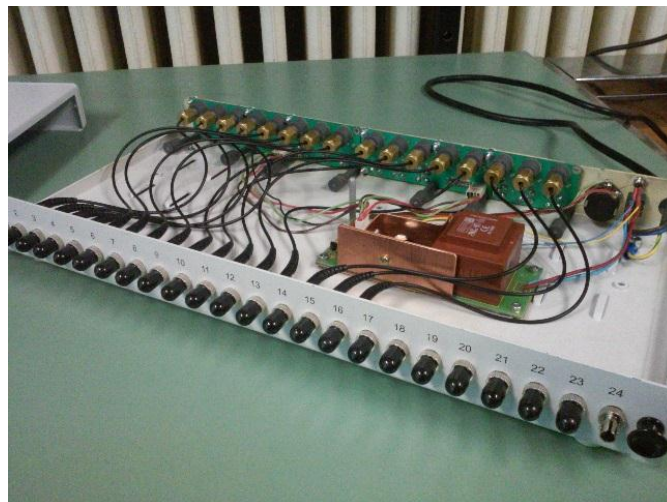
Ради провере опреме, коришћена су два система за регистровање сигнала са фотодетектора:

- „Tektronix Digital Mix Oscilloscope MSO2022B“, „mix“ осцилоскоп са два аналогна и шеснаест дигиталних канала, фреквентног опсега од 0 Hz до 200 MHz,
- „Pendulum CNT-91 Timer/Counter/Analyzer“, двоканални електронски бројач за „Start“ и „Stop“ сонду, резолуције 50 ps.

Детонациони талас је праћен појавом наглог повећања притиска, температуре и веома интензивне светлости. При наиласку детонационог таласа на оптичку сонду, она проводи светлост дуж оптичког влакна. Други крај влакна је повезан на шеснаестоканални фотодетектор који конвертује оптички сигнал у електрични. Излаз електричног сигнала је у виду BNC конектора. Коаксијалним каблом је могуће повезати BNC конектор са уређајем за детекцију сигнала. Облик добијеног електричног сигнала на осцилоскопу директно је пропорционалан интензитету генерисане светлости при активирању експлозива (VTI, 2023).

Војнотехнички институт је развио фотодетектор са шеснаест канала веома брзог одзива од 2 ns (VTI, 2023). Све канале могуће је тренутно детектовати на „Tektronix Digital Mix Oscilloscope MSO2022B“ осцилоскопу. Аналогни улазиса предње стране осцилоскопа, могу послужити за праћење зависности интензитета светлости детонационог таласа у времену.

Сваки од канала фотодетектора има свој потенциометар за подешавање прага окидања (Triggering). Поседује изводе за дигиталне канале „микс“ осцилоскопа, а дванаест канала има додатан извод у виду BNC конектора за повезивање са аналогним каналима (VTI, 2023). Фотодетектор са шеснаест независних канала је приказан на слици 5.3.



Слика 5.3. Фотодетектор са шеснаест независних канала

„Pendulum CNT-91 Timer/Counter/Analyzer“ се користи за једноставно једнодимензионо одређивање брзине детонације где су довољна два канала. На слици 5.4 је приказана коришћена мерна опрема.

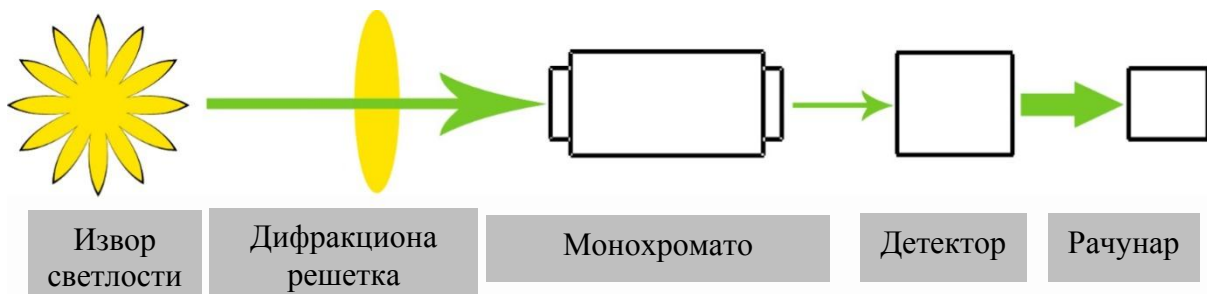


Слика 5.4. Изглед уређаја „Tektronix MSO2022B“ (лево), „Pendulum CNT-91“ десно

## 5.2. Оптичка емисиона спектрометрија

Модерне аналитичке методе заснивају се на квантним особинама материје, које су откривене почетком 20 века. Сваки од атома у природи као квантни систем располаже низом својих енергетских стања и она су својствена само датом атому. Као што је то било познато још током заснивања Боровог модела атома, ова стања су могућа да се виде само на основу емисије или апсорпције електромагнетног зрачења током преласка са једног енергетског нивоа на други. Обе ове појаве, емисија светлости или апсорпција светлости, атомом као сложеним квантомеханичким системом, су основа поделе спектроскопије на емисионе и апсорпционе методе. Емисионе користе атом као извор електромагнетног зрачења приликом преласка са виших енергетских стања на нижа, док апсорпционе обрнуто, апсорбују електромагнетна зрачења приликом промене енергетског стања атома преласком, обично валентних електрона са нижег енергетског стања на више.

Овакви ефекти се манифестују уским линијама апсорпције или емисије електромагнетног зрачења, линијским спектром емисије или апсорпције светлости. Број, интензитет и особине апсорпционих или емисионих линија у спектру датог елемента је познат као резултат многих истраживања и прикупљања података из разних лабораторија целог света. Подаци о спектрима и енергетској структури атома и јона су јавно доступни, рецимо најпознатија база података је налази у „Националном Институту за Стандарде САД“ (NIST) (NIST, 2023). Концепт оптичке емисионе спектроскопије је дат на слици 5.5.



Слика 5.5. Основни концепт оптичке емисионе спектроскопије (Dojčinović, 2023).

Овде се извор светлости користи да би се у њему атоми узорка побудили и постали емитери електромагнетног зрачења, улазна оптика прилагођава оптичке карактеристике монохроматора, тако да се највећи део зрачења доведе у монохроматор и тиме добије

што јачи излазни сигнал. Сигнал на излазу монохроматора долази на детектор и потом се бележи на пратећем софтверу на рачунару.

Обзиром да је број спектралних линија гвожђа веома велики, само за атом гвожђа износи неколико хиљада јаких, видљивих линија анализа спектра елемената који се налазе као додатци гвожђу се препушта експертским системима, уређајима који на бази опсежне базе података могу да идентификују присуство и концентрацију оваквих елемената.

### 5.3. Испитивање топографије површине

Микрогеометрија површине плоча представља значајну карактеристику у процесу експлозивног заваривања. Овај значај проистиче из чињенице да стање микрогеометрије утиче на формирање таласастог споја две плоче. Као што је напоменуто у наставку поглавља, ако је величина таласа мала у поређењу са површинском храпавошћу, немогуће је развити стални таласни облик, и дистрибуција количине топлоте ће бити непредвидљива.

У оквиру испитивања микрогеометрије плоча коришћен је мерни уређај „ISR-C002“ (слика 5.6.), који омогућава дефинисање стања контактне површине.

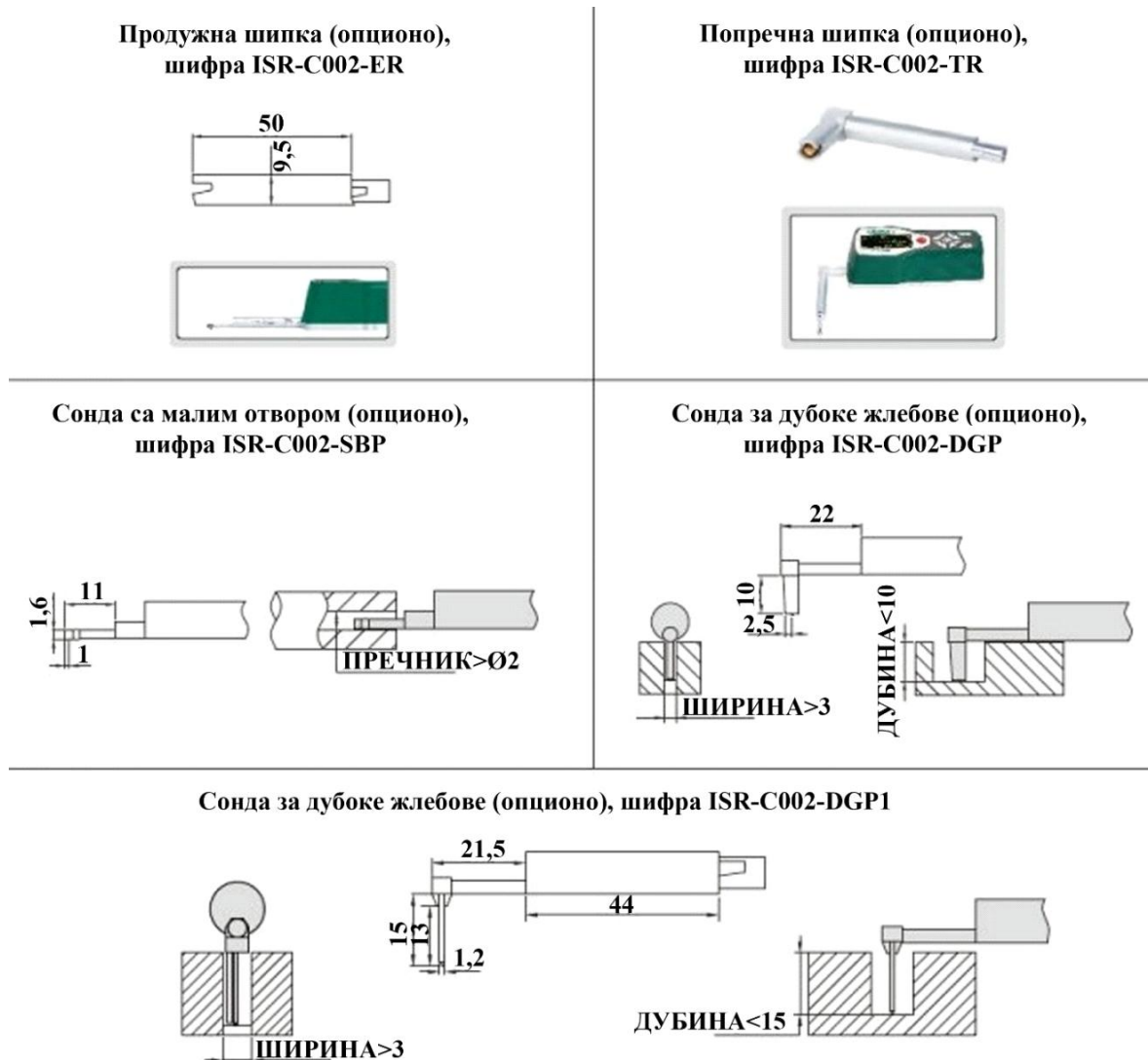


Слика 5.6. Уређај „ISR-C002“ за мерење храпавости површина.

Мерење основних и допунских параметара површина се остварује путем контакта, односно хоризонталним кретањем врха мерне игле по површини материјала чији се

профил одређује. Неопходно је да је врх игле је у сталном контакту са површином, што омогућавају два завртња на самом уређају, стварајући неопходну силу којом мерна игла делује на испитивану површину. Максималан хоризонталан ход мерне игле уређаја је 40 mm, радијус врха мерне игле 2  $\mu\text{m}$  (ISR-C002 Insize, 2023). Основне димензије различитих типова мерних игли дати су на слици 5.7.

Уређај има могућност уснимавања добијених резултата на рачунар, који се након тога могу обрађивати и анализирати у неком од софтвера за статистичку обраду података. На основу основних болдираних параметара који су приказани у табели 5.1. може се конструисати профил храпавости испитиване површине.



Слика 5.7. Изглед и димензије стандардне мерне игле у милиметрима (Insize, 2023).

Коришћењем мерног система „ISR-C002“ добијена је информација о почетној микрогеометрији контактних површина испитиваних плоча пре извршеног експеримента експлозивног заваривања. Микрогеометрија контактних површина испитиваних плоча представљена је преко параметара храпавости приказани у табели 5.1.

Поред основних параметара ( $R_a$ ,  $R_z$  и  $R_t$  приказани у табели 5.1) могуће је добити и допунске параметре храпавости, међу којима је једна од битнијих такозвана крива

ношења профила. На основу криве ношења профила може се добити потпунија слика о распореду материјала у површинском слоју.

Табела 5.1. Параметри топографије површине мерени помоћу уређаја „ISR-C002“ (ISR-C002 INSIZE, 2023), (Недић, 2014).

$Ra, \mu m$	<b>Средње аритметичко одступање профила од средње линије профила на дужини оцењивања</b>
$Rz, \mu m$	<b>Средња максимална висина неравнина</b> $Rz=(Rz_1+Rz_2+Rz_3+Rz_4+Rz_5)/5$ $Rz_i$ – максималне висине неравнина на појединим дужинама оцењивања
$Rt, \mu m$	<b>Максимална висина неравнина</b>
$Rq, \mu m$	Средње квадратно одступање профила од средње линије профила на дужини оцењивања
$Rp, \mu m$	$Rp$ – Средња највећа висина испупчења профила на дужини оцењивања $Rp=(Rp_1+Rp_2+Rp_3+Rp_4+Rp_5)/5$ ( $=Rpm$ ) $Rp_i$ – максималне висине испупчења на појединим дужинама оцењивања
$Rqu$	Мера закривљености криве расподеле амплитуде - количник средње вредности четвртог степена вредности ордината $Z(x)$ и четвртог степена $Rq$ на дужини узорка $Rqu = \frac{1}{Rq^4} \left[ \frac{1}{lr} \int_0^{lr}  Z^4(x)  dx \right]$
$Rsk$	Косина оцењиваног профила Коefицијент асиметрије профила (мера асиметрије расподеле амплитуда) - количник средње кубне вредности ординатних вредности $Z(x)$ и кубне вредности $Rq$ на дужини узорка $Rsk = \frac{1}{Rq^3} \left[ \frac{1}{lr} \int_0^{lr}  Z^3(x)  dx \right]$
$Rsm, mm$	Средњи корак неравнина на средњој линији профила на дужини оцењивања
$Rpc, mm$	Број врхова неравнина на јединичној дужини - густина врхова неравнина - број средњих ширина елемената профила $Rsm$ на референтној дужини $Rpc=1/Rsm$
$Rv, \mu m$	$Rv$ – Средња највећа дубина удубљења профила на дужини оцењивања $Rv = (Rv_1+Rv_2+Rv_3+Rv_4+Rv_5)/5$ ( $=Rvm$ ) $Rv_i$ – максималне дубине удубљења на појединим дужинама оцењивања
$R3z, \mu m$	Средња вредност растојања трећег по висини испупчења и трећег по дубини удубљења на референтним дужинама у оквиру дужине оцењивања $R3z=(R3y_1+R3y_2+R3y_3+R3y_4+R3y_5)/5$
$R3y, \mu m$	Највеће растојање трећег по висини испупчења и трећег по дубини удубљења на референтним дужинама у оквиру дужине оцењивања
$Rs, \mu m$	Средњи корак локалних испупчења профила
$Mr1, \%$	Граница горњег дела профила храпавости језгра
$Mr2, \%$	Граница доњег дела профила храпавости језгра
$Rk, \mu m$	Дубина храпавости језгра
$Rpk, \mu m$	Висина горњег дела профила храпавости језгра (дубина)
$Rvk, \mu m$	Висина доњег дела профила храпавости језгра (дубина)

#### 5.4. Сечење воденим абразивним млазом

Резање воденим абразивним млазом је ерозивни поступак механичке обраде. Под високим притиском водени млаз пролази кроз млазницу при чему долази до удара у површину обрадка. Кинетичка енергија млаза ствара оштећење материјала (микрупукотине). Ширењу микрупукотина доприноси и турбулентно струјање течности или течности са абразивним материјалом у пукотинама као и деловање кавитационог ефекта. Кавитациони ефекат ће бити објашњен касније. Резање воденим млазом без абразива је погодно за резање мекших материјала (дрво, папир, кожа). Уколико се у водени млаз унесе абразивно средство (обично песак дефинисане гранулације), могу се обрађивати тврђи материјали. Мале силе резања не захтевају стезање обрадка. Обрађена површина нема заосталих напрезања и деформација.

Због присуства флуида неће се створити зона утицаја тоpline (ЗУТ) и као последица такве технике неће доћи до ојачавања материјала, стварања отровних гасова, топљења и кривљења. Зона утицаја топлоте је део основног метала који је претрпео структурне промене, и промене механичких својстава, услед загревања при заваривању (ЗК, 2023). Може се успешно користити за сечење материјала који не подносе топлотне или механичке захвате, тако да не угрожава физичко-хемијске карактеристике материјала који се сече.

Главни параметри су притисак воде, посмак, проток абразива, пречник млазнице и дебљина и врста обрађиваног материјала.

Основне карактеристике коришћене машине за сечење узорка (КОМПАНИЈА СЛОБОДА – СРБИЈА, 2023):

- Прецизност резања: 0,1 mm/ дужном метру,
- Дебљина реза је 1 mm,
- Дебљина материјала који се може сећи 200 mm (у зависности од материјала који се сече),
- Притисак млазнице 3800 бара и
- Брзина воденог млаза на млазници 2 Маха.

Подржани формати фајлова за израду припрема за сечење:

- Pdf – котирани цртеж са димензијама,
- Dxf – Corel цртеж и
- Dwg – AutoCad цртеж

Технички параметри машине:

- Димензија радне површине 2000×3800 mm,
- Максимална дебљина материјала је 200 mm и
- Једна резна глава.



## 5.5. Оптички микроскоп (металуршки)

За анализу површина припремљених узорака, и анализу завареног споја два челика коришћени су оптички микроскопи (слика 5.8). Металуршки микроскопи „*MT8500*” произвођача „*MEIJI Techno*” на факултету инжењерских наука у Крагујевцу и оптички микроскоп типа „*Leitz Metalloplan*”, опремљен камером „*DFC 295*” и софтвером за обраду слике „*LAS 4.3.1*”. Војнотехничког института у Београду, су микроскопи прилагођени раду уз помоћ рачунара. Микроскопи поседују сопственим штелујући илуминатор, камеру високе резолуције, објективе различитих увећања  $\times 5$ ,  $\times 10$ ,  $\times 20$ ,  $\times 50$  и  $\times 100$  и филтере, који се могу прилагодити и побољшати приказ испитиваних површина. Опремљени су покретним радним столовима, који омогућавају померање узорака дуж X и Y осе уз помоћ завртња.

Пратећи софтвер нуди велики број могућности за обраду и анализу добијених фотографија. Калибрација микроскопа се остварује на основу фотографије (леђира познатих димензија). Након калибрације могуће је мерење разних микро конституената и фаза у структури. Мерења могу бити у погледу линијских и површинских димензија, при чему је могуће извршити мерења површина неправилних облика.

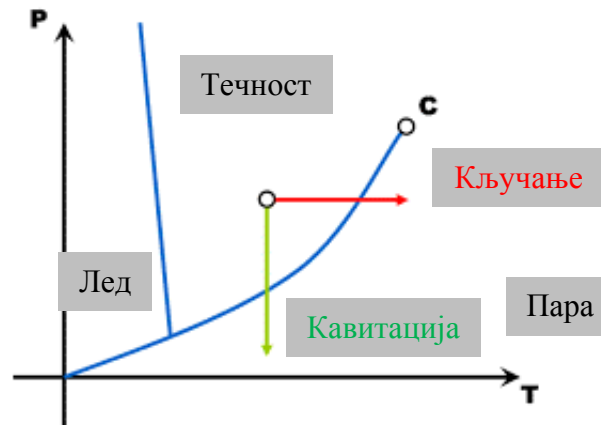


Слика 5.8. „*MEIJI Techno*“ металуршки микроскопи (лево), оптички микроскоп „*Leitz Metalloplan*“ (десно).

## 5.6. Кавитационо хабање - испитивање

Феномен који се јавља у току кавитационе ерозије укључује процес настајања, раста и кондензације мехура унутар флуида. Кавитација се јавља у случају пада притиска. Смањењем притиска испод критичне вредност испаравања течности при константној температури, долази до појаве стварања мехура и тај тренутак се сматра почетком настајања кавитационог ефекта. Снижавање притиска се може остварити прекомерним падом притиска, локалним убрзањем струјања флуида итд. Убрзањем струје флуида на било који начин, брзина струјања расте, која за последицу има пад притиска, чиме се ствара један од основних услова за настајање кавитационог мехурића. Струјни ток флуида са собом носи настале мехуриће паре. У току свог кретања, ако дођу у поље повећаног притиска услови за одржање мехурића више нису испуњени и долази до кондензације истих. У случају да се кондензација дешава у близини или на површини чврстог тела долази до појаве ерозије и разарања материјала. Процес којим се материјал

одваја од чврсте површине назива се кавитациона ерозија, а настало оштећење кавитационо оштећење. Мехурићи паре који се налазе на површини флуида, пуцају и избацују пару у слободан простор. Кавитациона ерозија се јавља у случају када притисак падне на вредност притиска на којој се јавља испаравање флуида или течности, при константној температури, (слика 5.9).



Слика 5.9. Фазни дијаграм флуида

У присуству нуклеуса, долази до појаве мехурића паре. Због пада притиска испод критичне вредности, мехурићи ће повећавати свој радијус све док притисак не достигне вредност једнак притиску паре. Због тока флуида мехурић може наићи на зону у којој је притисак већи од притиска паре. У тој зони ће доћи до нарушавања равнотеже мехурића, који ће убрзо због таквог стања кондензовати у капљице и имплодирати. Настала имплозија је супротан процесу експлозији. Појава је нагла и динамична праћена је буком, вибрацијом и могућим ерозивним дејством у близини места на којима се налази.

Три основна услова неопходна за настанак кавитационе ерозије су:

1. Постојање нуклеуса у систему чије је присуство основа за настанак паре из течности,
2. У течности се мора, бар на тренутак остварити притисак нижи или исти као притисак на којем долази до испаравања течности и
3. Имплзивни ефекат ће се јавити само у случају када је притисак парног мехура мањи од локалног притиска.

Постојање такозваних „слабих места“ у струји течности доводи до формирања нуклеуса што представља идеалне услове за почетак формирања кавитационог мехурића. Потенцијална места за формирање нуклеуса мехурића су: ивичне зоне чврсте површине која су у контакту са струјом флуида, присуство абразивних честица, нераствориви гасови у течности, нечистоће, итд.

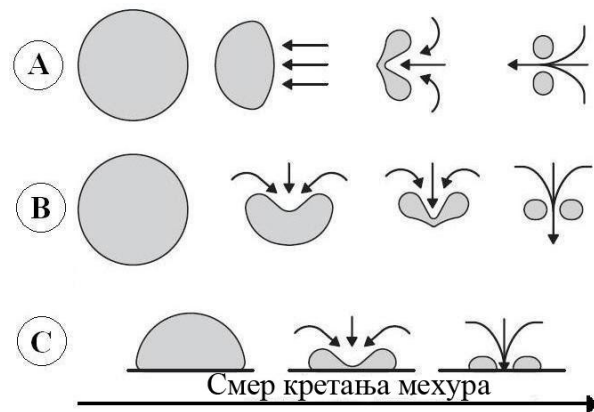
Као што је раније наведено настали мехури се мешају са флуидом, крећу се и експлозивно расту све док не дођу у зону високог притиска, односно када притисак унутар мехура постане мањи од локалног притиска флуида. Мехури се нагло кондензују и прелазе у капи које великом брзином ударају о чврсту површину на коју наиђу (Dojčinović, 2013), (Franc, 2004).

Имплозивни ефекат је веома динамичан, при чему дужим излагањем може доћи до стварања великих оштећења површине која је у контакту са течношћу.

Кавитациона ерозија се најчешће јавља у близини места на којима долази до промене притиска, проузрокованих термалним дилатацијама или веома малим степеном нестабилности притиска течности. Таква места постају нуклеуси за стварање мехура унутар струје течности. На овај начин ствара се хомогена нуклеација за коју је неопходна веома чиста течност, без нерастворивих гасова, примеса нечистоћа и укључака. У већини случајева није остварен задовољавајући ниво чистоће течности, тако да је хомогена нуклеација веома тешко остварива (Dojčinović, 2013).

Створени мехури расту у течности, све док се раст не заустави изједначавањем притиска мехурића и околне течности. У реалним условима, због велике брзине и/или ефекта инертности флуида, мехур може прекомерно увећати свој радијус, и поновним уласком у област повишеног притиска течности, услед разлике притиска, доћи ће до његовог снажног колапса. Овакви колапси често су повезани са формирањем микро млаза велике брзине и интензивних ударних таласа (Dojčinović, 2013) (Franc, 2004).

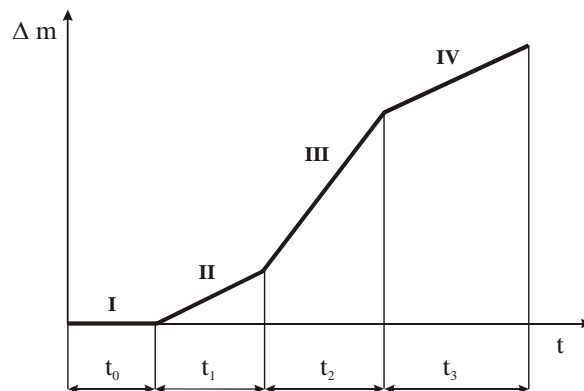
Три типична случаја имплозије мехура (ASTMG32-10, 2010), приказана су на слици 5.10.



Слика 5.10. Приказ имплозије мехура (ASTMG32-10, 2010).

Узастопним брзим дејством кавитационих мехурића који расту и имплодирају долази до настанка микро млазева, који ударају у површину и стварају високи притисак и температуру, што даље узрокује ерозију или кавитационо разарање.

Кавитационо разарање у случају поновљених импулсних удара има карактер замора материјала. На слици 5.11. су приказана четири карактеристична периода кавитационог разарања материјала.



Слика 5.11. Карактеристична крива кавитационог разарања (Dojčinović 2013), (Dojčinović 2007), (Okada 1990).

Први период ( $t_0$ ) представљен је као инкубациони период. У овом периоду нема губитка масе, а кинетичка енергија микро млазева се троши на пластичну деформацију материјала са приметном појавом микро и макро рељефа. Током овог периода, јављају се незнатна површинска оштећења или јамице (Aleksić, 2021).

Други период ( $t_1$ ) представља период почетка незнатног разарања површинског слоја материјала која су праћена минималним губитком масе. Када се достигне граница деформационог ојачавања, континуирана пластична деформација води ка ерозији материјала и настајању и ширењу прелина близу површине, што за последицу има уклањање материјала, односно долази до појаве губитка масе материјала. Оштећена површина постаје храпавија, са великим бројем малих удубљења или јамица (Aleksić, 2021).

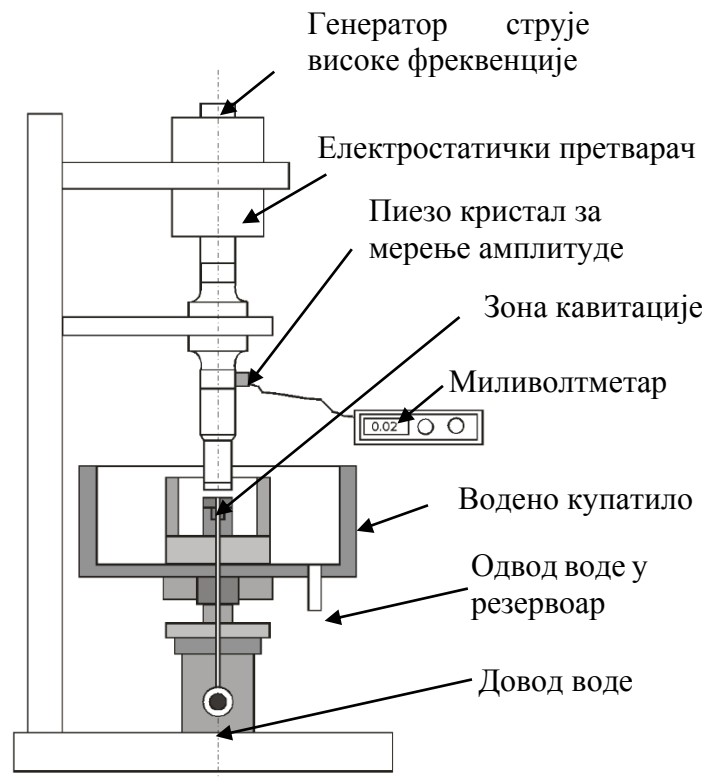
Трећи период ( $t_2$ ) почиње интензивирањем дејства из претходног периода, праћеног израженим губитком масе. Ситни кратери настали у претходном периоду се спајају образујући читаве јаме на површинском слоју изложеном дејству кавитације. Брзина кавитационе ерозије може се повећавати до максималне вредности због деформационог ојачавања површине и развоја прелина. Степен повећања брзине зависиће од врсте материјала и услова кавитационе ерозије. Када почне губитак масе, карактеристике површине се мењају, јављају се пукотине, дубоке јаме и замор постаје очигледнији (Aleksić, 2021).

Четврти период ( $t_3$ ) је период у коме се стварају јамице које својим растом прелазе у облик кратера на површини изложеној дејству кавитације али са постепеним смањењем интензитета. Смањење брзине кавитационе ерозије током овог периода зависи од својства материјала, међусобног дејства струје течности и похабане површине преко процеса равнања (Aleksić, 2021).

Испитивање кавитационе отпорности завареног споја извршиће се уређајем, „*Bandelin Sonopuls HD4100*“ приказаним на слици 5.12. Основне карактеристике уређаја су приказане у табели 5.2:

Табела 5.2. Основне карактеристике уређаја „*HD4100*“.

Јачина звука, l	3-50
Називна ултразвучна снага, W	100
Ултразвучна фреквенција, kHz	20
Пречник сонотроде, mm	11,3
Дужина сонде, mm	147
Подешавање времена, min	9h: 59 min: 59 s или континуирани рад
Времена пулсирања, t	Радни интервали 0,2600 s Интервали одмора 0,3600 s
Прикључак трубе	M 10
Амплитуда, $\mu\text{m}$	118



Слика 5.12. Изглед уређаја (лево), шематски приказ уређаја (десно) (Dojcinović, 2008), (ASTM G 32 – 03, 2023).

Отпорност материјала на дејство кавитације, мења се у широким границама. Дејство кавитационе ерозије на материјал зависи од физичко-хемијских карактеристика, услова у којима се кавитација одвија и од својства течности. Најрелевантнији резултати испитивања отпорности материјала на дејство кавитације се добијају непосредно на објектима, односно у реалним условима.

## 5.7. Скенирајући електронски микроскоп

„JEOLJSM 6610LV“ скенирајући електронски микроскоп (*SEM*) (слика 5.13) се користи за добијање значајно увећане слике узорка. На основу емисије уског снопа примарних електрона, *SEM* прикупља информације и омогућава посматрање узорака чија је величина далеко испод величине металног зрна. Интеракцији примарног снопа и молекула узорка долази до стварања „сигнала” који се детектује. Сигнал се мапира на екрану (монитору) – свака тачка интеракције одговара посебној слици на екрану. Оштрина слике зависи од јачине сигнала са узорка (енергија секундарних електрона) (Џунић, 2015). *SEM* на основу рефлектованих електрона може добити информације о топографији, морфологији и кристалној структури узорка односно експлозивно завареног споја.



Слика 5.13. Скенирајући електронски микроскоп „SEM“ (Марјановић, 2022).

Овај скенирајући електронски микроскоп постиже високу резолуцију слике са увећањима до 300.000 $\times$ , а опремљен је и са „EDS“ енергетско дисперзивним спектрометром „OXFORD Xmax“ који ради са софтвером „Aztec“ (Марјановић, 2022). Може да ради у условима ниског и високог вакуума, а као извор електрона (катоде) користи волфрамно влакно или кристал LaB<sub>6</sub>. (Џунић, 2015).

Основне карактеристике скенирајућег електронског микроскопа „JEOLJSM-6610 LV“ су (SEM, EDS, 2023):

- Увећање микроскопа: 5 $\times$  – 300.000 $\times$ ,
- Извор електрона: волфрамово влакно, кристал LaB<sub>6</sub>,
- Напонелектронског емитера: 0,3 – 30 kV,
- Вакуум систем: Ротациона пумпа + турбомолекуларна пумпа (укључене у основну конфигурацију микроскопа), Јонска пумпа (користи се за LaB<sub>6</sub>), Ротациона пумпа за рад у ниском вакууму (10 – 270 Pa) и
- Детектори: „SE“ детектор; „BSE“ детектор; „CL“ детектор, „EDS“ детектор (*X:Max Large Area Analytical Silicon Drift Connected with INCA Energy 350 Microanalysis System*); детекција елемената  $Z \geq 5$ ; граница детекције  $\sim 0,1$  мас. %, резолуција 126 eV.

## 5.8. Испитивање ударне жилавости Шарпијевим клатном

Жилавост (енгл. *toughness*) представља енергију коју је потребно уложити да би се изазвало разарање структуре материјала, тј. да би се остварио лом епрувете. Што је уложена енергија за лом епрувете мања, то је материјал више крт, а ако је већа, материјал је жилавији.

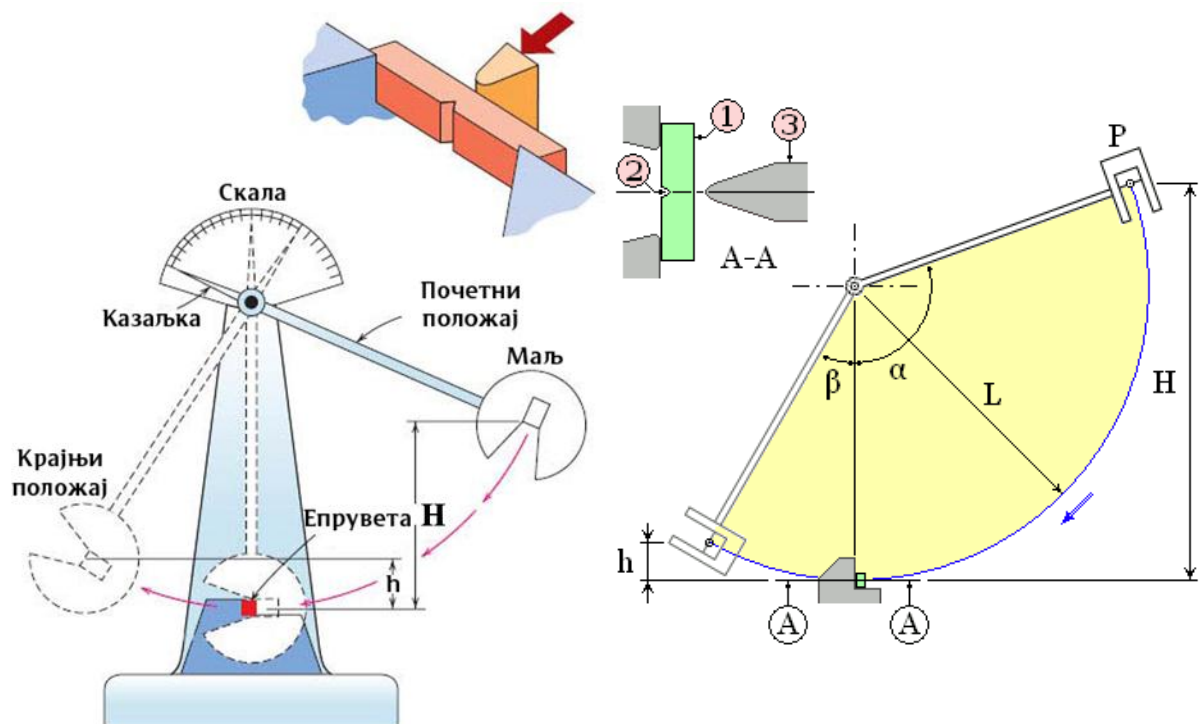
Жилавост се најчешће одређује једним од најстаријих тестова за испитивање ударне жилавости (енгл. *impact toughness*) методом Шарпија (*Charpy*) који је данас обухваћен у свим важнијим стандардима.

Конструктивно извођење уређаја је у форми физичког клатна (слика 5.14) код кога се кинетичка енергија кретања маља троши на лом епрувете која је ослоњена у тачки максималне кинетичке енергије маља.

Основни облик Шарпијевог клатна дат је на слици 5.14. Основни делови уређаја су:

- Тело уређаја са постољем,
- Полука или шипка клатна,
- Тег или маљ,
- Елемент за блокирање клатна у почетном положају на одређеној висини  $h$ ,
- Епрувета,
- Ослонци епрувете и
- Скала са казаљкама.

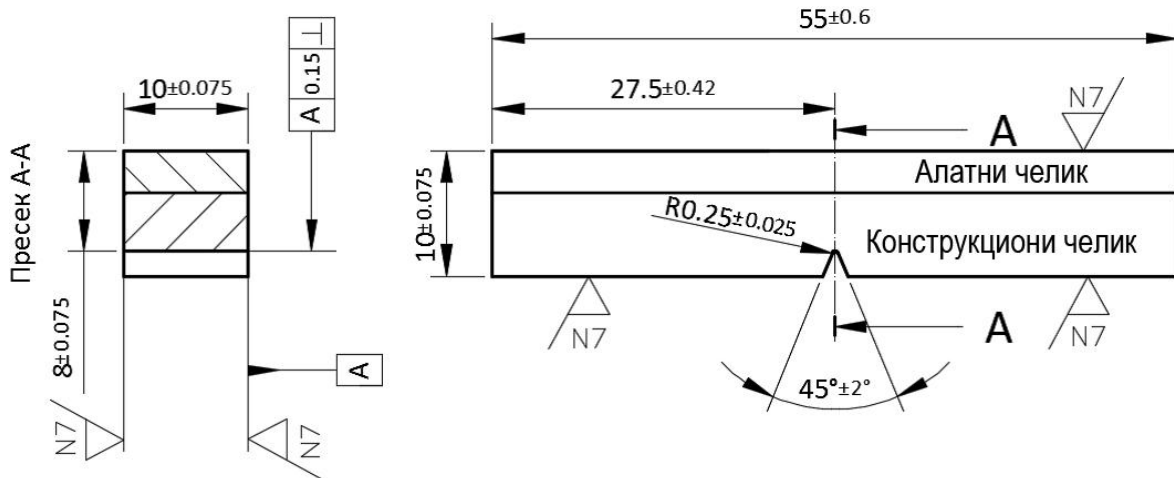
Код старијих уређаја мерни део уређаја омогућавао је читавање само углова  $\alpha$  и  $\beta$  који су сразмерни почетној (укупној) расположивој енергији (висина  $H$ ) и преосталој енергији (висина  $h$ ). До потребних резултата долази се накнадним прерачунавањем. Касније је примењена избадарена (калибрисана) скала са енергетском поделом и могућношћу читавања расположивог и преосталог рада или директног читавања утрошеног рада.



Слика 5.14. Шематски приказ Шарпијевим клатном (лево), приказ улазних вредности Шарпијевим клатном (десно) (IZV, 2023).

Данашњи дигитализовани уређаји директно дају коначне резултате уз низ погодности и предности у односу на класичне уређаје. На средини маља налази се ножасти профил са заобљеним врхом који удара у епрувету и разара је (слика 5.14, пресек А-А).

На резултате испитивања жилавости утичу облик и димензије епрувете (попречни пресек).Највећи утицај има жлеб на средини епрувете. Посебан опрез потребан је при упоређењу резултата које има смисао само ако је коришћена епрувета истог облика и димензија.



Слика 5.15. Димензије епрувете по стандарду *ASTM E-23* (*ASTM E23-07*, 2007).

Стандард *ASTM E-23* (слика 5.15) предвиђа употребу „V” жлеба дубине 2 mm. Дозвољена је и промена димензија попречног пресека (уз промену расположиве енергије клатна), али се то у ознаци параметра жилавости обавезно мора навести.

Бројна вредност параметра жилавости за исти материјал зависи од низа фактора па при испитивању треба обратити пажњу на следеће (IUZ, 2023):

- Облик и димензије епрувете (није дозвољена упоредна анализа резултата са епруветама различитих димензијама),
- При изради епрувета стриктно поштовати упутства дефинисана стандардом,
- Дефинисана брзина клатна од 5 до 5,5 m/s (у неким случајевима 5-7 m/s), Брзина клатна може се проверити путем израза:  $v = (2gH)^{1/2}$ ,
- Провера енергетских губитака уређаја (отпор ваздуха при кретању клатна, трење лежаја у тачки ослоња) врши се упоређењем потенцијалних енергија у крајњим позицијама клатна једног циклуса. Губитак енергије дефинисан стандардом не сме бити већи од 1%,
- Температура просторије у којој се уређај налази мора бити у границама од 23±5 °С. Уколико је установљено одступање у извештају се посебно наглашава,
- Темперирање узорка је прописано стандардом. Најчешће је температура узорка у границама од 23±5 °С,
- Правилно постављање епрувете уз помоћ шаблона или без њега. Оса жлеба и оса клатна се морају поклопити. Ивица профилисаног дела клатна додирује епрувету по целој вертикалној страни,
- Тачност читавања утрошене енергије на скали до 1% и
- Поузданост испитивања се остварује са минимум две епрувете, обично три.

После припреме епрувета и уређаја, ток испитивања обухвата (IUZ, 2023):



- Клатно се избаци из равнотежног положаја, држачем се поставља епрувета на дефинисано место,
- Клатно се подиже и закочи до почетног положаја (висина  $H$ ),
- Отпуштањем кочнице активира се пад клатна са дефинисане висине (висина  $H_1$ ) које удара у епрувету, разара је, а затим се зауставља кочионим механизмом (висина  $H_2$ ),
- На скали се очита почетна и преостала кинетичка енергија,
- Према одговарајућим једначинама врши се израчунавање параметра ударне жилавости.

Због ударног карактера оптерећења и начина рада Шарпијевог клатна потребно је предузети посебне мере предострожности како би се избегао било какав ризик од повреде. Из тих разлога, савремени уређаји већих енергија (300 J и више) имају комплетне заштитне коморе.

## 5.9. Vickers-ов тест тврдоће

У зависности од величине испитне силе према ISO стандарду (табела 5.3) Vickers-ов процес се може поделити у три опсега оптерећења за испитивање тврдоће: опсег микро тврдоће, низак опсег силе и опсег макро тврдоће (конвенционално испитивање).

Табела 5.3. Величине испитне силе према ISO стандарду по Vickers-у (Emcotest, 2023).

Стандард ISO 6507	Метод	Утискивач	Сила испитивања F (N)	Примена
Опсег микро тврдоће	HV0.01	Дијамантска пирамида 136°	0,098	Структурни делови, врло танке превлаке.
	HV0.025		0,245	
	HV0.05		0,490	
	HV0.1		0,980	
Низак опсег силе	HV0.2	Дијамантска пирамида 136°	1,961	Танке превлаке и лимови.
	HV0.3		2,942	
	HV0.5		4,903	
	HV1		9,807	
	HV2		19,61	
	HV3		29,42	
Опсег макро тврдоће (конвенционално испитивање)	HV5	Дијамантска пирамида 136°	49,03	Нормални узорци
	HV10		98,07	
	HV20		196,1	
	HV30		294,2	
	HV50		490,3	
	HV100		980,7	

Испитивање микротврдоће завареног споја урађено је на Војнотехничком институту у Београду. Коришћен је уређај „WilsonDiaMet“, произвођача „CSM“ слика 5.16. За тест тврдоће по Vickers-у, наспрамне стране пирамиде са квадратном базом заклапају угао

од  $136^\circ$ . Дијамантска пирамида се утискује у површину материјала са све већом силом и одржава се од 10 до 15 секунди када се постигне жељена сила.



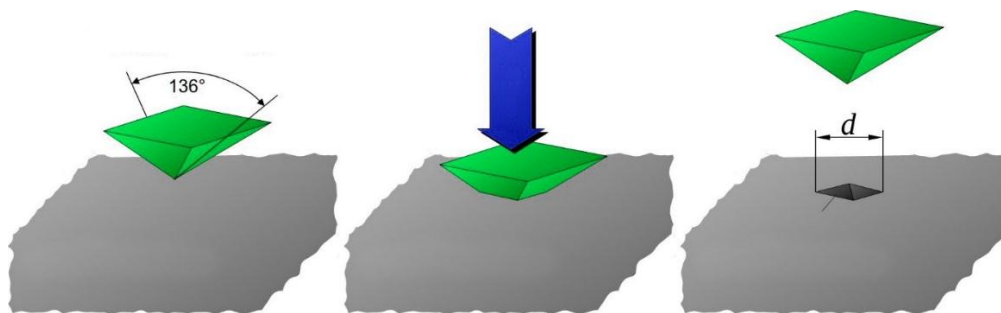
Слика 5.16. Уређај за мерење тврдоће „Wilson DiaMet“.

Однос испитне силе  $F$  и површине удубљења  $A$  (површине пирамиде) служи као вредност тврдоће за Vickers-ов метод (једначина 5.1):

$$HV = \frac{0,102 F}{A} \quad (5.1)$$

где су:

$HV$  - вредност тврдоће по Vickers-у,  
 $F$  - сила испитивања и  
 $A$  - површина удубљења.



Слика 5.17. Поступак испитивања тврдоће по Vickers-у(Тесс, 2023).

У тесту тврдоће по Vickers-у, (слика 5.17) четворострана дијамантска пирамида се утискује у материјал који се испитује. Остварена површина удубљења служи као мера вредности тврдоће.

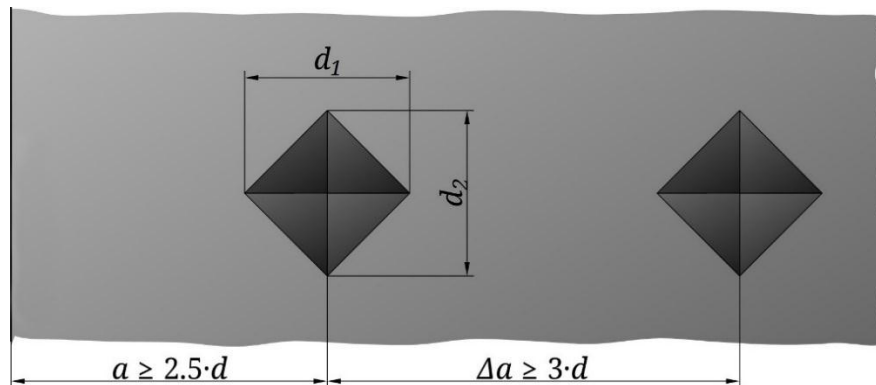
Фактор 0,102 потиче од застареле јединице мере „килопонд“ и више није у употреби. Површина удубљења се може одредити из дијагонала удубљења која је остала иза. Са

овом дијагоналном удубљења  $d$  у милиметрима и испитном силом  $F$  у Њутнима, онда се вредност тврдоће по Vickers-у  $HV$  одређује на следећи начин:

$$HV = \frac{0,1891 F}{d^2} \quad (5.2)$$

где је:

$d$  - средња вредност две дијагонале  $d_1$  и  $d_2$



Слика 5.18. Минимална удаљеност коју треба одржавати (Тецс, 2023).

Поред тога, растојање  $a$  од центра удубљења до ивице узорка треба да буде најмање 2,5 пута веће од вредности дијагонале удубљења  $d$  како би се спречило да материјал тече у страну (слика 5.18). Штавише, растојање између два суседна удубљења за узорке челика треба да буде најмање три пута већа од дијагоналне удубљења. Ово је да би се елиминисао утицај појаве очвршћавања око подручја удубљења (Мајсторовић, 1988), (Ђорђевић, 1998).

## 5.10. Рендгенографско испитивање

Радиографско испитивање представља процес у којем се на основу употребе продорног гама или рендгенског зрачења зраче делови који се желе испитивати. Спада у групу конвенционалних метода која се користи за испитивање, најчешће заварених конструкција. Радиографско испитивање омогућава испитивање унутрашњих, скривених дефеката материјала на основу способности рендгенских или гама зрака да продиру у различите материјале различите дебљине и густине. Продорно зрачење које пролази кроз материјал се може детектовати помоћу две методе:

- Филм осетљив на зрачење (филмска радиографија) и
- Планер низ сензора осетљивих на зрачење (радиографија у реалном времену).

Извор зрачења може бити или рендгенски апарат или радиоактивни извор, најчешће  $Ir-192$ ,  $Co-60$ , или у ретким случајевима  $Cs-137$ .

Радиографска контрола у дисерацији је извршена уређајем „TELEDYNE ICMCP300D“, према стандарду  $SRPS EN ISO 17636-1$  (слика 5.19). Основни параметри уређаја су приказани у табели 5.4.



Слика 5.19. Уређај „TELEDYNE ICMCP300D“ (Teledyne ICM Company History, 2023).

Табела 5.4. Техничке карактеристике „TELEDYNE ICMCP300D“ (Teledyne ICM Company History, 2023).

	Јединица	Вредност
Геометрија зрачења	-	Директиционална
Опсег излазног напона	kV	20 to 300
Опсег струје цеви	mA	1 to 10
Струја цеви при пуном излазу	mA	3,0
Макс. снага на аноди	W	900
Режим константне снаге	-	Да
Радни циклус при 30°C	%	100
Продор челика	mm	66
Тежина (без заштитних прстенова)	kg	23
Габаритне димензије	mm	Ø 180 x 839
Доза цурења на 1 m при пуном излазу	mSv/h	< 5,0
Оптичка фокусна тачка (EN12543)	mm	3,0 (~1,5 ИЕС 336)
Макс. корисни угао	°	60×40 елиптични
Инхерентна филтрација	mm Be	0,8 (Be прозор)
Водоотпорни ниво	-	IP65
Радна температура	°C	-30 to +60
Температура складиштења	°C	-40 to +70
Заштитни прстенови	-	2

Зрачење се усмерава кроз део и на екран осетљив на зрачење. Добијене фотографије показује реалне димензионалне карактеристике дела. Код рендгенских зрака и гама зрачења, како зрачење пролази кроз гушћи материјал, продорност зрака је мања па филм постаје тамнији на произведеној слици, односно што је материјал мање густине

продорност зрака је већа па је слика је светлија на тим местима. На основу тога се могу уочити могуће несавршености као промене густине на филму.

### 5.11. Ултразвучна дефектоскопија

Уређај „UCD-50“ је универзални ултразвучни дефектоскоп намењен за ултразвучну дефектоскопију и ултразвучна мерења дебљине (*UZ*). Мерење дебљине помоћу *UZ* методе представља резултат множења брзине простирања *UZ* таласа у материјалу и времена проласка импулса.

$$d = \frac{Vt}{2n} \quad (5.3)$$

где су:

*d* - дебљина мерног узорка, m,

*V* - брзина ултразвука, m/s,

*t* - време проласка импулса, s и

*n* - број пролаза ултразвучног импулса кроз материјал.

Код Pulse-echo методе рачуна се са половином времена, пошто *UZ* импулс прелази пут који је једнак двострукој дебљини. Дефектоскоп обезбеђује тачно мерење времена, док тачност уношења брзине зависи од оператера (Кропус, 2012).

Тачност мерења дебљине и положаја дефеката у великој мери зависи од правилног задавања брзине ултразвука у материјалу. Брзина зависи од физичких карактеристика материјала, његове температуре као и врсте ултразвучних таласа (Кропус, 2012).

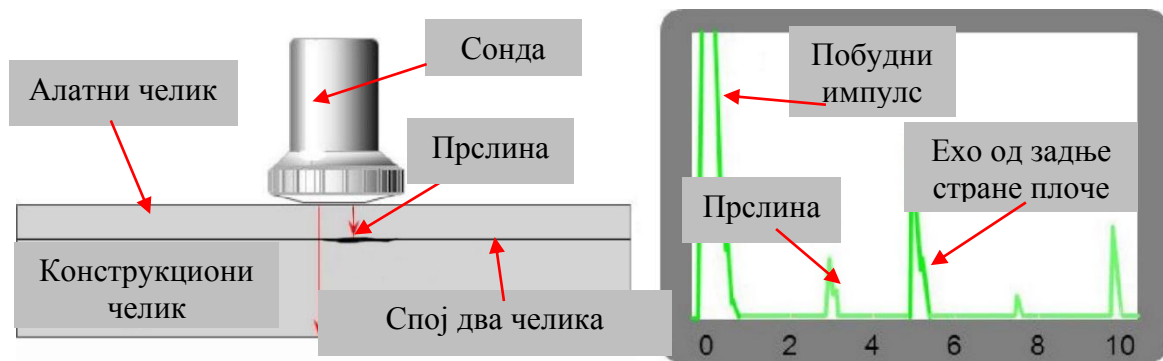
За испитивање експлозивно заварених плоча коришћена је Pulse-echo метода са само једном сондом која је у контакту са припремљеним основним делом материјала. Уређај емитује веома кратке импулсе. Након емитовања кратког импулса, предајник се искључује, а пријемник укључује, тако да је спреман да „ухвати“ оне таласе који настају одбијањем таласа од површине која ограничава посматрани елемент.

На слици 5.20 приказан је мерни инструмент „UCD-50“.



Слика 5.20. Чеони панел коришћеног ултразвучни дефектоскоп (Кропус, 2012).

Код лошег контакта између плоча, емитовани импулс ће се рефлектовати од њих и тако прећи краћу удаљеност него што би била да постоји хомогена веза, односно да су плоче металуршки спојене (слика 5.21). Овом методом су евидентирана места на којима постоје грешке завареног споја, односно места на којима није дошло до спајања плоча.

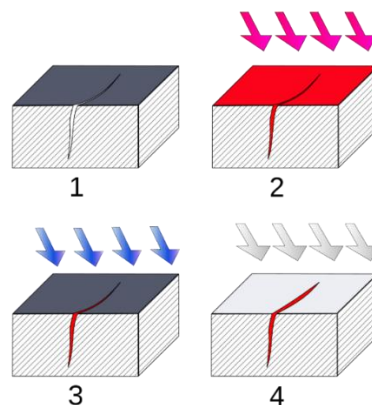


Слика 5.21. Процес испитивања завареног споја (Mihaljević, 2023)

## 5.12. Испитивање течним пенетрантима

Стандард *SRPS EN ISO 3452-1* дефинише методу испитивања течним пенетрантима која се употребљава за откривање површинских неправилности као што су нпр. прслине, поре, преклапање, нестопљеност (Alil, 2017). Не ретко се примењује код испитивања заварених конструкција као метода испитивање без разарања. Метода захтева адекватну припрему површине (слика 5.22 тачка 1). На очишћену и одмашћену површину наноси се течни пенетрант (слика 5.22 тачка 2), јарке уочљиве боје, најчешће црвене. Течни пенетранти имају јако добру особину пенетрирања у евентуалну пукотину. Вискозитет и

капиларност имају велики утицај на брзину којом пенетрант пуни неправилности, док имају мали утицај на способност да пенетрант уђе у неправилност. Време продирања зависи од ширине отворене неправилности или прслине, специфичне тежине и температуре пенетранта (Alil, 2017). Приближно време пенетрирања износи од 10 до 20 минута (слика 5.22 тачка 3). Након истека времена потребног за продирање, вишак се уклања са површине. Уклањање вишка са површине може се учинити крпом без длачица или водом (слика 5.22 тачка 4). Код пенетраната који се уклањају водом треба бити пажљив и млаз воде усмерити паралелно с површином испитиваног материјала, како млаз воде не би истиснуо пенетрант из пукотине. Након сушења површине, наноси се развијач (обично је беле боје) који абсорбује пенетрант заостао у неправилности и даје видљиву индикацију.



Слика 5.22. Процес пенетрантског испитивања (High Energy Metals, Inc., 2023)

Овом методом могуће је откривање присуства пукотина, али не и одређивање тачне димензије и њене дубине. Дозвољено одступање облика, димензија, изгледа, структуре, механичких и физичких особина дефинисано је техничким прописима, техничким условима договореним између уговорних страна, тј. одређено је уговором. У складу са релевантним стандардима или уговором о техничким условима, неправилности се могу дефинисати као прихватљиве или неприхватљиве, односно, које се могу или не могу поправити (Alil, 2017).

На основу облика, неправилности се деле на (Alil, 2017):

- Раванске (пукотине, зачепљења, непроварени корен) и
- Запреминске (мехурићи, поре, укључци, итд.).

Према месту настанка, неправилности се деле на (Alil, 2017):

- Спољашње односно површинске,
- Унутрашње и
- Под-површинске.

### 5.13. План испитивања

Основна идеја експерименталних испитивања је одређивање оптималних параметара при извођењу експлозивног заваривања и карактеризација завареног споја деструктивним и

недеструктивним методама. Треба напоменути да у тренутку писања овог рада нису пронађени радови који се односе на добијање и испитивање експлозивно завареног алатног и конструкционог челика изабраних у дисертацији. Код свих плоча алатног и конструкционог челика варирана је количина експлозива. На основу тога, може се рећи да плоче добијене овим поступком и резултати испитивања представљају основу неких будућих испитивања.

Испитивањем методама без разарања омогућава се откривање и процена недостатака у материјалима или разлика у његовим карактеристикама, без деградације самог узорка. Експлозивно заварене плоче најпре су испитиване методама без разарања које су приказане у табели 5.5.



Табела 5.5. Технике испитивања без разарања

Техника	Физички феномени	Основе	Примена
Радиографско тестирање	Електромагнетно зрачење (јонизујуће)	Захтева упад и продирање енергије зрачења на и кроз прегледани материјал, коју материјал хомогено апсорбује, осим у регионима где се јављају варијације дебљине, густине или дефекти. Зрачење које пролази кроз материјал погађа слику у сензитивном медију откривајући дефекте.	Откривање дубоких или уграђених дефеката (практично без ограничења); Слаба осетљивост на дефекте управно на правац зрачења; Слаба осетљивост за мале дефекте у поређењу са димензијом узорка; Није погодно за on-line инспекцију. Штетност по здравље.
Конвенционално пулс-ехо ултразвучно тестирање	Механичке вибрације	Сноп високофреквентних звучних таласа се уводи у материјал, путује кроз њега и рефлектује се на интерфејсима или дефектима. Рефлектовани звук се анализира да би се идентификовало присуство и локација дефеката.	Може се користити за детекцију грешака, локацију и мерење; Не може се користити за инспекцију на високим температурама (обично >300°C); Зависна од површинске обраде. Није адекватно за локално неравне површине.
Испитивање течним пенетрантима	Капиларност	Компоненте се навлаже флуоресцентним или обојеним пенетрантом и пенетрант улази у дефект који је отворен према површини. Вишак пенетранта се уклања, а на површину се наноси развијач, извлачећи пенетрант из дефекта, формирајући видљиву индикацију дефекта.	Не може открити унутрашње недостатке; Релативно дуготрајан процес (>20 минута).

Да би се добила комплетна слика квалитета завареног споја оствареног експлозивним заваривањем, након испитивања недеструктивним методама коришћене су и

деструктивне методе испитивања. Коришћене деструктивне методе су приказане у табели 5.6.

Табела 5.6. Технике испитивања са разарањем

Техника	Физички феномени	Основе	Примена
Испитивање ударне жилавости	Кинетичка енергија	Конструктивно извођење уређаја је у форми физичког клатна код кога се кинетичка енергија кретања маља троши на лом епрувете која је ослоњена у тачки максималне кинетичке енергије маља.	Одређивање енергије коју је потребно уложити да би се изазвало разарање структуре материјала, тј. да би се остварио лом епрувете, Што је уложена енергија за лом епрувете маља, то је материјал више крт, а ако је већа, материјал је веће жилавости.
Кавитационо хабање.	Механичке вибрације (кавитациони ефекат)	Феномен који се јавља у току кавитационе ерозије укључује процес настајања, раста и кондензације мехура унутар флуида. Процес којим се материјал одваја од чврсте површине назива се кавитациона ерозија, а настало оштећење кавитационо оштећење.	Лабораторијско испитивање отпорности материјала на дејство кавитације мери се губитком масе у току испитивања.
Испитивање тврдоће	Механичко утискивање	За тест тврдоће по Vickers-у, наспрамне странице пирамиде са квадратном базом заклапају угао од $136^\circ$ . Дијамантска пирамида се утискује у површину материјала са све већом силом и одржава се од 10 до 15 секунди када се постигне жељена сила.	Користи се као показатељ тврдоће материјала.
Тест равним секачем	Механичко испитивање	Направи се зарез на месту споја два метала. Секач се постави на место зареза и снажно се удари чекићем неколико пута. Карактер цепања или љуштење показује карактер везе споја.	Брз и јефтин тест за испитивање издржљивости заварених метала на механички удар.

## 6. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

У овом поглављу су приказани добијени резултати и анализа истих за сваку методу испитивања.

### 6.1. Мерење брзине детонације

Брзина детонације експлозива Демекс и Амонекс одређена је коришћењем оптичких сонди. Овом методом мерење се изводи тако што се на месту стабилне детонације поставе „*START*“ и „*STOP*“ сонда. Међусобно растојање сонди  $l$  (у милиметрима) је унапред одређен мерењем уз помоћ дигиталног помичног кљунастог мерила са тачношћу од 0,01 mm. „*START*“ сонда се налази у зони стабилне детонације односно на удаљености од 1,5 пречника пуњења у односу на место где се врши иницирање. Време  $t$  (у микросекундама) које је потребно да детонациони талас пређе од „*START*“ до „*STOP*“ сонде мери се електронским бројачем или осцилоскопом. Регистровани светлосни сигнал са оптичких сонди се конвертује у електрични преко брзих фотодетектора (Анђелић, 2018). У експерименту примењен је систем са тачношћу мерења времена до 1 ns. Брзина детонације  $D$ , израчунава се као количник дефинисаног растојања и измереног времена електронским бројачем или осцилоскопом, и изражава се у m/s или у km/s:

$$D = \frac{l}{t} \quad (6.1)$$

Кашњење оптичког сигнала који се простире кроз кабл измерено је да износи 240 ns на 50 m, односно 4,8 ns по метру. Овај податак је од суштинске важности у случају када се ради са кабловима различитих дужина, јер омогућава компензацију кашњења сигнала.

Прашкasti експлозив насут је у *PVC* цеви дужине 200 mm, спољашњег пречника 52 mm. На *PVC* цеви избушене су две рупе за постављање оптичких сонди. Прва рупа је 75 mm удаљена од места иницирања док је друга рупа удаљена 175 mm од места иницирања. У овој поставци извршена су по три мерења брзине детонације за сваки експлозив. Пречник сонди једнак је пречнику рупа, чиме се обезбедило њихово фиксирање и спречило просипање експлозива. На слици 6.1 приказан је изглед опитног склопа: *PVC* цев са експлозивом и уграђеним сондама.

На слици 6.2 приказана је слична конфигурација, с том разликом што је експлозив у кутији без поклопца. Прашкasti експлозив насут је и у дрвене кутије унутрашњих димензија 200×50×40 mm. Циљ овако спроведеног мерења био је да се брзина детонације одреди у што приближнијим условима оним у којима се експлозив активира при извођењу експлозивног заваривања – насут са слободном горњом површином. Начин фиксирања и позиције сонди су исте као у случају поставке *PVC* цеви.

У овој поставци извршена су три мерења брзине детонације Демекса.



Слика 6.1. Узорак експлозива Демекс за мерење брзине детонације у PVC цеви.



Слика 6.2. Узорак експлозива Демекс за мерење брзине детонације у кутији.

У табели 6.1 приказани су добијени резултати брзине детонације експлозива Амонекс, Добијена вредност брзине представља средњу вредност измерене брзине детонације три узорка.

Првим активирањем Демекса у PVC цеви, се није детектовао сигнал помоћу оптичких сонди. Активирање Демекса у кутији је било успешно само у једном од три покушаја. Добијена вредност од 2450,2 m/s је мања у односу на вредност која је добијена у PVC цеви. Разлог мање вредности је што се Демекс налази у расутом стању са мањом дебљином насутог слоја експлозива која у овом случају износи 40 mm. Дебљина експлозива у овој конфигурацији одговара дебљини експлозива у процесу заваривања.

Измерене брзине детонације експлозива су веће од минималне декларисане. У овом случају је Демекс прикладнији према критеријумима које поставља „прозор заваривања“. Треба истаћи да су добијене вредности резултата мерења уједначени што потврђује да су припрема и реализација експеримента правилно изведени, односно да су добијени резултати валидни.

Табела 6.1. Резултати мерења брзине детонације.

Мерење	Врста експлозива	Растојање мерна база, $l$ (mm)	Време, $\Delta t$ ( $\mu$ s)	Брзина детонације, $D$ (m/s)	Средња вредност $D_{sr}$ (m/s)
1	Демекс у PVC цеви	-	-	-	2803,7
2		100,7	36,279	2775,7	
3		101,5	35,845	2831,6	
1	Демекс у дрвеном раму (Мерење у <i>Trayal-y</i> )	-	-	2600,0	2600,0
1	Демекс у кутији	-	-	-	2450,2
2		-	-	-	
3		100,4	40,976	2450,2	
1	Амонекс	100,02	26,442	3782,6	3769,8
2		99,83	26,640	3747,4	
3		99,43	26,308	3779,5	

## 6.2. Испитивање хемијског састава

Хемијски састав челика *51CrV4*, *X155CrVMo12-1* и *S355J2*, у масеним процентима, дат је у табели 6.2. Испитивање је обављено апаратом „*Spektrometar Spectro Lab LACM12*“ методом оптичког емисионог спектрометра (*OEC*), према стандарду *SRPS C.A1.011:2004*.

Метода *OEC* је намењена за квантитативну хемијску анализу легура метала из чврстог узорка. Техника испитивања се заснива на компаративној анализи, инструмент је фабрички калибрисан на основу сертифицираних референтних материјала који су складиштени у меморији спектрометра (IMW Institut, 2023).

Према таласним дужинама карактеристичног зрачења, које се детектују, инструмент одређује врсту елемента, а према њиховом интензитету, количина садржаја, упоређујући их са познатим интензитетима карактеристичног зрачења.

Табела 6.2. Хемијски састав челика *51CrV4*, *X155CrVMo12-1* (*X160CrMoV121*) и *S355J2* (IMW Institut, 2023).

Јединица	% (m/m)													
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N	Ti	Nb	V	Al
Садржај <i>51CrV4</i>	0,491	0,257	0,816	0,0134	0,0052	0,988	0,194	0,051	0,250	0,012	<0,001	0,003	0,128	0,015
Садржај <i>X155CrVMo12-1</i>	1,58	0,26	0,32	0,01	0,01	12	-	0,9	-	-	-	-	0,7	-
Садржај <i>S355J2</i>	0,160	0,033	1,382	0,0132	0,0052	0,027	0,028	<0,001	0,029	0,007	0,008	0,029	0,004	0,038

### 6.3. Испитивање површине профилометром

За мерење топографије површине алатног и конструкционог челика пре експеримента коришћен је уређај „*ISR-C002*“, фирме „*INSIZE*“–Кина, слика 6.3. То је преносни уређај и погодан је за мерење на различитим површинама. Уређај је једноставан за руковање, мерење се обавља брзо, поседује веома стабилну и високу тачност мерења.

Мерење храпавости, односно великог броја параметара топографије површине се врши у складу са стандардом. Резултати мерења се дигитално / графички приказују на екрану уређаја. Уређај поседује могућност повезивања са рачунаром и управљање мерењем помоћу одговарајућег софтвера.



Слика 6.3. Уређај „*ISR-C002*“ за мерење храпавости површина.

У табели 6.3 су приказани параметри површинске храпавости који се мере коришћењем овог уређаја. На слици 6.4 је приказана мерна опрема и мерење топографије површине. Због специфичности експлозивног заваривања параметри топографије површине плоча су мерени само у уздужном правцу. Мерење у попречном правцу није неопходно.

На слици 6.5 приказане су припремљене плоче за одређивање површинске храпавости.



Слика 6.4. Мерна опрема за мерење топографије површине

Нампел је студирајући цилиндричну конфигурацију експлозивног заваривања, утврдио је (Нампел), (Blazynski, 1983):

- Ако је збир храпавости стационарне и покретне плоче мањи од једне десетине амплитуде таласа, добијен је добар квалитет заваривања са симетричним таласима.
- Ако је збир храпавости била приближно једнака амплитуди таласа, добијена је таласаста површина са периодичним истопљеним слојем.
- Ако је збир храпавости једнака двострукој амплитуди таласа, амплитуда таласа се континуирано смањује, а растопљени слој је континуалан.
- Ако је збир храпавости премашио троструку вредност амплитуде таласа, заваривање није изводљиво.



Слика 6.5. Припремљене плоче за испитивање површинске храпавости.

Коришћењем мерног уређаја „ISR-C002“ постављеног на одговарајуће постоље добијен је мерни систем којим је измерена почетна микрогеометрија плоча испитиваних материјала. Микрогеометрија контактних површина испитиваних материјала представљена је преко основних параметара површинске храпавости (Недић, 2014), (Џунић 2015):

$Ra$  - средње аритметичко одступање профила на дужини оцењивања,

$Rmax$  - максимална висина профила на дужини оцењивања и

$Rz$  - средња висина профила на дужини оцењивања.

Резултати мерења су приказани у табели 6.3.

Табела 6.3. Резултати мерења површинске храпавости.

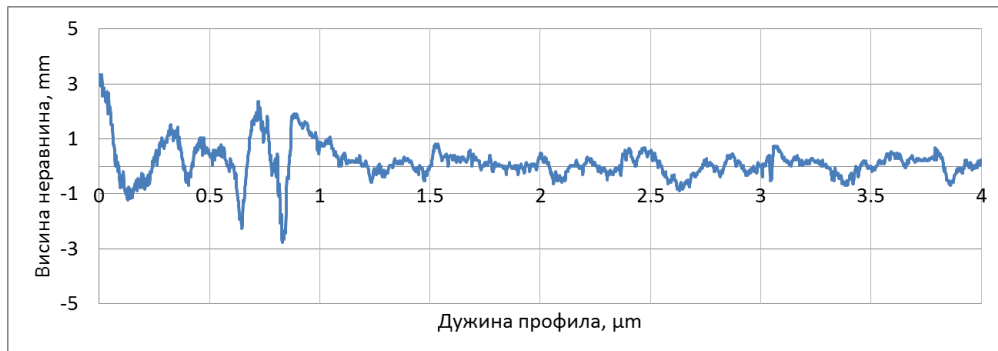
	Конструкциони челик				Алатни челик		
	1	2	3	4	1	2	3
$Ra, \mu m,$	0,198	0,439	0,384	0,327	0,203	0,201	0,215
$Rz, \mu m,$	1,274	2,964	3,033	2,41	2,005	1,541	1,798
$Rt, \mu m,$	1,531	6,174	7,755	3,457	5,433	1,877	2,321
$Rq, \mu m,$	0,25	0,573	0,522	0,425	0,299	0,264	0,297
$Rp, \mu m,$	0,524	1,502	1,768	1,027	0,642	0,533	0,464
$Rku,$	3,097	3,125	3,968	3,535	6,809	4,358	6,119
$Rsk, \mu m,$	-0,364	0,289	0,161	-0,563	-0,662	-0,613	-1,362
$Rpc, mm,$	95,0	57,5	85,0	105,0	70,0	62,5	60,0
$Rv, \mu m,$	0,751	1,462	1,264	1,383	1,363	1,008	1,334
$R3z, \mu m,$	0,948	1,106	1,729	1,699	0,81	0,82	0,79
$R3y,$	1,284	2,223	4,989	2,371	1,383	0,938	1,334
$Rz(jis), \mu m,$	0,919	1,432	1,867	1,719	0,958	0,889	0,958
$Rs, \mu m,$	0,039	0,052	0,044	0,037	0,079	0,073	0,1
$Rsm, mm,$	0,063	0,118	0,074	0,054	0,087	0,105	0,118
$Rk, \mu m,$	0,568	0,926	0,892	0,885	0,516	0,499	0,513
$Rpk, \mu m,$	0,22	1,266	1,326	0,349	0,342	0,227	0,104
$Rvk, \mu m,$	0,309	0,803	0,628	0,622	0,641	13,7	0,652
$Mr1, \%,$	9,3	15,6	11,2	7,8	8,2	13,7	16,8
$Mr2, \%,$	85,5	86,0	82,6	82,3	87,7	83,6	84,7

На сликама 6.6 до 6.12 су приказани дијаграми површинске храпавости појединих плоча.

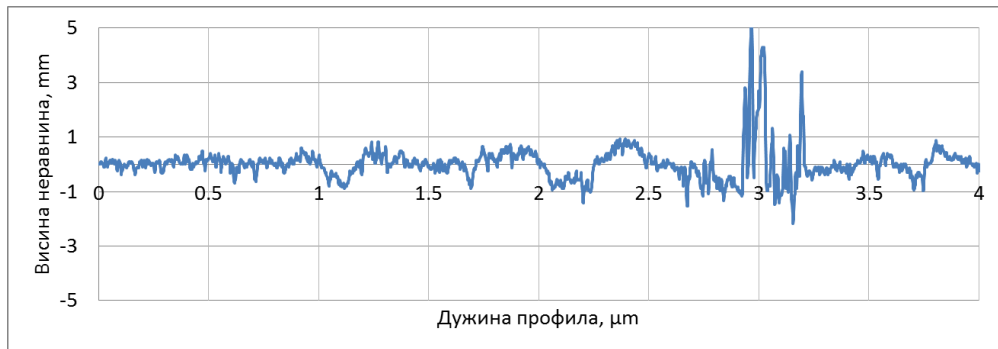




Слика 6.6. Профил површине конструкционог челика, узорак 1.



Слика 6.7. Профил површине конструкционог челика, узорак 2.



Слика 6.8. Профил површине конструкционог челика, узорак 3.



Слика 6.9. Профил површине конструкционог челика, узорак 4.



Слика 6.10. Профил површине алатног челика, узорак 1.



Слика 6.11. Профил површине алатног челика, узорак 2.



Слика 6.12. Профил површине алатног челика, узорак 3.

Величина површинске хрпавости дефинише у којој ће мери бити ефикасан систем одношења материјала кумулативним млазом, а тиме и утицај додатног топљења на површини завареног споја, јер се преостала енергије кумулативног млаза претвара у топлоту.

Заваривање највишег квалитета, захтева да површине алатног и конструкционог челика, буду што глаткије. Измерене вредности површинске хрпавости су у границама  $\pm 1 \mu\text{m}$  што је према експерименталним подацима више него довољно за квалитетан спој.

## 6.4. Ултразвучна дефектоскопија

Експлозивно заварене плоче челика (алатни/конструкциони) испитане се ултразвучним дефектоскопом „UCD-50“ произвођача „Kronus“ у лабораторији „Apave Vertech“ у Железнику. Ултразвучна SE сонда фреквенције 10 MHz коришћена је за скенирање целе површине сваке плоче. Као контакт средство коришћен је тапетол лепак, а испитивање је урађено у складу са стандардом *SRPS EN 14127*. С обзиром да су спајани разнородни материјали са различитим брзинама простирања ултразвука, урађена је калибрација на основним материјалима. Калибрација је урађена на плочи конструкционог челика дебљине 10 mm са брзином лонгитудиналних таласа 5860 m/s.

На слици 6.13 је приказан коришћени ултразвучни дефектоскоп и SE сонда.

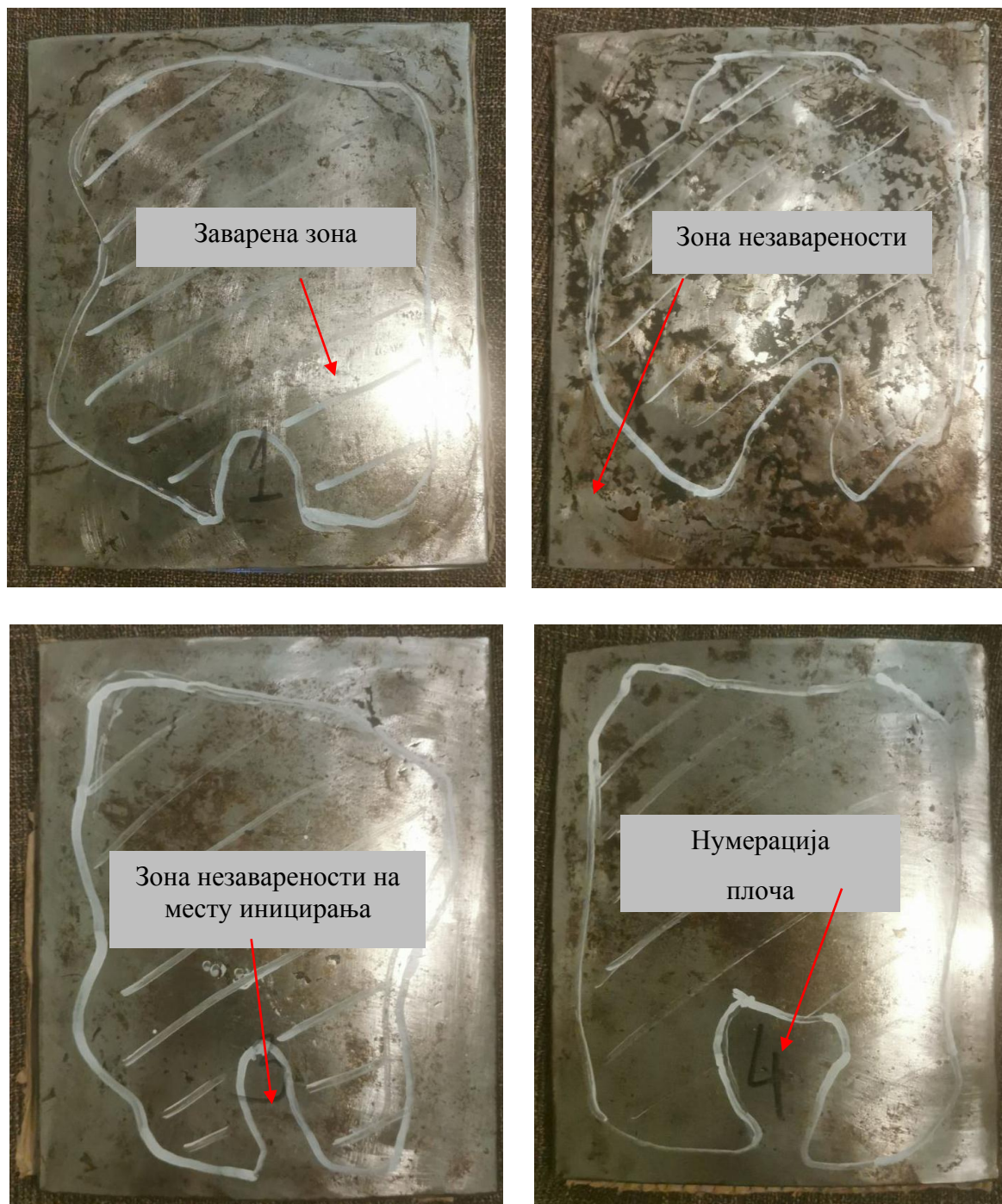


Слика 6.13. Ултразвучни дефектоскоп.

Шрафирана област на представљеним сликама је област где је дошло до спајања материјала. Ван ове области није се реализовало спајање материјала.

Бројеви узорака челичних проца 1-4 одговарају различитим количинама Демекс експлозива и то 540, 640, 740 и 850 g, респективно.

На месту активирања детонаторске каписле материјал се није спојио код свих узорака челичних плоча означених 1-4 као што је приказано на шрафираним површинама реалних узорака на слици 6.14.



Слика 6.14. Експлозивно заварене плоче угљеничног челика са алатним челиком (узорци 1-4).

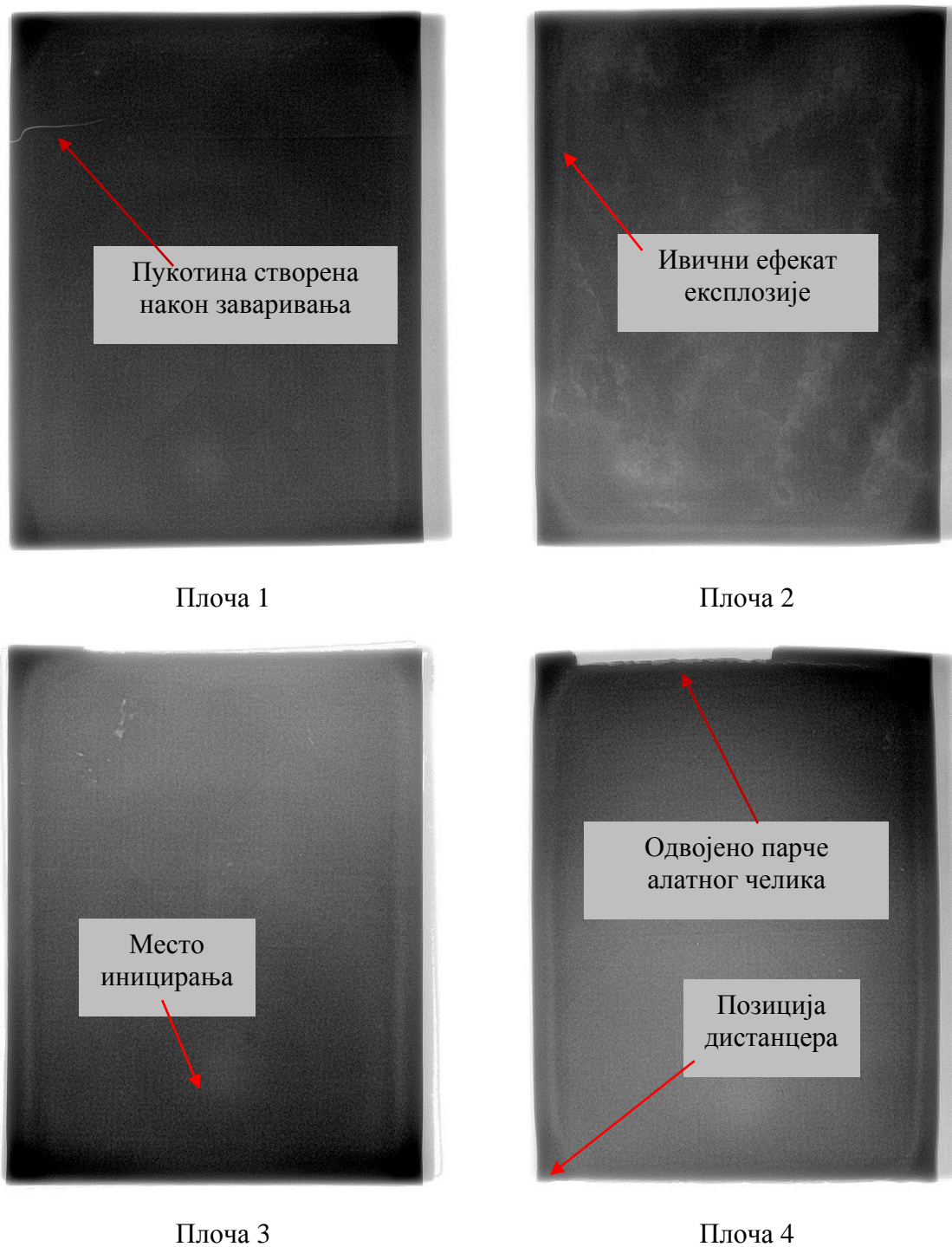
## 6.5. Рендгенографија

Рендгенско испитивање, извршено је на уређају „TELEDYNE ICM CP300D“. Напон, јачина струје и време експозиције се подешавају за сваку плочу. Дебљина и материјал имају главну улогу за добијање квалитетних радиографских снимака. На слици 6.15 приказана је опрема коришћена за радиографско испитивање.



Слика 6.15. Процес испитивања плоче Рендгеном.

Радиографија заварених спојева није открила значајне дефекте споја. Познато је да је рендгенски снимак поуздан тест за детекцију тродимензионалних дефеката, али није у стању да покаже раванске, дводимензионалне дефекте и мале дефекте (прслине) у нормалном смеру у односу на правац упадног зрачења (Lopez, 2018). Дакле, откривање недостатка споја зависиће од оријентације зрачења. Рендгенографско испитивање је показало стањивање материјала (покретне плоче) или деформацију на месту иницирања експлозива.

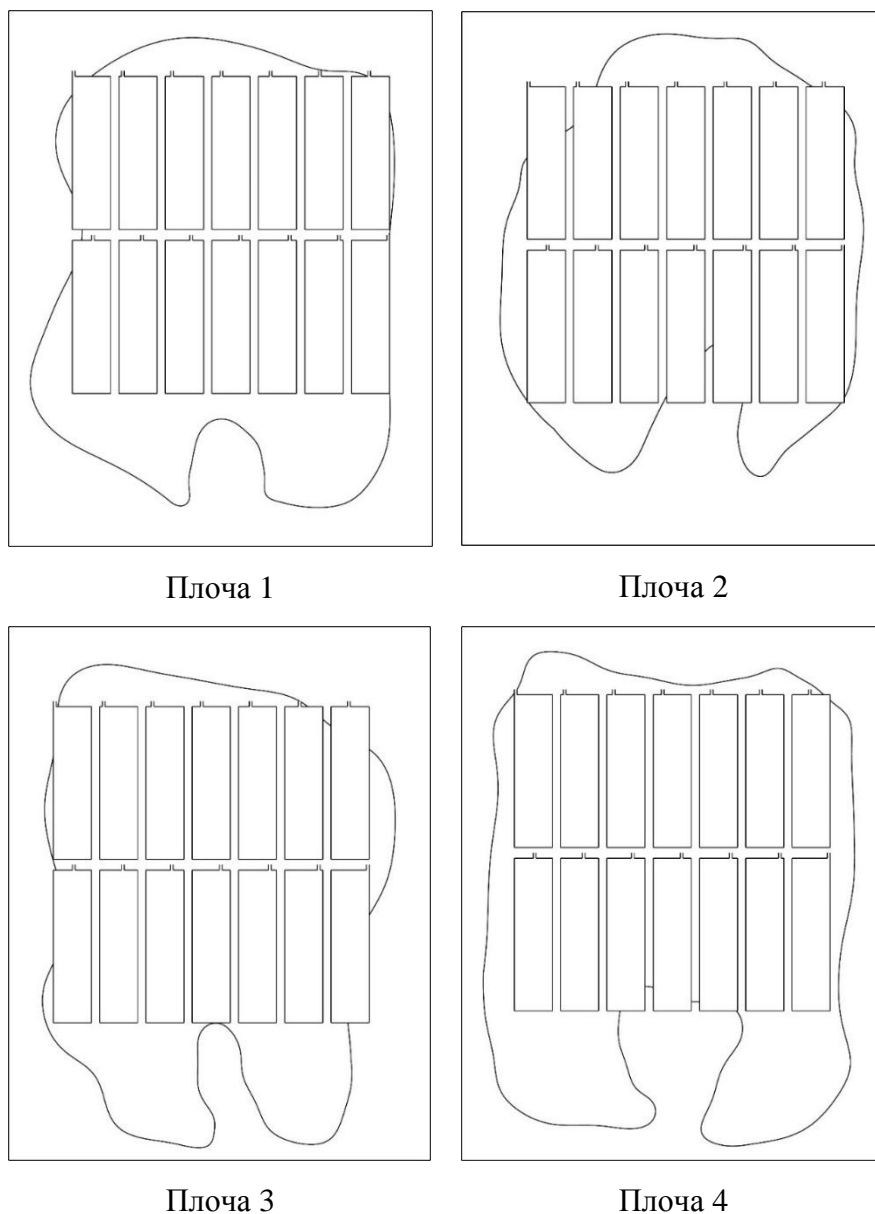


Слика 6.16. Рендгенографски снимци плоча.

На плочи 1 (слика 6.16) откривена је пукотина створена након заваривања док је на плочи 4 откривен лом. На свим плочама откривена је деформација (на ивицама плоча) због присуства дрвене кутије која ограничава запремину експлозива. На том месту није било експлозива па самим тим и недовољно остварен притисак за спајање. Техника радиографског испитивања омогућава поуздано скалирање дефеката, али их не лоцира у потпуности. Да би се надоместио недостатак радиографског испитивања у даљем раду се приступило реализацији испитивања деструктивним методама.

## 6.6. Припрема и сечење узорака

Сечење заварене плоче извршено је с циљем да се узорци припреме за металографска испитивања, испитивање ударне жилавости, пенетрантска испитивања и испитивање на удар (слика 6.17). Резање воденим абразивним млазом нема зоне утицаја топлоте (ЗУТ), обрада се врши без ојачавања материјала, стварања отровних гасова, савијања и топљења, тако да су то главни разлози за одабир овог начина сечења плоча и припреме узорака. Брзина сечења износила је 50 mm/min, притисак 3800 bar, потрошња абразивног материјала 250 g/min и 1,5 l/min воде. План сечења је приказан на слици 6.17.



Слика 6.17. План сечења плоча.

Приликом детонације у процесу експлозивног заваривања плоче су се деформисале у значајној мери. Из тог разлога предмер епрувета је 14×14×56 mm. Накнадним глодањем и брушењем добијају се димензије епрувета 10×10×55 mm.

Исечени узорци су обележени бројевима. Први број означава број плоче, док други број означава позицију узорка. Нумерација узорка је приказана на слици 6.18.



Слика 6.18. Нумерација исечених узорка.

Након што су узорци исечени воденим абразивним млазом, узорци су извађени. Делови плоче који су остали су такође нумерисани на исти начин (слика 6.19а). Делови су исечени тестером уз хлађење са намером за употребу за евентуална даља металографска испитивања (слика 6.19). На слици 6.20 приказани су узорци спремни за даљу механичку обраду.



a)



b)

Слика 6.19. Нумерација и сечење осталих делова.





Слика 6.20. Узорци спремни за даљу механичку обраду.

У горњој зони плоче је дошло до формирања стабилног детонационог таласа. За испитивања која предстоје првенствено су коришћени узорци у тој зони, даљи од места иницирања експлозива. Узорци ближи месту иницирања експлозива остављени су у резерви и за будућа истраживања.

## 6.7. Резултати испитивања методом течним пенетрантима

Испитивање обојеним течним пенетрантима експлозивно заварене плоче челика (угљенични/алатни) урађено је пенетрантским системом ПЕд према стандарду SRPS EN ISO 3452-1 у лабораторији Технолошко-металуршког факултета у Београду.

Температура испитивања износила је 23°C, док је осветљење површине за испитивање износило 750 lx. Обим испитивања је 100% завареног споја укључујући ZUT (зону утицаја топлоте). Стање испитиване површине: очишћено. Коришћени пенетрантски систем приказан је на слици 6.21. У табели 6.4 дати су параметри испитивања.

Табела 6.4. Параметри испитивања

ОПРЕМА / ПАРАМЕТРИ ИСПИТИВАЊА			
Бр.	Преносиви спрејеви	Шаржа	Време (min)
1	MR68C - Пенетрант	68C/1092 A	20 min
2	MR70 - Развијач	70/1292 A	15 min
3	MR79 - Чистач	79/1298 A	/
Мерна опрема		Бр. уверења о еталонирању	
LUX Metar AH6384		057/021 LK_03 од 08.06.2021.	
Сушење површине:	Амбијентално	Уклањање пенетрантског система:	Вода, чистач



Слика 6.21. Пенетрантски систем.

Пре испитивања течним пенетрантима, површина се мора очистити и осушити. Након тога, погодан пенетрант се наноси на испитну површину који улази у отворене површинске неправилности. Након времена потребног за продирање, вишак пенетранта се уклања са површине, а затим се наноси развијач који апсорбује пенетрант заостао у неправилности и даје видљиву индикацију.

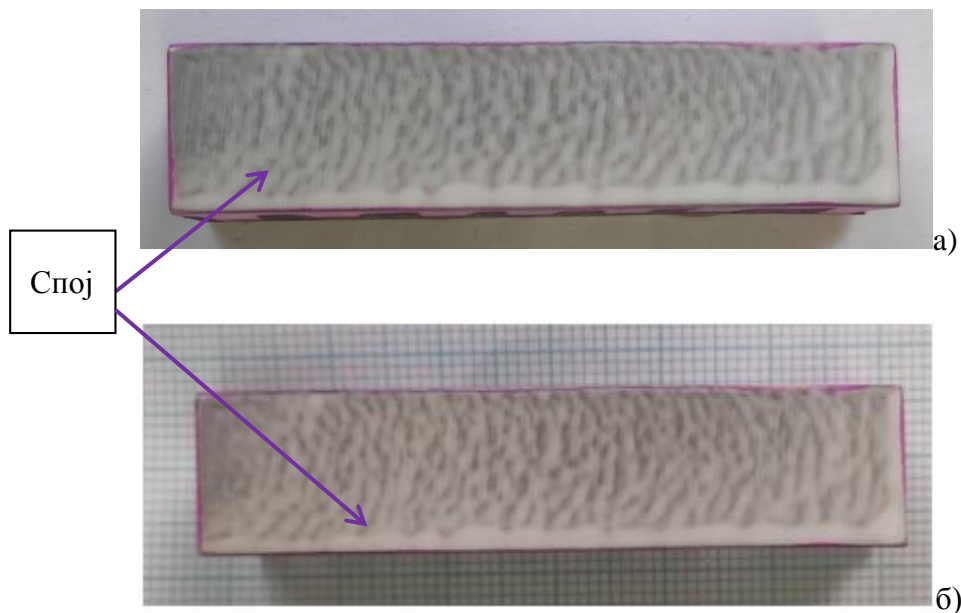
Очишћени узорци напрскани су обојеним пенетрантима (слика 6.22а) и након времена продирања од 20 минута скинут је вишак пенетранта са површине крпом без длачица (слика 6.22б) и узорци су остављени да се осуше на амбијенталном ваздуху пре наношења течног развијача.



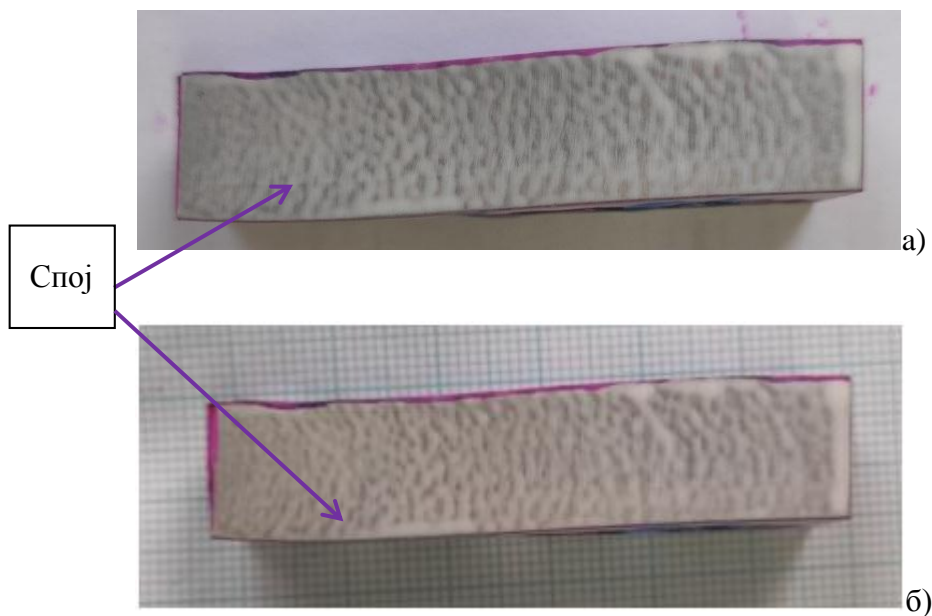
Слика 6.22. а) Пенетрант на површини узорака за испитивање,  
 б) Узорци за испитивање редом узорци 1-9,3-9,4-9,2-13.

Исечени узорци су обележени бројевима. Први број означава број плоче, док други број означава позицију узорка.

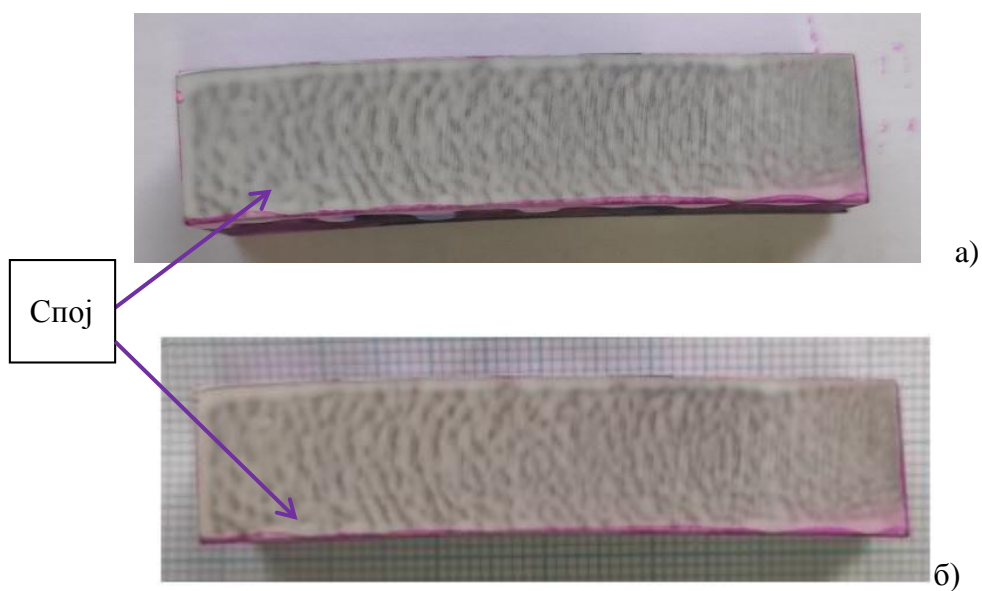
На сликама 6.23 до 6.26 означеним са а) приказани су узорци после 2 min. од наношења течног развијача, док на сликама означеним са б) приказани су узорци после 20 min. од наношења течног развијача *MR70* узорака 1-9,2-13,3-9,4-9, респективно. Све приказане слике потврђују да су спојеви добро заварени, нема видљивих индикација. Узорак 2-13 и 4-9 након времена за развијање и не показује јасну границу самог споја, што може бити индикација да је поприлично дошло до мешања материјала.



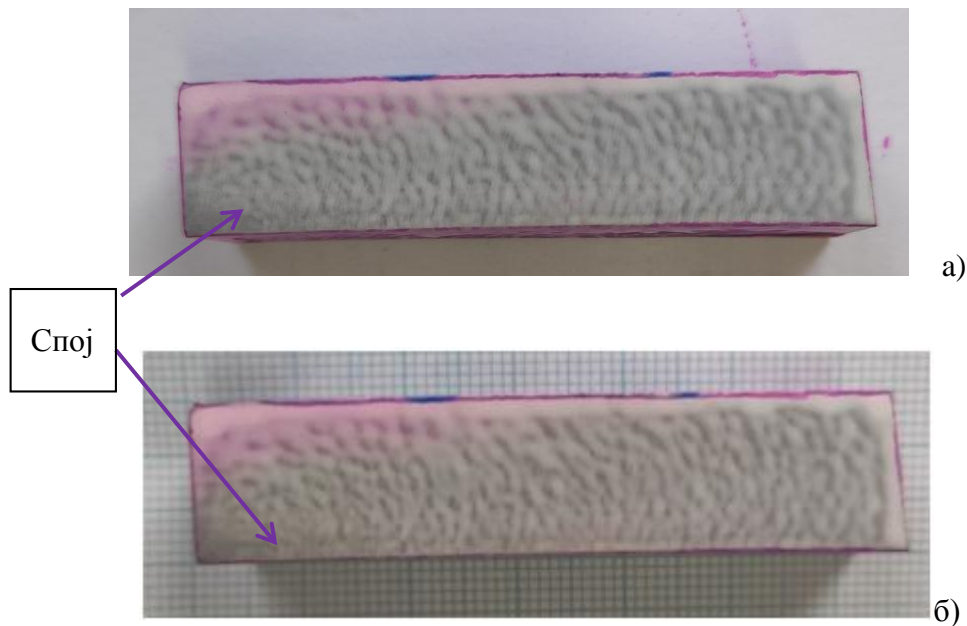
Слика 6.23. а) 1-9 узорак након 2 минута наношења влажног развијача, б) 1-9 узорак након 20 минута наношења влажног развијача.



Слика 6.24. а) 2-13 узорак након 2 минута наношења влажног развијача, б) 2-13 узорак након 20 минута наношења влажног развијача.



Слика 6.25. а) 3-9 узорак након 2 минута наношења влажног развијача, б) 3-9 узорак након 20 минута наношења влажног развијача.



Слика 6.26. а) 4-9 узорак након 2 минута наношења влажног развијача, б) и 4-9 узорак након 20 минута наношења влажног развијача.

## 6.8. Термичка обрада алатног челика

Термичка обрада завареног споја извршено је у фирми „UNIOR Components“ у Крагујевцу. Жељена тврдоћа алатног челика је од 55 HRC до 60 HRC. Термичка обрада је урађена уобичајеном процедуром, односно добијени узорци су посматрани као да су од једног материјала, односно од алатног челика. Каљење је урађено у соном купатилу, након чега су узорци подвргнути процесу отпуштања. Процес каљења извршен је у следећим корацима (ROVALMA, S.A., 2023.):

- Загревање од собне температуре до 500 °C (у току 2 сата),
- Држати за хомогенизацију на 500 °C (2 сата),
- Загревање од собне температуре до 850 °C (у току 2 сата),
- Држати за хомогенизацију на 850 °C (2 сата),
- Загревање до температуре аустенитизације (1020-1080 °C),
- Држати на температури аустенитизације (најмање 20 минута) и
- Хлађење у соном купатилу на 500 °C.

Циклус отпуштања је спроведен одмах након каљења, када је комад охлађен на собну температуру. Отпуштање се извршено у следећим корацима:

- Споро загревање на температуру попуштања одмах након каљења. Температура отпуштања износи 450 до 525 °C у зависности од тврдоће,
- Препоручује се време држања од 2.5 минута за сваки милиметар дебљине, са минималним временом држања од једног сата,
- Хлађење на ваздуху и

- Препоручено је челик попуштати барем два пута.

Након термичке обраде узорци су очишћени пескарењем стакленим перлама. Вредности тврдоће мерене Rockwell-овом методом у предузећу „UNIOR Components“, приказане су у табели 6.5.

Табела 6.5. Вредности тврдоће добијене Rockwell-овом методом.

Редни број	I мерење HRC	II мерење HRC	III мерење HRC	Средња вредност HRC
1	58,621	58,312	59,001	58,645

## 6.9. Металографска испитивања

Због неадекватног одабира експлозива, односно превелике брзине детонације, у случају заваривања опружног челика, поред карактеристичног изгледа таласастог споја, дошло је до већег броја недозвољених дефеката. Дефекти такве врсте нису уочени у случају заваривања алатног челика. Део добијених резултата може се видети у раду (Lazarević, 2020). Из тог разлога, у овом поглављу су дати резултати металографије Опружног/Конструкционог и Алатног/Конструкционог челика. На овај начин ће се створити јаснија слика о томе шта се дешава у случају погрешног одабира експлозива, и како металографска испитивања могу помоћи у карактеризацији добијеног споја у процесу експлозивног заваривања.

### 6.9.1. Металографска испитивања (опружни/конструкциони челик)

Металографски узорци (2-4; 3-4; 4-4 и 5-4), приказани на слици 6.27.

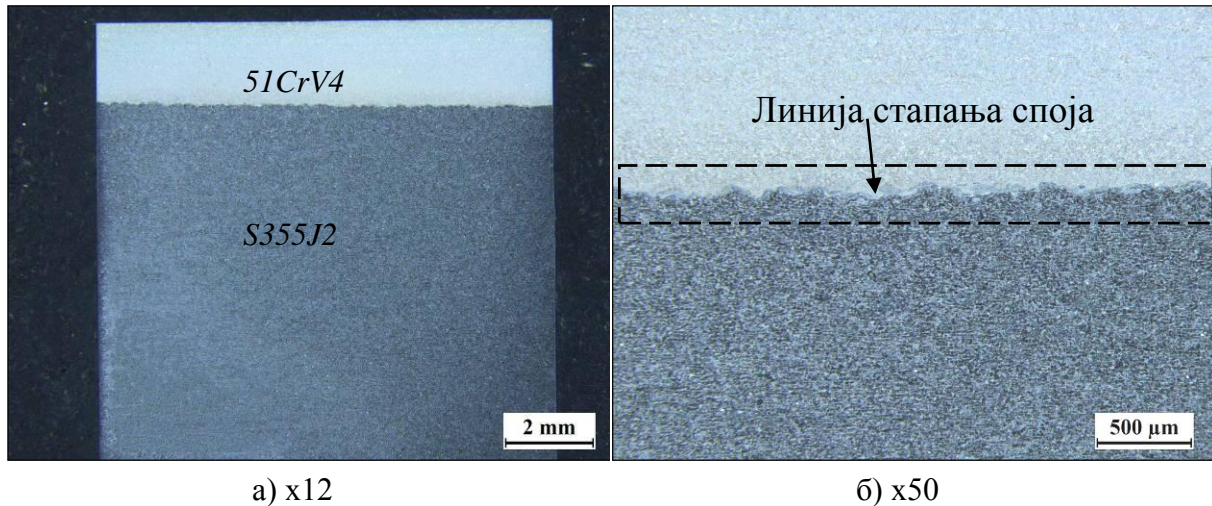


Слика 6.27. Металографски узорци (Опружни/Конструкциони челик).

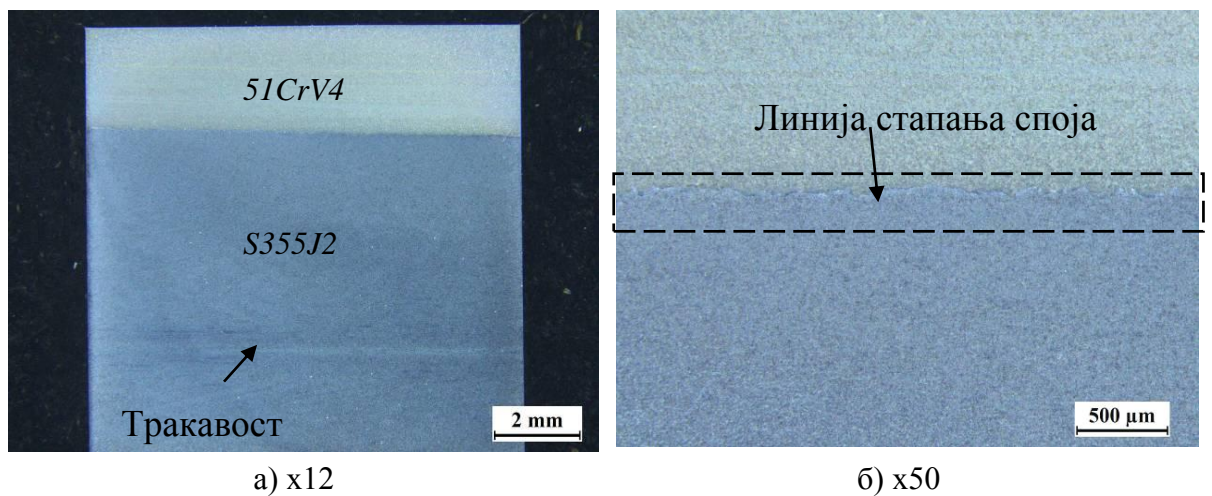
Металографски узорци су након грубе и fine механичке припреме (брушења и полирања) нагнжени у 3%-тном ниталу. Узорци су испитани за макроструктуру на стерео

микроскопу типа „Leica“, за микроструктуру на оптичком микроскопу типа „Leitz Metalloplan“, опрењеног камером „DFC 295“ и софтвером за обраду слике „LAS 4.3.1“ и на скенирајућем електронском микроскопу типа „JEOL 6010LV“.

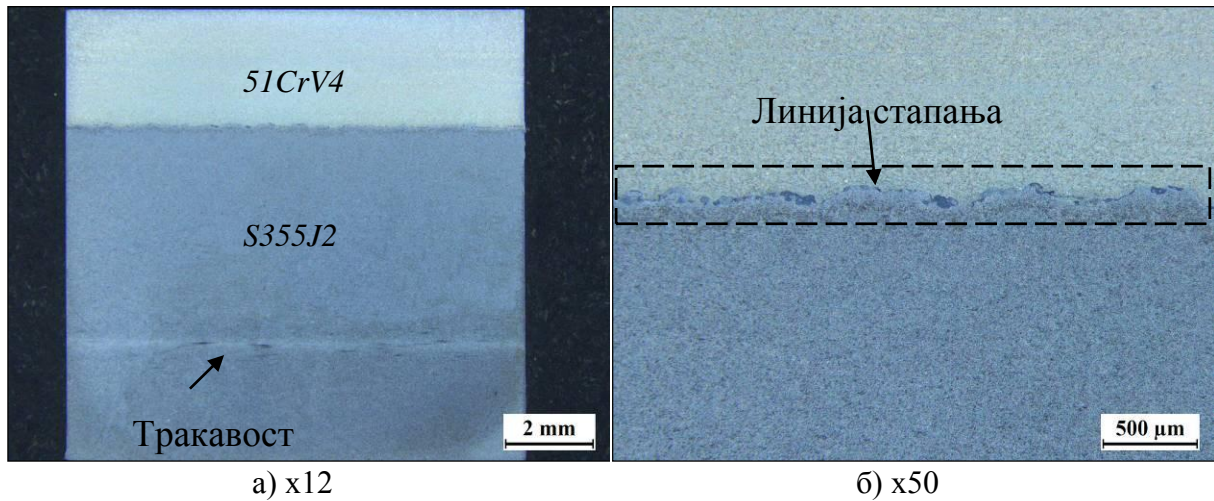
Типичан облик линије стапања завареног споја је таласаст, са таласима повијеним у смеру дејства силе изазване експлозијом (слике 6.28, 6.29, 6.30 и 6.31) и са међусобним мешањем једног метала у други метал. Око линије стапања констатовани су непровари, прслине, заостали оксиди, зоне мешања оба метала и др.



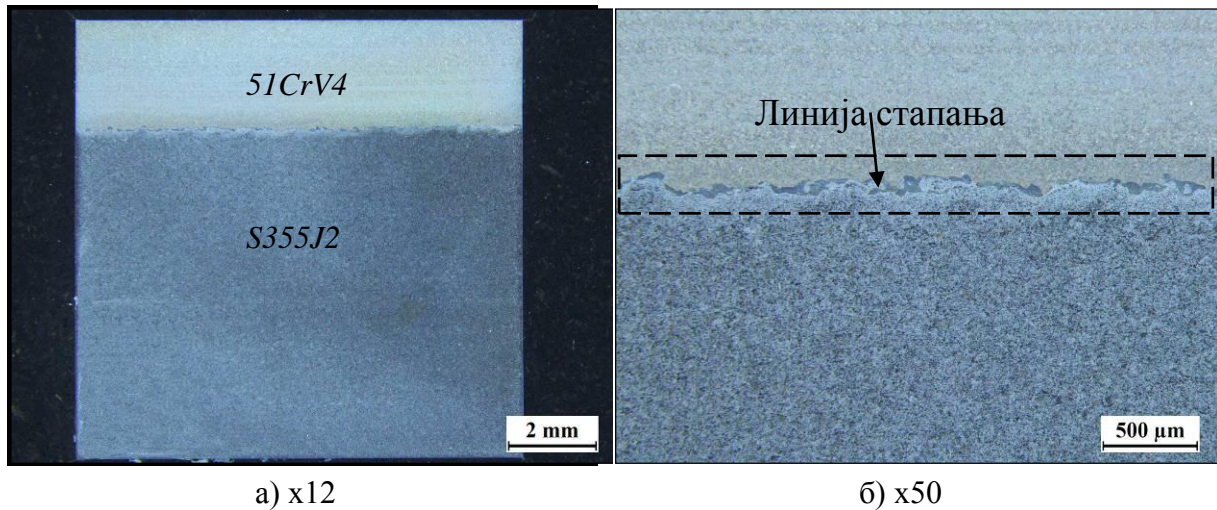
Слика 6.28. Заварени спој експлозијом, узорак 2-4: а) излед макроструктуре, б) линија стапања – таласаста веза.



Слика 6.29. Заварени спој експлозијом узорак 3-4: а) излед макроструктуре, б) линија стапања – таласаста веза.



Слика 6.30. Заварени спој експлозијом, узорак 4-4: а) излед макроструктуре, б) линија стапања – таласаста веза

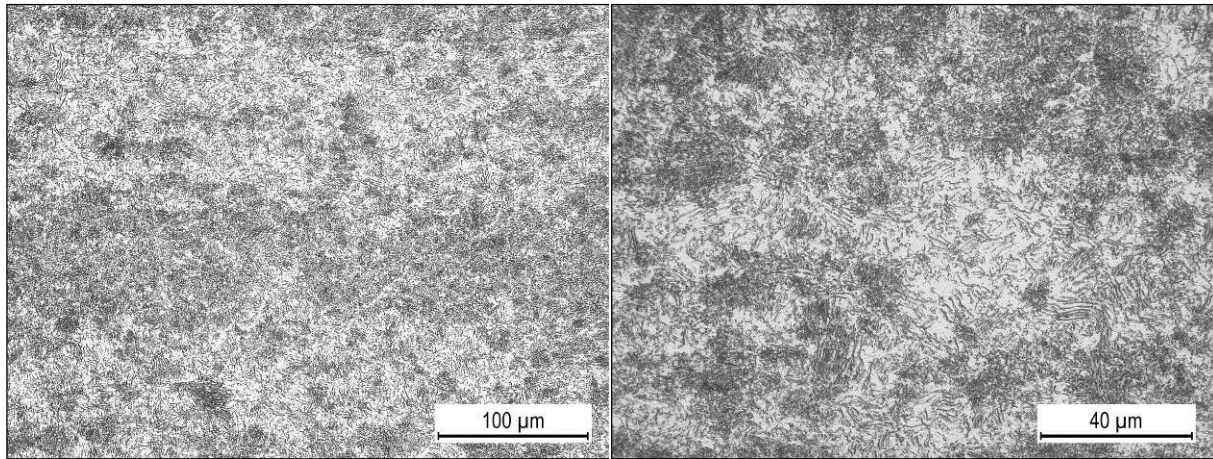


Слика 6.31. Заварени спој експлозијом, узорак 5-4: а) излед макроструктуре, б) линија стапања – таласаста веза

У узорцима 2-4, 3-4, 4-4 и 5-4 горња плоча је израђена од челика ознаке *51CrV4* према стандарду *SRPS EN 10083-3*, док је доња плоча завареног споја израђена од челика *S355J2* према стандарду *SRPS EN 10025-2*.

У свим узорцима, микроструктура челика *51CrV4* се састоји од перлитних розета и перлитних ламела и малог удела ферита (слике 6.32, 6.33, 6.34 и 6.35).

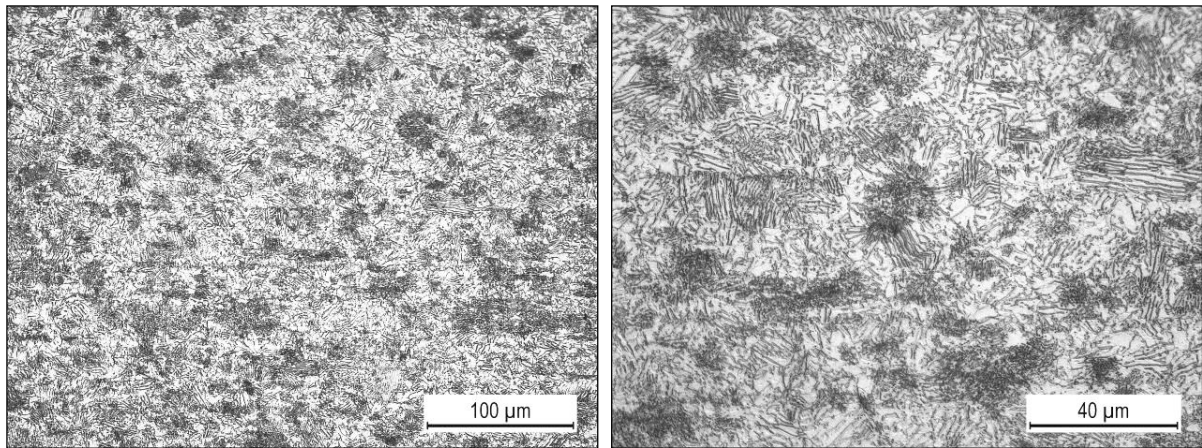




а) челик  $51CrV4$ , х200

б) челик  $51CrV4$ , х500

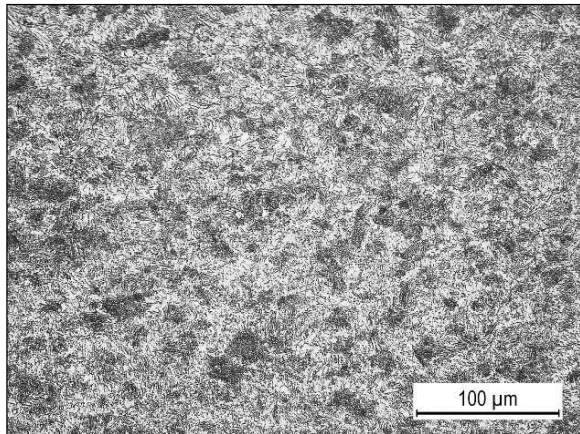
Слика 6.32. а), б) Микроструктура челика  $51CrV4$ , узорак 2-4.



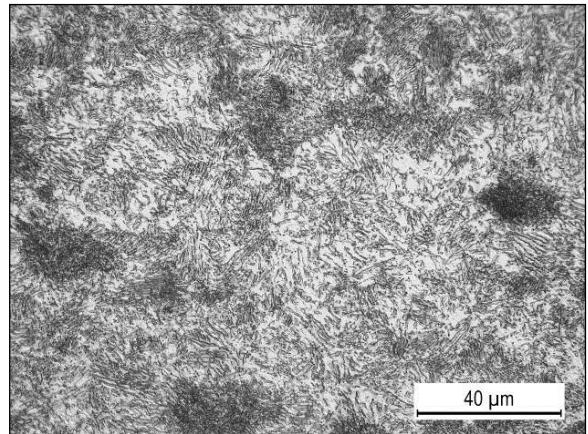
а) челик  $51CrV4$ , х200

б) челик  $51CrV4$ , х500

Слика 6.33. а), б) Микроструктура челика  $51CrV4$ , узорак 3-4.

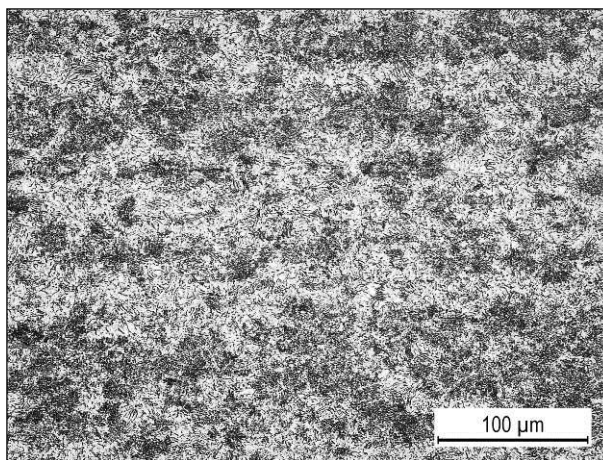


а) челик *51CrV4*, x200

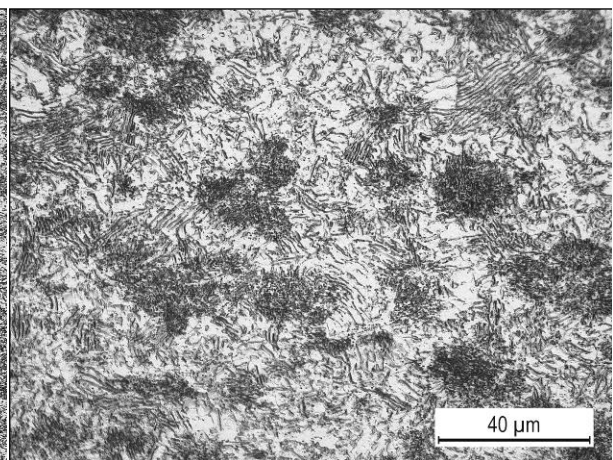


б) челик *51CrV4*, x500

Слика 6.34. а), б) Микроструктура челика *51CrV4*, узорак 4-4.



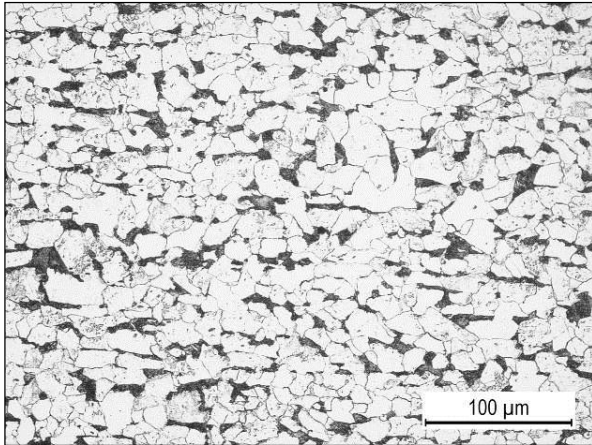
а) челик *51CrV4*, x200



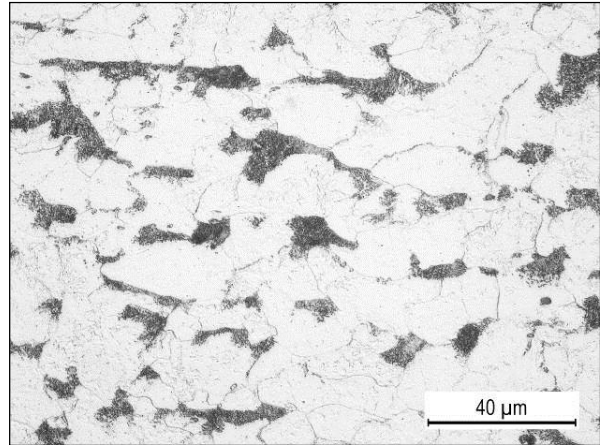
б) челик *51CrV4*, x500

Слика 6.35. а), б) Микроструктура челика *51CrV4*, узорак 5-4

Микроструктура челика *S355J2* састоји од феритно –перлитне структуре глобуларном облику (сфероидизација перлита), (слике 6.36, 6.37, 6.38 и 6.39). Секундарна линијска структура, односно изражена тракавост је констатована у узорцима 3-4 и 4-4 (слике 6.37г и 6.38г). Тракавост је последица производње челика.

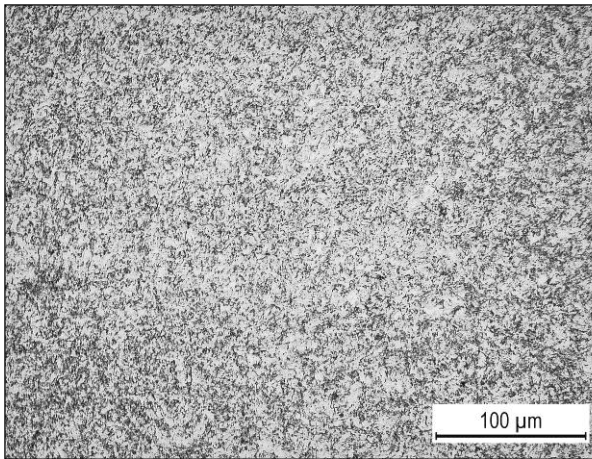


а) челик *S355J2*, x200

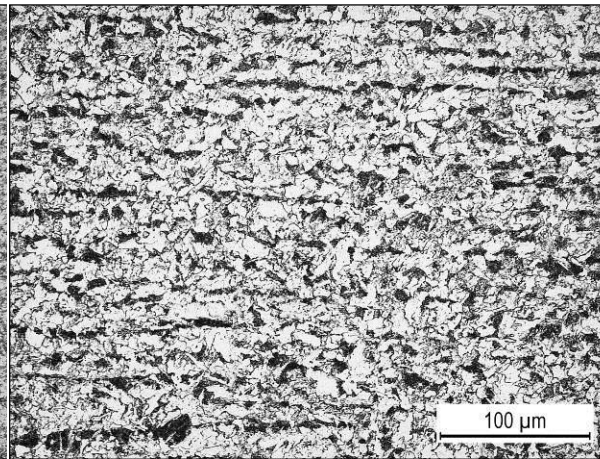


б) челик *S355J2*, x500

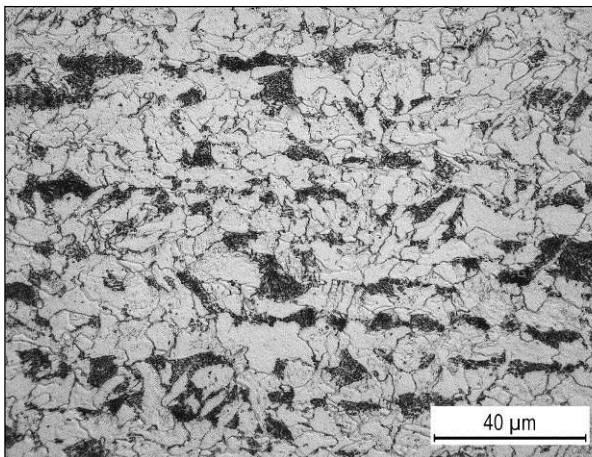
Слика 6.36. а), б) Микроструктура челика *S355J2*, узорак 2-4.



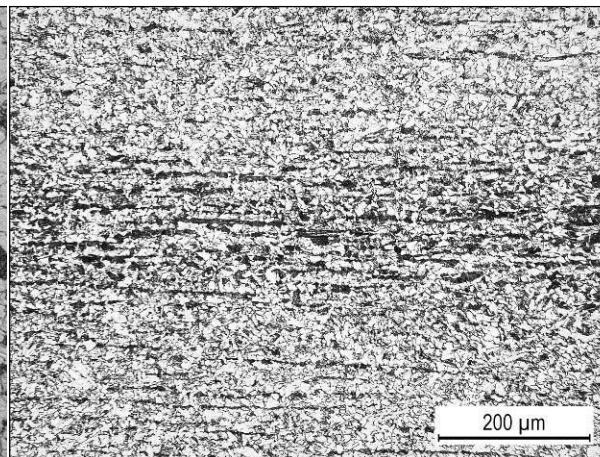
а) испод линије стапања, челик *S355J2*, x200



б) челик *S355J2* средина, x200

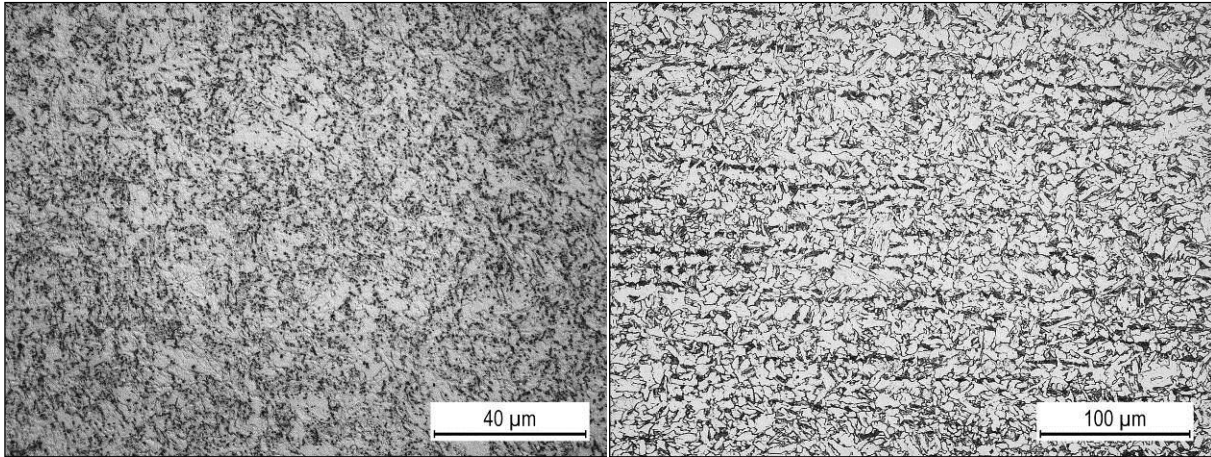


в) челик *S355J2* средина, x500



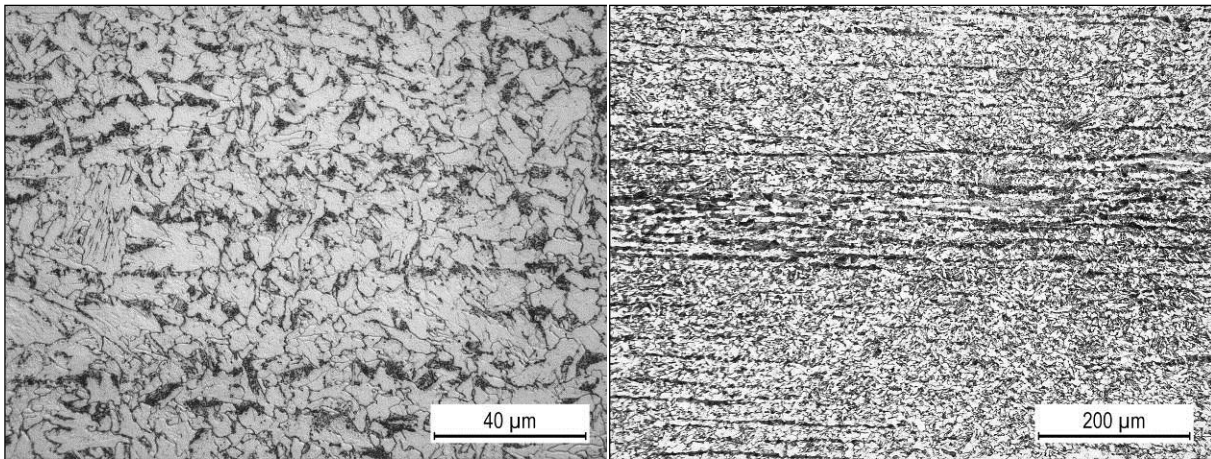
г) челик *S355J2* тракавост, x100

Слика 6.37. а)÷ г) Микроструктура челика *S355J2* узорака 3-4.



а) испод линија стапања, челик *S355J2*,  
x500

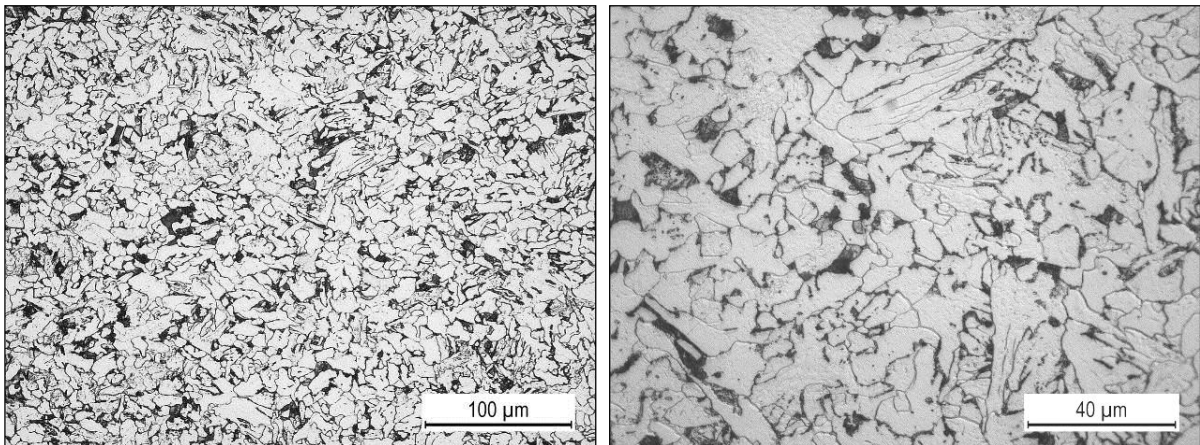
б) челик *S355J2* средина, x200



в) челик *S355J2* средина, x500

г) челик *S355J2* тракавост, x100

Слика 6.38. а)÷г) Микроструктура челика *S355J2*, узорак 4-4



а) челик *S355J2*, средина, x200

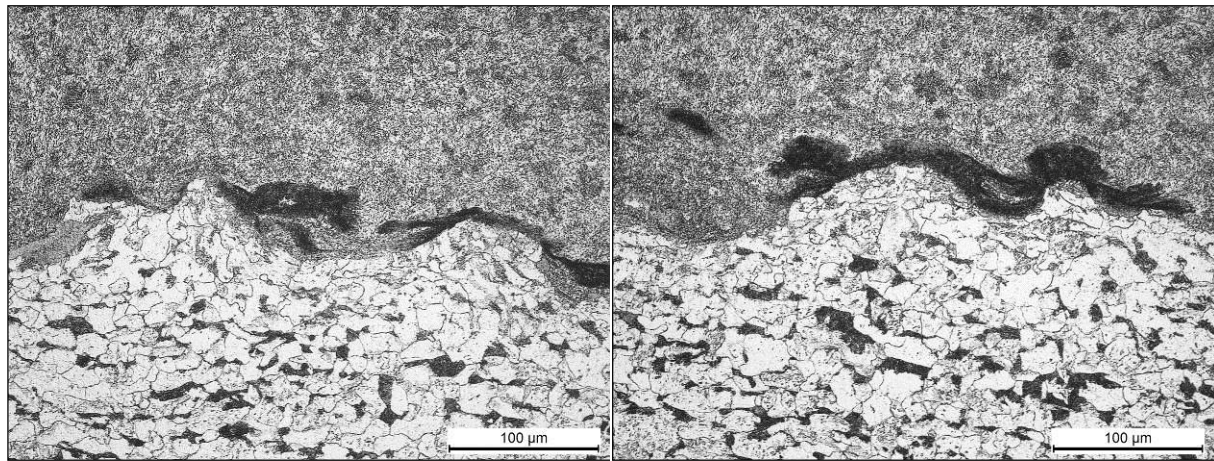
б) челик *S355J2* средина, x500

Слика 6.39. а), б) Микроструктура челика *S355J2*, узорак 5-4.

Изнад линије стапања микроструктура горње плоче челика *51CrV4* се састоји од карбида (цементит) у глобуларном облику и ферита. Испод линије стапања микроструктура

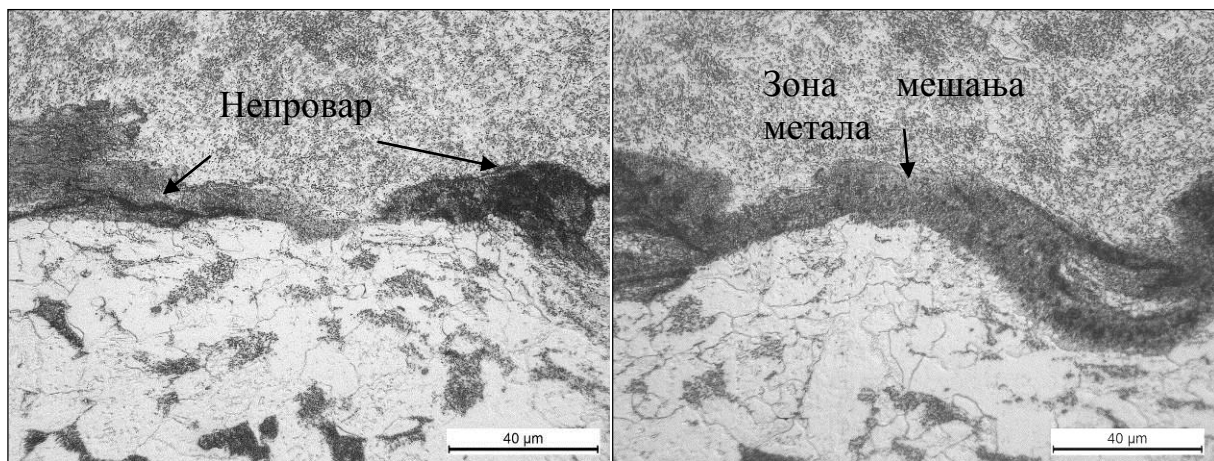
челика S355J2 се састоји од ферита и перлита у глобуларном облику (сфероидизација перлита) (слика 6.30, 6.35, 6.40 и 6.44).

Зона сфероидизације перлита је дужине око 60  $\mu\text{m}$  испод линије споја. Констатовани су непровари и зоне мешања оба метала (слика 6.40 и 6.41).



а) x200

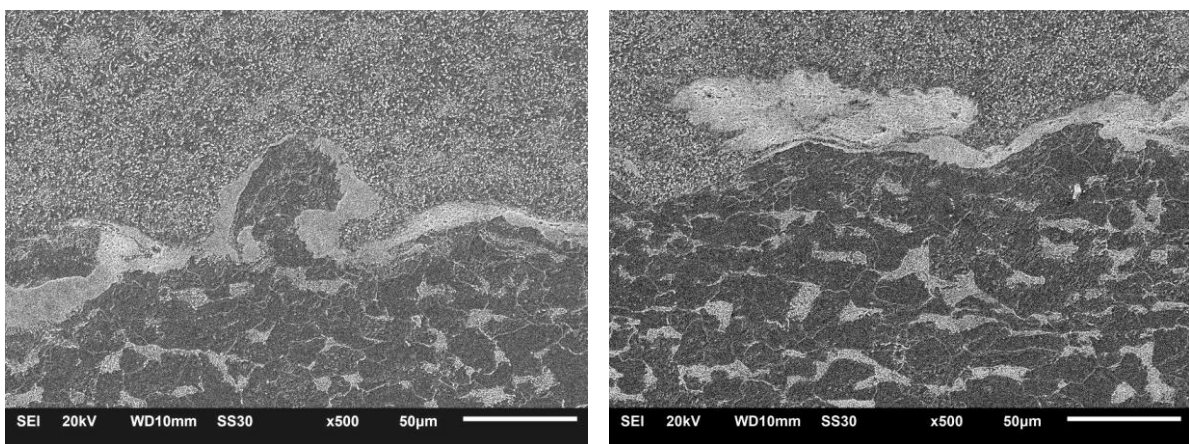
б) x200



в) x500

г) x500

Слика 6.40. а)÷г) Линија стапања – узорак 2-4.

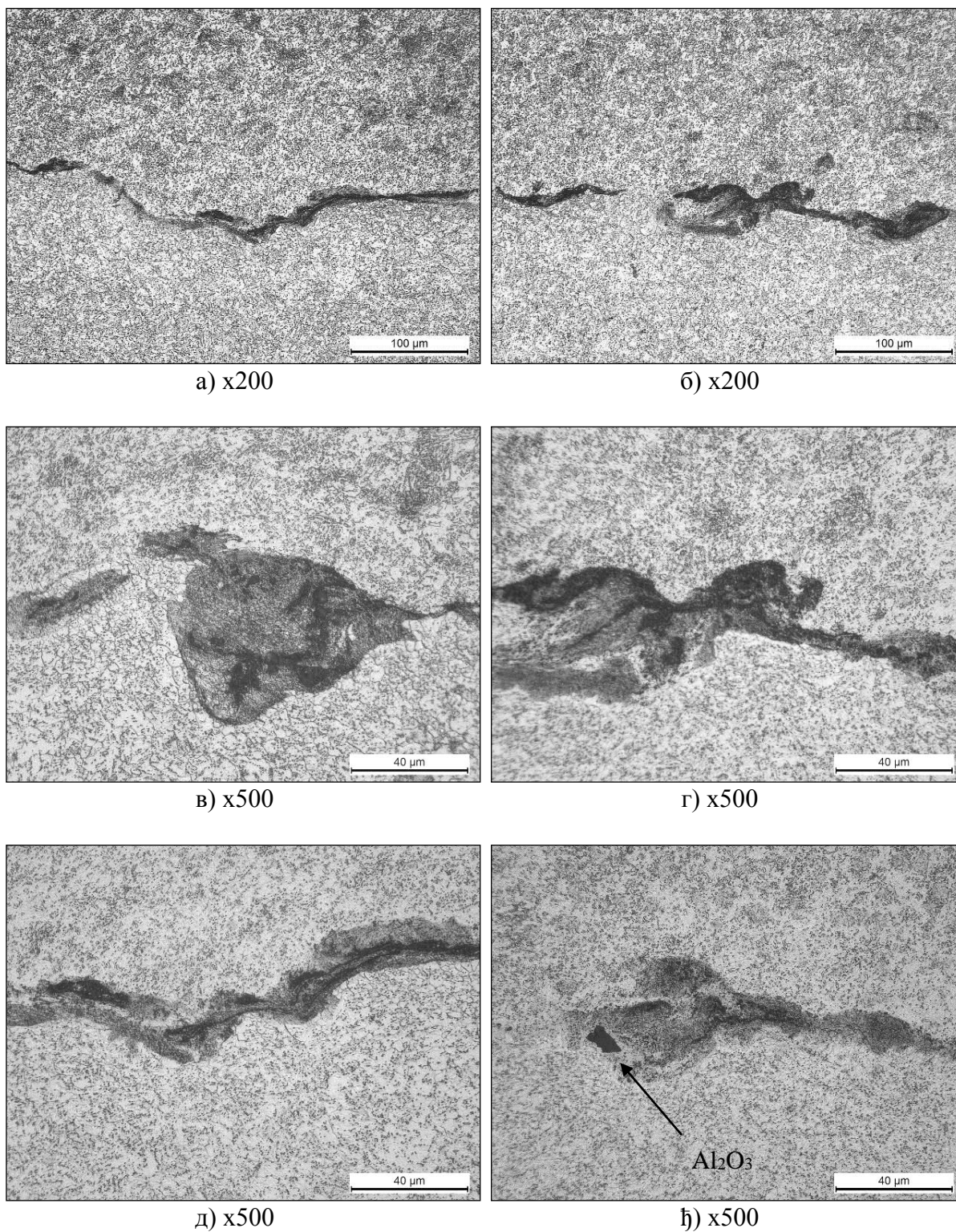


а)

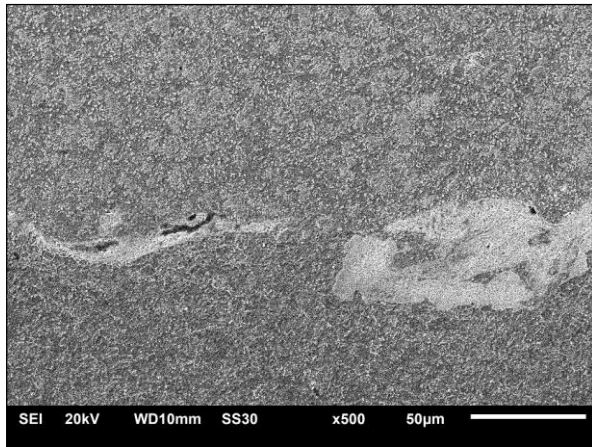
б)

Слика 6.41. а), б) Линија стапања узорка 2-4, SEM.

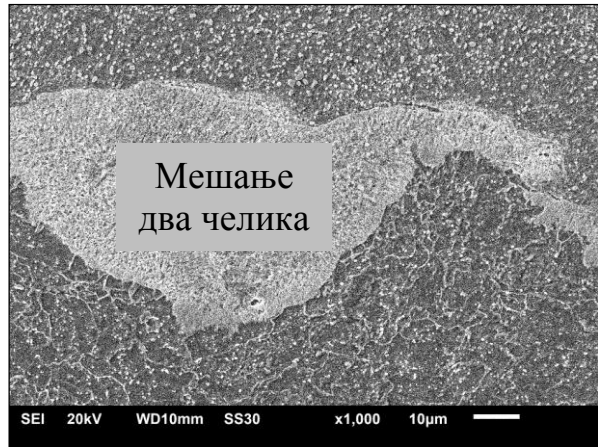
Зона сфероидизације перлита је већа област, дужине око 600  $\mu\text{m}$  испод линије споја(слика 6.42). Константовани су непровари (слика 6.42 и 6.43в) и зоне мешања оба челика, слика 6.42 и 6.43. У линији стапања запажен је неметални укључак – алуминијумски оксид  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , слика 6.42ђ.



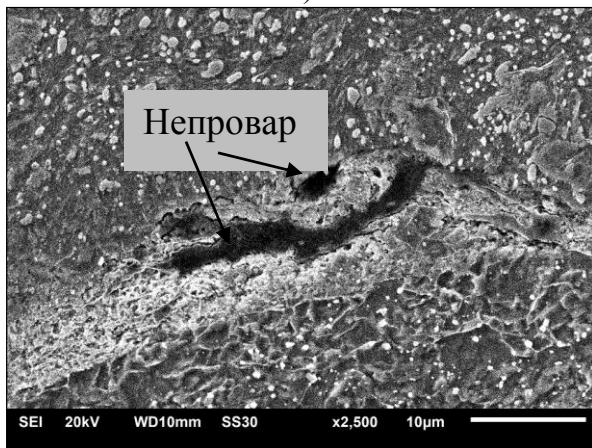
Слика 6.42. а)÷ђ) Линија стапања – узорак 3-4.



а)



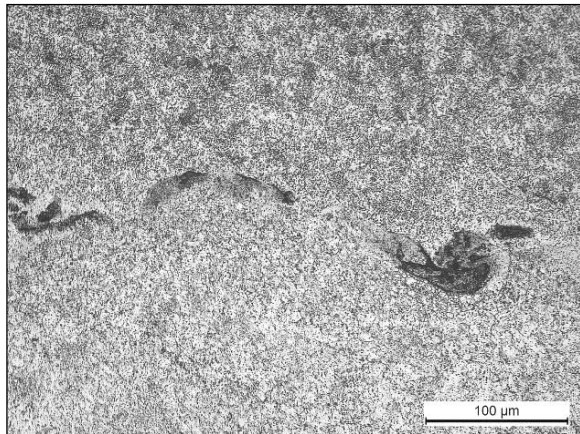
б)



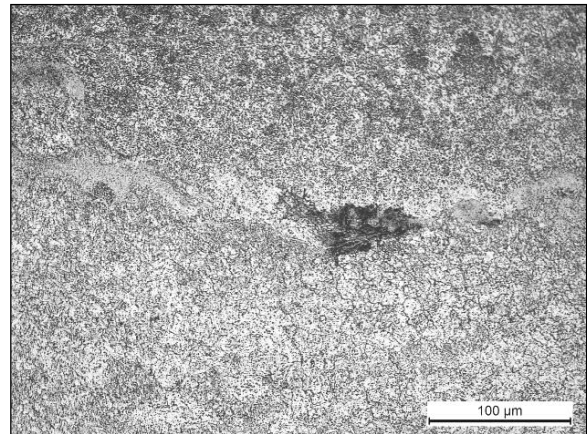
в)

Слика 6.43. а) Линија стапања, узорак 3-4; б) мешање два челика у линији стапања; в) непровар у линији стапања, *SEM*.

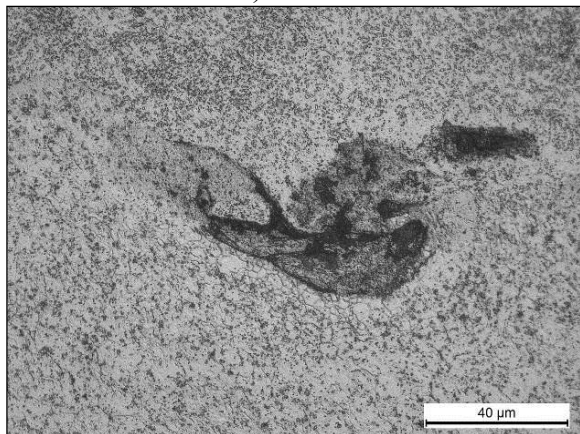
Констатовано је да је зона сфероидизације перлита већа област, дужине око 1200  $\mu\text{m}$  испод линије споја (слика 6.44).



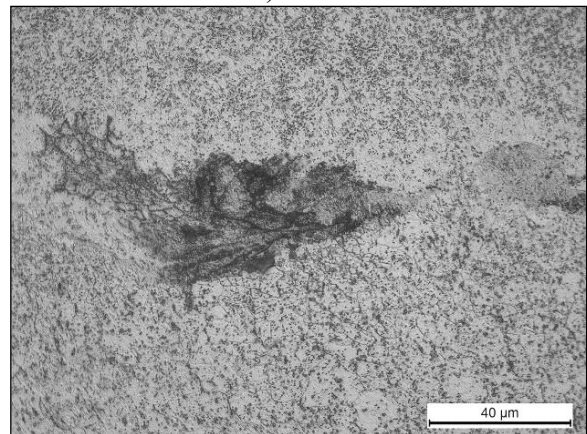
а) x200



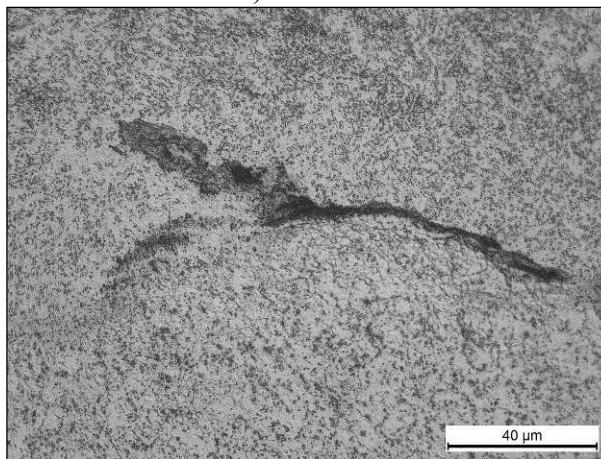
б) x200



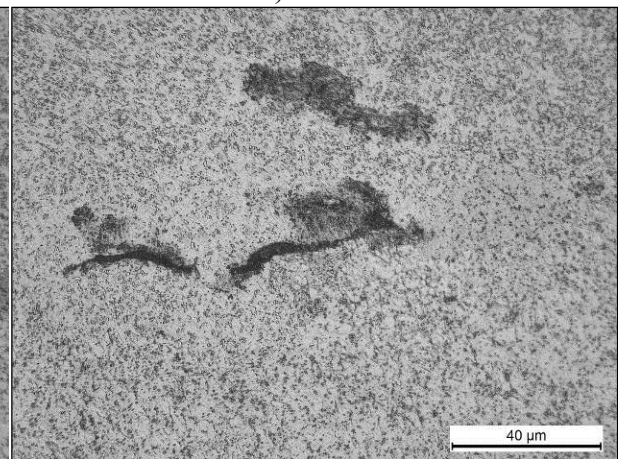
в) x500



г) x500



д) x500

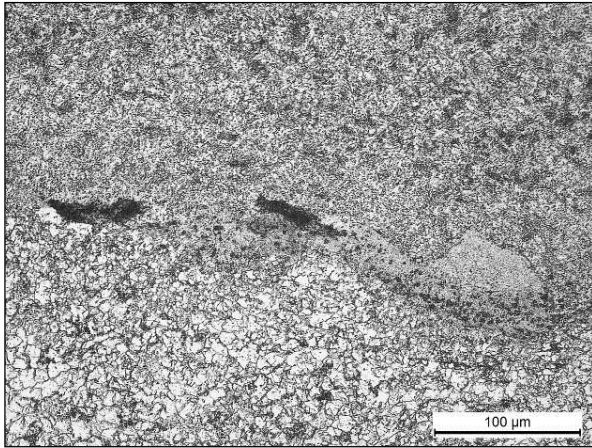


е) x500

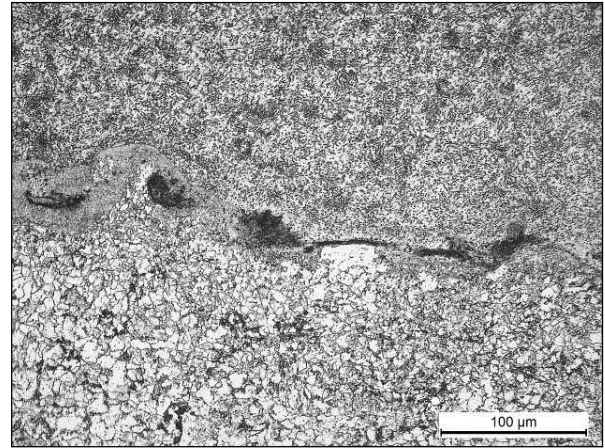
Слика 6.44. а)÷е) Линија стапања – узорак 4-4

Констатовано је да је зона сфероидизације перлита мања, дужине око 180 μm испод линије споја (слика 6.45).

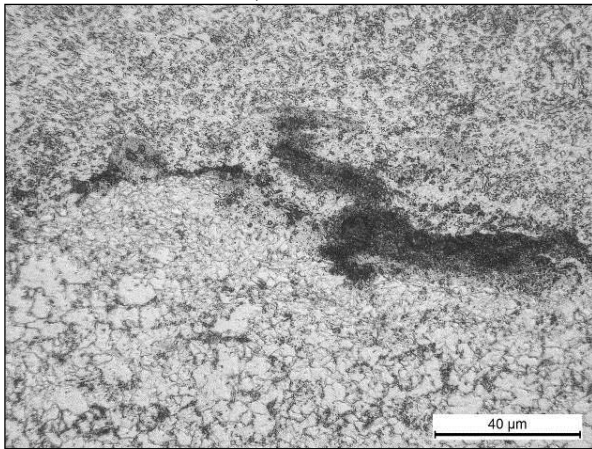




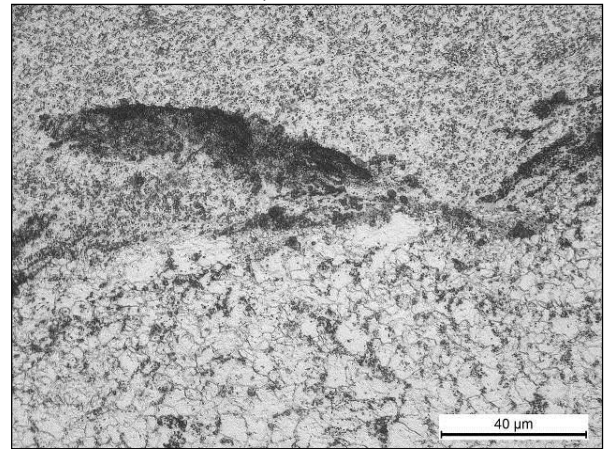
а) x200



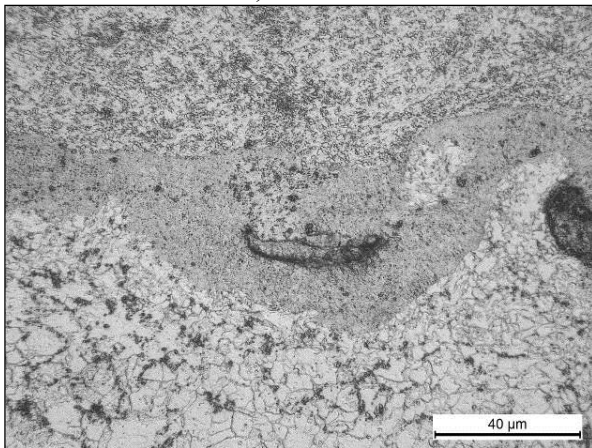
б) x200



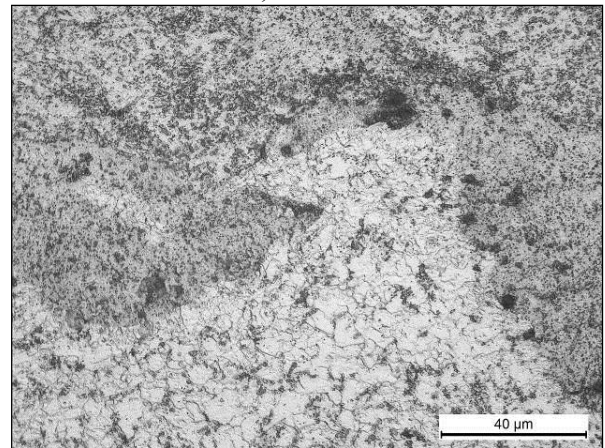
в) x500



г) x500



д) x500



е) x 500

Слика 6.45. а)÷е) Линија стапања – узорак 5-4.

## 6.9.2. Металографска испитивања (алатни/конструкциони челик)

Металографски узорци 1-10; 2-12; 3-11 и 4-11 су приказани на слици 6.46.

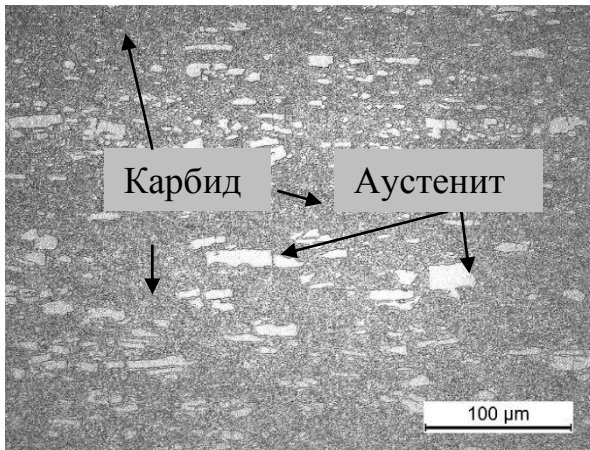


Слика 6.46. Металографски узорци(Алатни/Конструкциони челик)

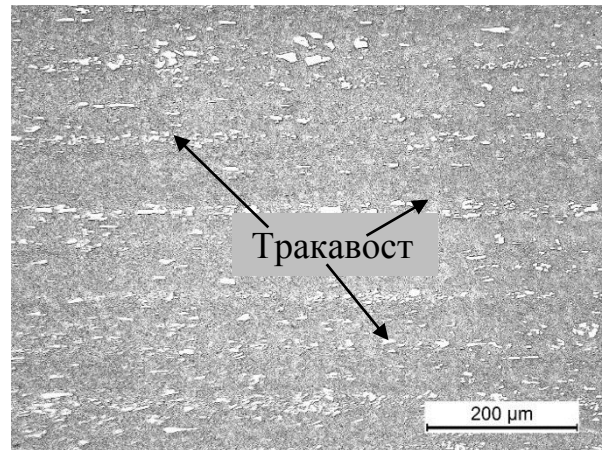
Након грубе и fine механичке припреме (брушења и полирања) узорци су нагрижени у 3%-тном ниталу и микроструктура је посматрана на стерео микроскопу типа “Leica”, и на оптичком микроскопу „Leitz Metalloplan” са камером „DFC 295” и софтвером за обраду слике LAS 4.3.1.

Код узорака 1-10, 2-12, 3-11 и 4-11 горња плоча је израђена од челика *X155CrVMo12-1* (*X160CrMoV121*) према стандарду SRPS EN 10083-3, док је доња плоча завареног споја израђена од челика *S355J2* према стандарду SRPS EN 10025-2.

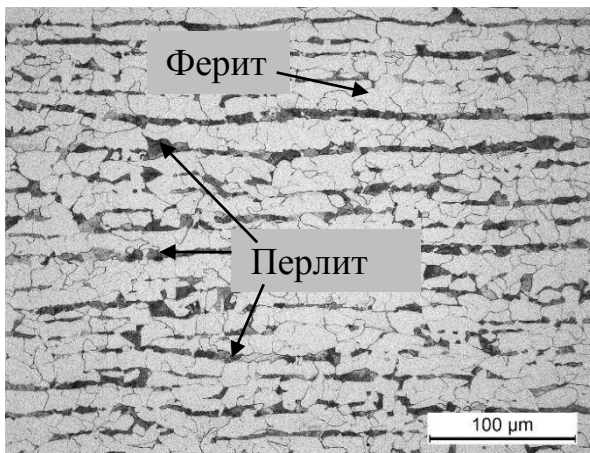
Код свих узорака: 1-10, 2-12, 3-11 и 4-11, микроструктура челика *X155CrVMo12-1* (*X160CrMoV121*) састоји се од основе честице карбида (цементита) у глобуларном облику и аустенита, (слика 6.47а, 6.47б, 6.48а, 6.48б, 6.49а, 6.49б, 6.50а и 6.50б). Челик *X155CrVMo12-1* је у стању који карактерише једнаку структуру зрна средње величине у опсегу од 1 до 5  $\mu\text{m}$  за карбид и 10-40  $\mu\text{m}$  за аустенит. Микроструктура челика *S355J2* се састоји од феритно–перлитне структуре, (слика 6.47в, 6.47г, 6.48в, 6.48г, 6.49в, 6.49г, 6.50в и 6.50г). Челик *S355J2* је у стању који карактерише једнаку структуру зрна средње величине у опсегу од 5 до 10  $\mu\text{m}$  за перлит и 10-20  $\mu\text{m}$  за ферит. Перлитна зрна су у облику тракастих финих структура. Тракавост је последица производње челика односно типична је за материјале који су подвргнути топлом обликовању. Секундарна линијска структура, односно изражена тракавост констатована је у свим узорцима. Слична тракавост може се уочити у раду (Prazmowski, 2017) код експлозивног заваривања титанијума и угљеничног челика.



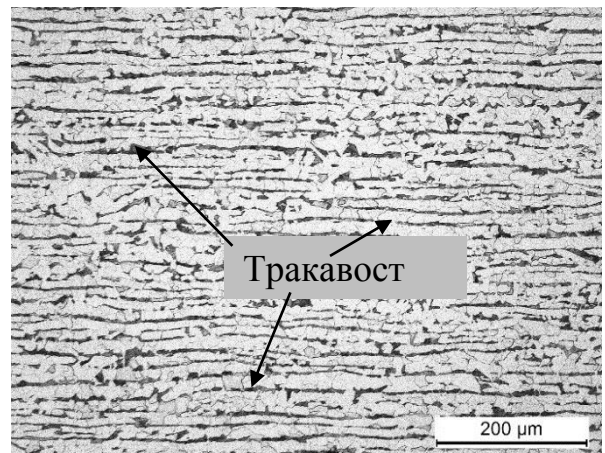
а)



б)

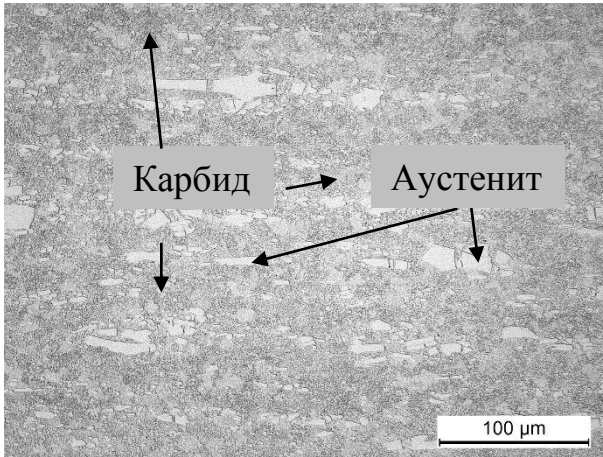


в)

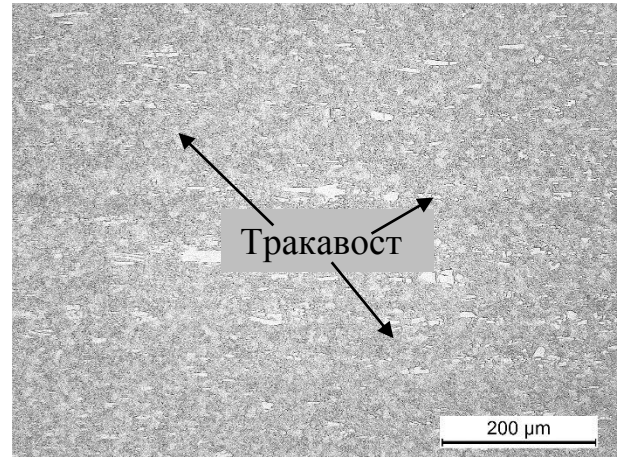


г)

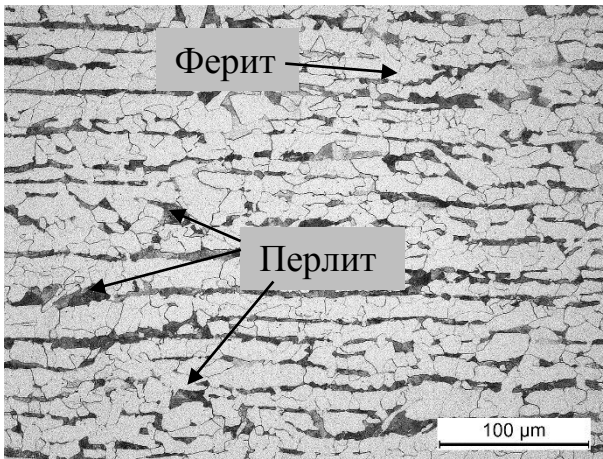
Слика 6.47. а) и б) челик  $X155CrVMo12-1$ ; в) и г) челик  $S355J2$ , узорак 1-10.



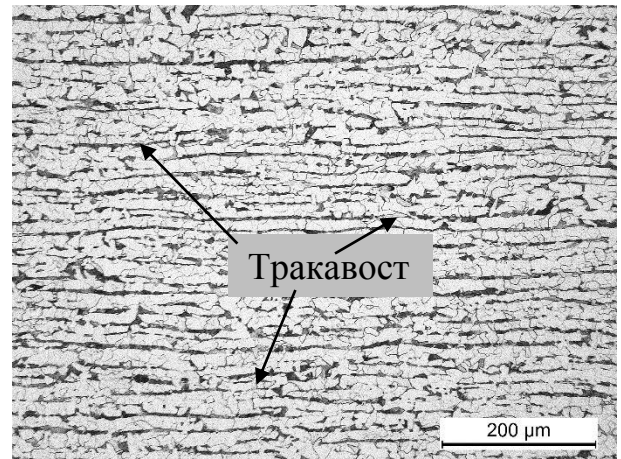
а)



б)

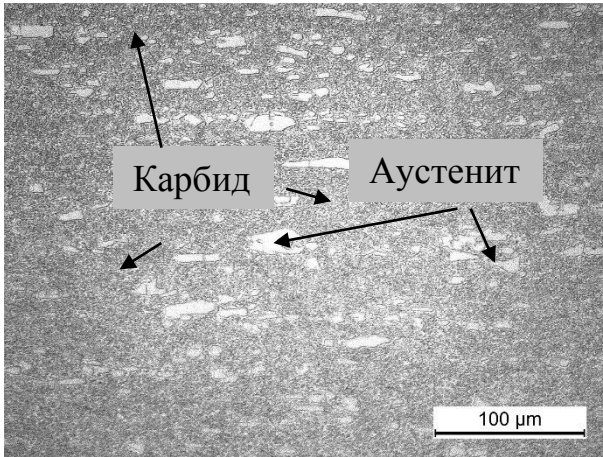


в)

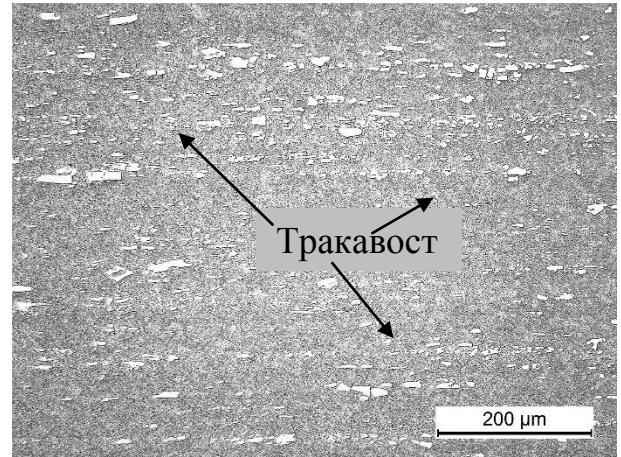


г)

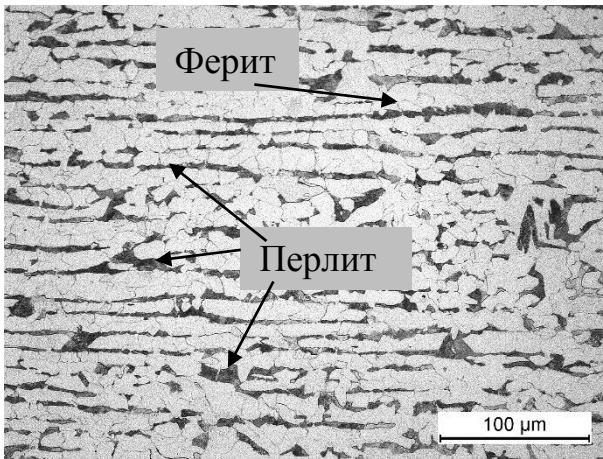
Слика 6.48. а) и б) челик  $X155CrVMo12-1$ ; в) и г) челик  $S355J2$ , узорак 2-12.



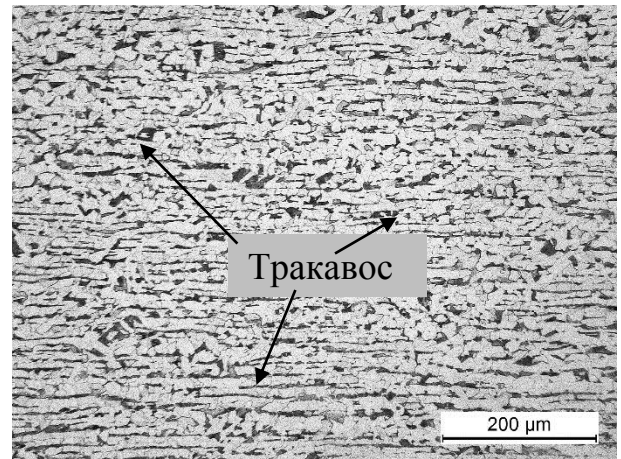
а)



б)

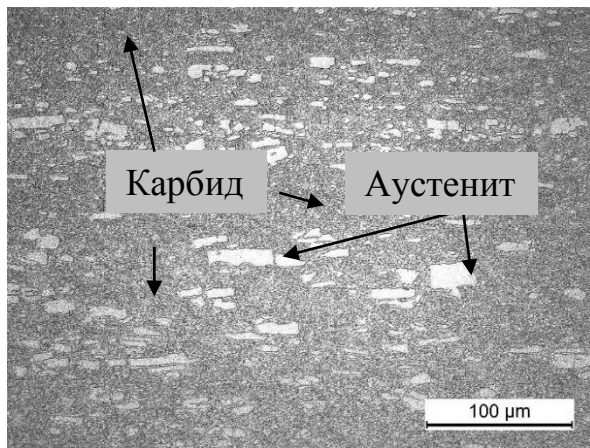


в)

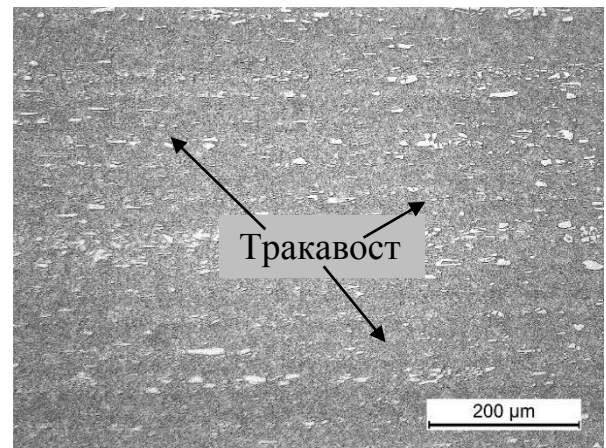


г)

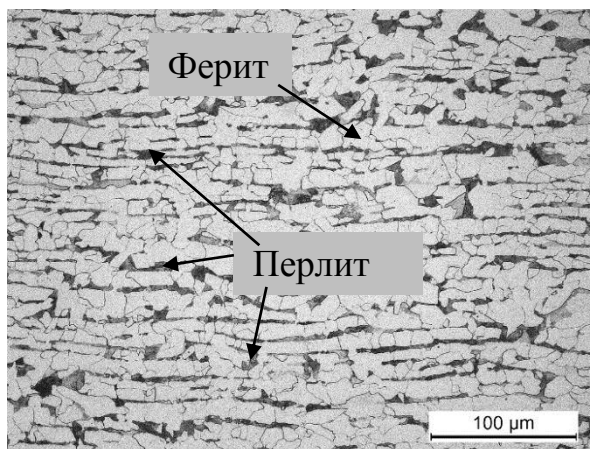
Слика 6.49. а) и б) челик  $X155CrVMo12-1$ ; в) и г) челик  $S355J2$ , узорак 3-11.



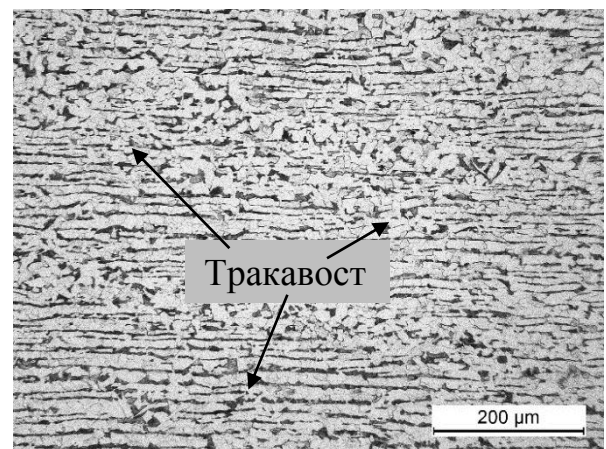
а)



б)



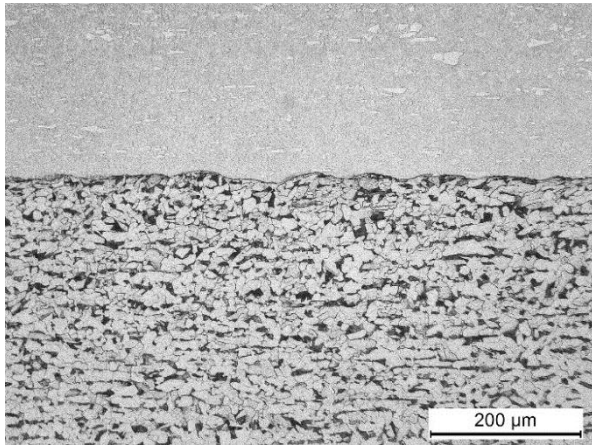
в)



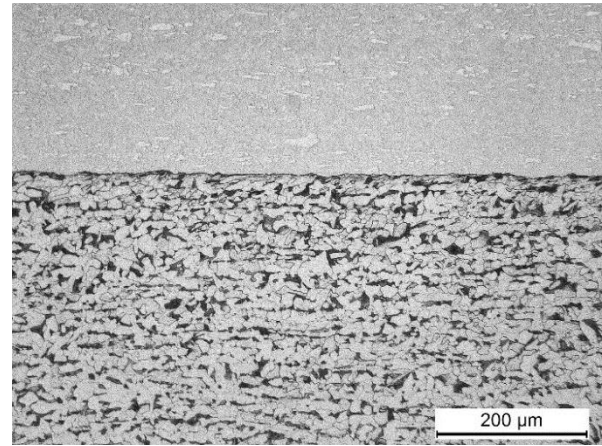
г)

Слика 6.50. а) и б) челик  $X155CrVMo12-1$ ; в) и г) челик  $S355J2$ , узорак 4-11

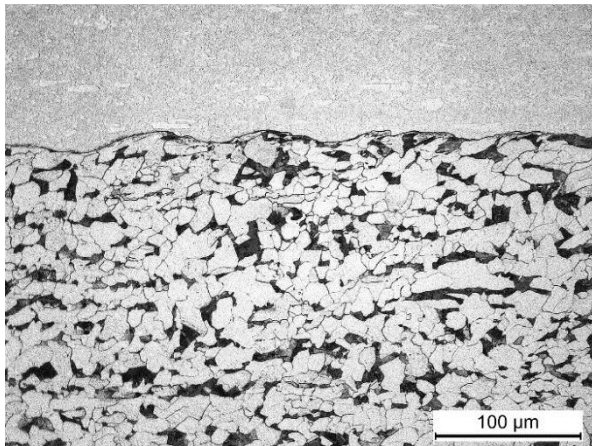
Морфологија споја је један од релевантнијих показатеља квалитета споја. Таласаста или прелазна веза у смеру дејства силе изазване експлозијом, без међуслоја даје жељена својства. Важна карактеристика типична за ударно заваривање великом брзином је формирање течне фазе на површини споја. Приликом заваривања различитих материјала често се уочава да унутар ових подручја долази до увртања метала који се спајају, па се такве зоне растопа често називају вртлози (Bataev, 2019). Ово вртложење се приписује међусобној ерозији материјала површине кумулативним млазом који настаје као резултат судара (Xiaoming, 2021). Специфично вртложење се може уочити посматрањем пластичне деформације феритних зрна у близини вртлога (слика 6.52 до 6.54). На узорку 1-10, није дошло до таласастог споја (слика 6.51).



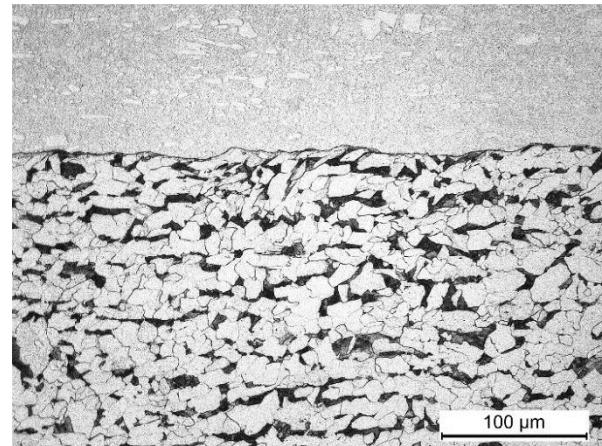
а)



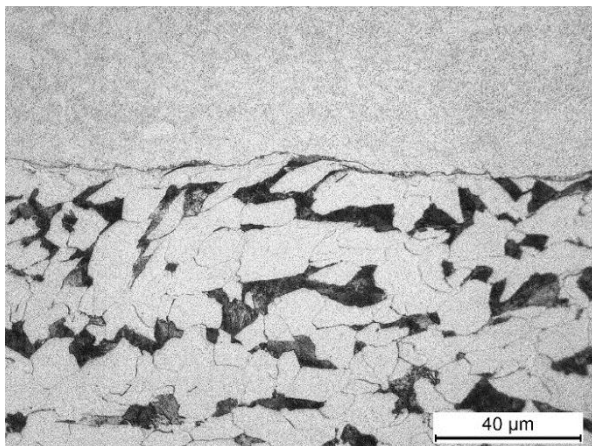
б)



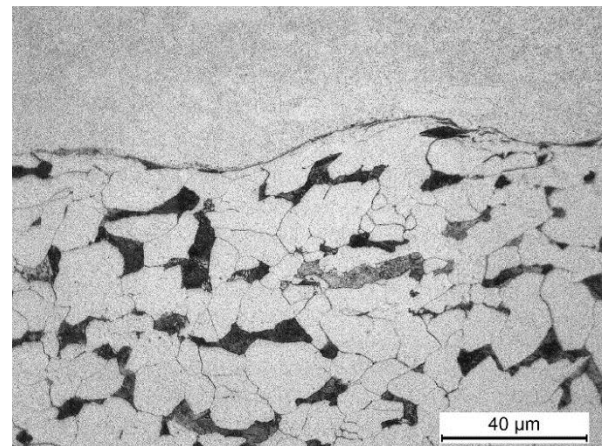
в)



г)

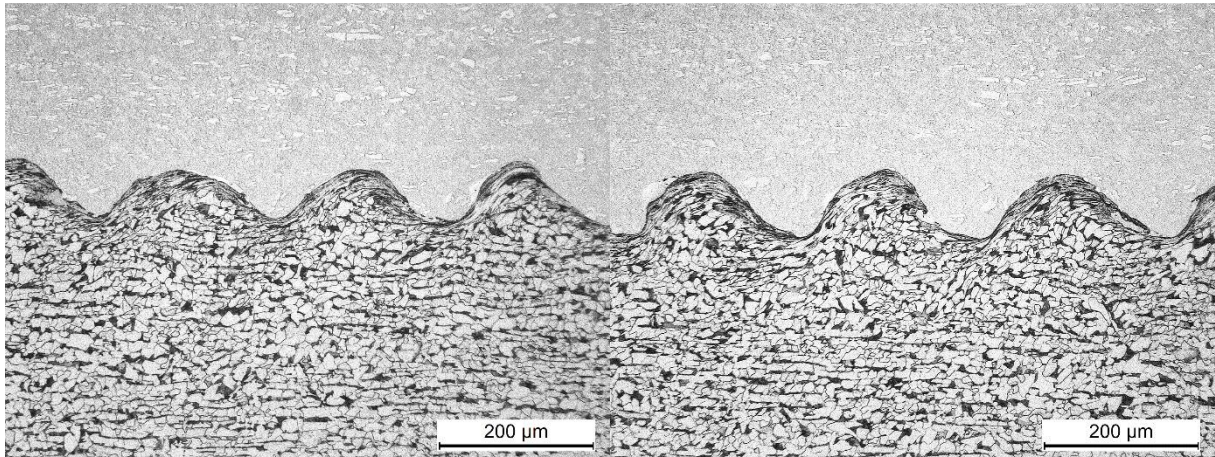


д)



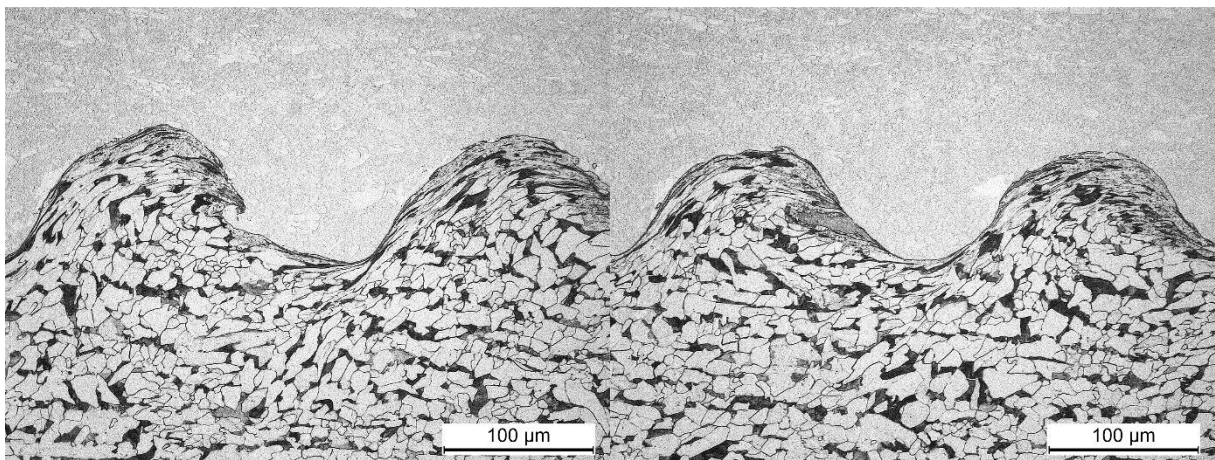
е)

Слика 6.51. а) челик  $X155CrVMo12-1$  (горња половина слике); б) челик  $S355J2$  (доња половина слике), узорак 1-10. а) и б)  $\times 100$  увећање, в) и г)  $\times 200$  увећање, д) и е)  $\times 500$  увећање.



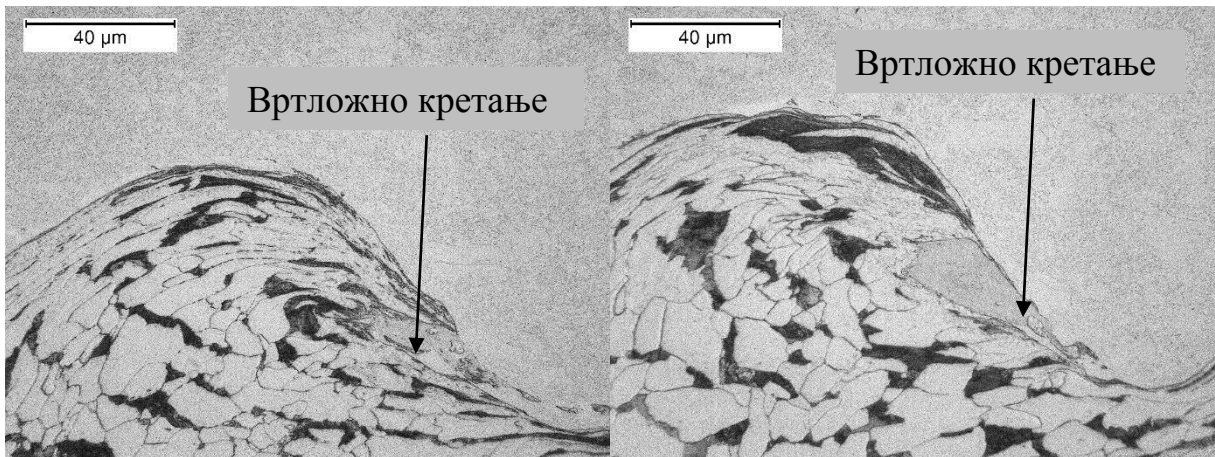
а)

б)



в)

г)

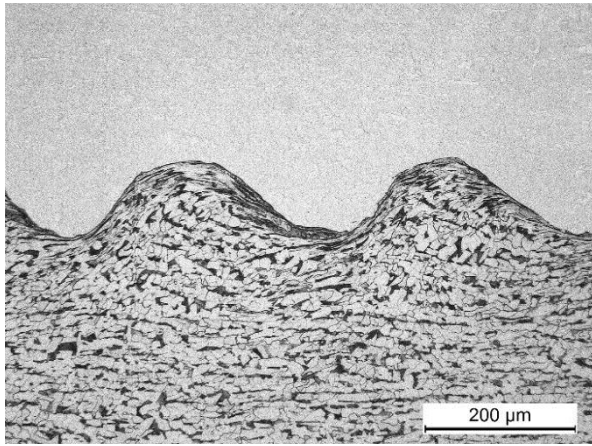


д)

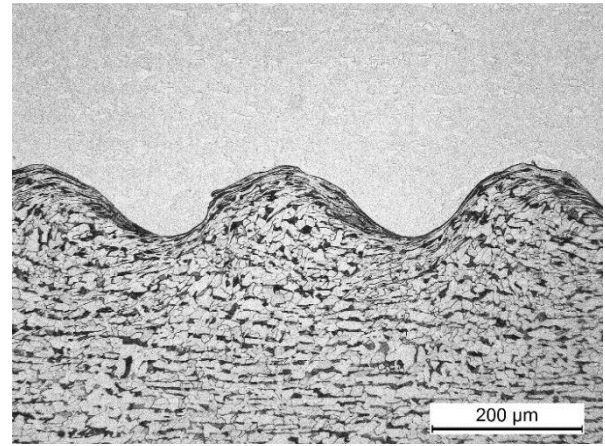
е)

Слика 6.52. а) челик  $X155CrVMo12-1$  (горња половина слике); б) челик  $S355J2$  (доња половина слике), узорак 2-12. а) и б)  $\times 100$  увећање, в) и г)  $\times 200$  увећање, д) и е)  $\times 500$  увећање.

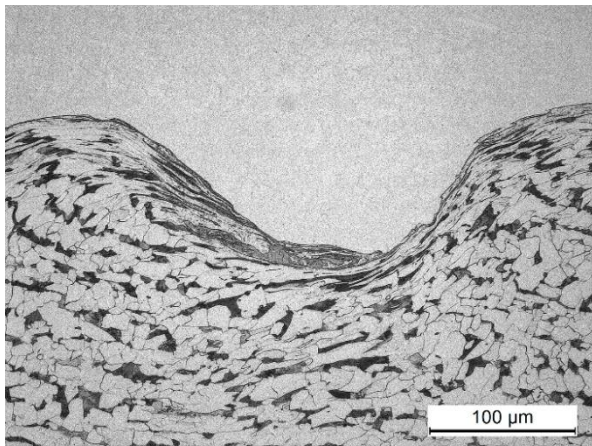




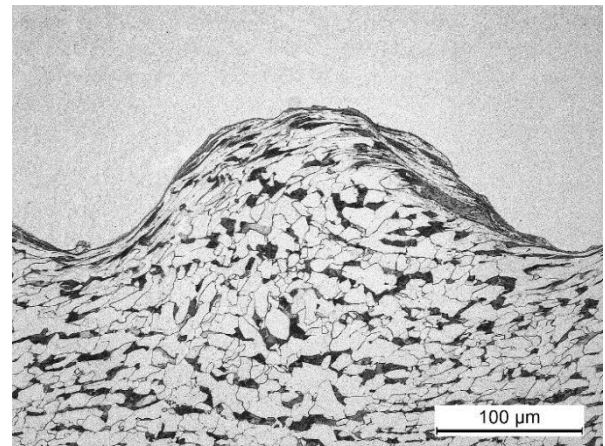
а)



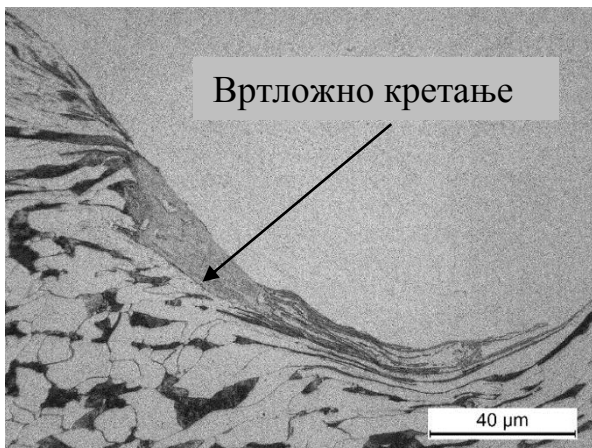
б)



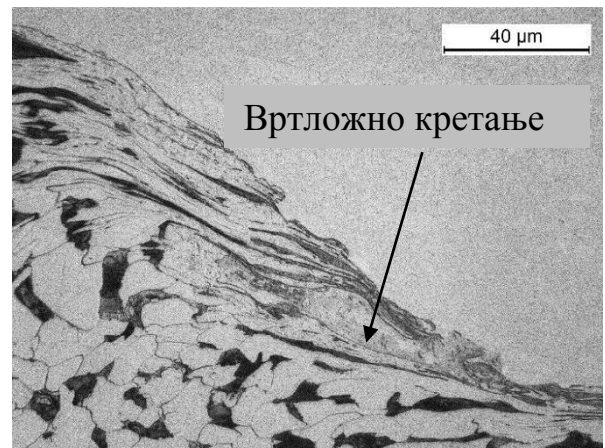
в)



г)

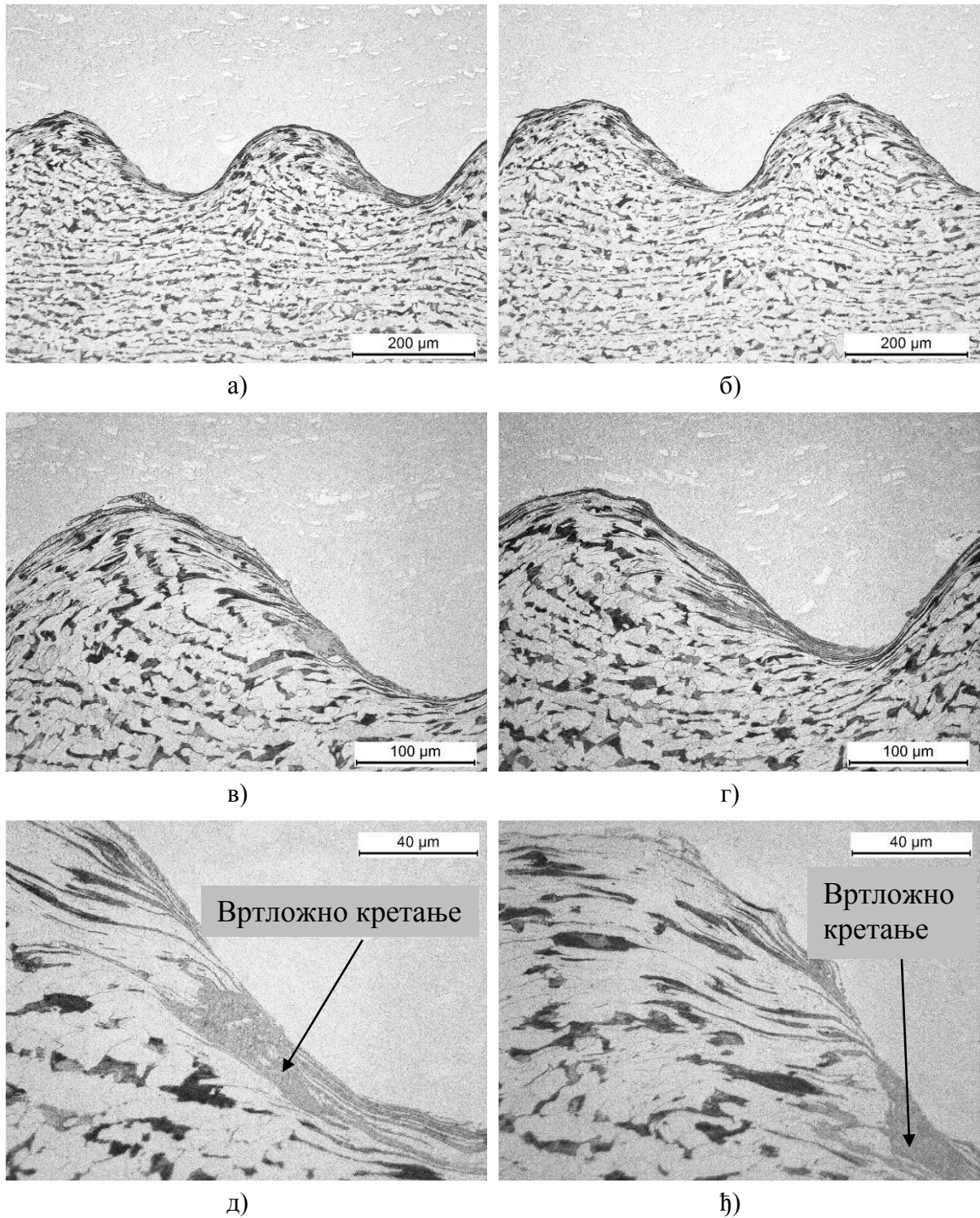


д)



ђ)

Слика 6.53. а) челик  $X155CrVMo12-1$  (горња половина слике); б) челик  $S355J2$  (доња половина слике), узорак 3-11.а) и б)  $\times 100$  увећање, в) и г)  $\times 200$  увећање, д) и ђ)  $\times 500$  увећање.

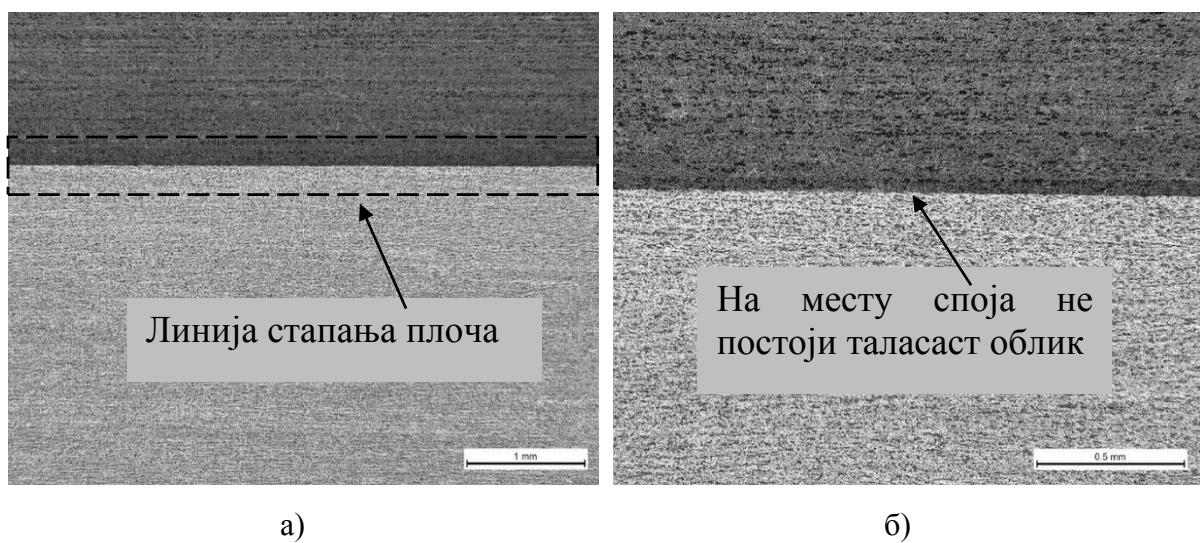


Слика 6.54. а) челик  $X155CrVMo12-1$  (горња половина слике); б) челик  $S355J2$  (доња половина слике), узорак 4-11. а) и б)  $\times 100$  увећање, в) и г)  $\times 200$  увећање, д) и ђ)  $\times 500$  увећање.

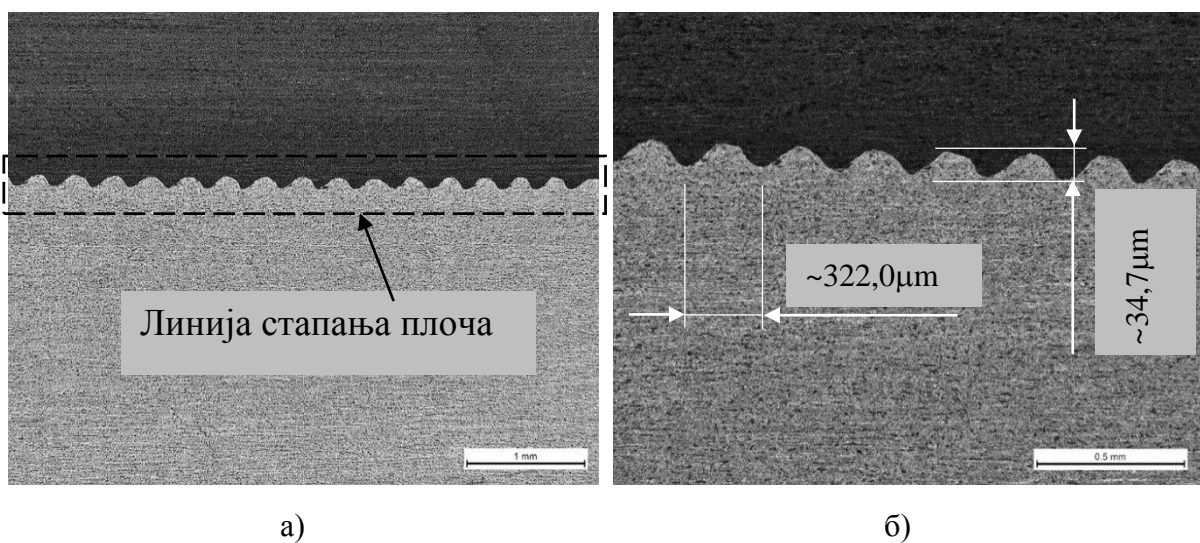
Код свих узорака пластична деформација је значајно порасла од ивице плоча према споју. У непосредној близини споја, феритна зрна су била значајно растегнута дуж таласног профила и, сходно томе, скупљена у попречном правцу(слика 6.52 до 6.54).

У испитиваним узорцима вртложне зоне су лоциране са једне стране врха или корита таласа упоредиво са морским таласима. Вртложне зоне су означене стрелицама. На другим деловима споја, велике зоне топљења су практично одсутне. Међутим, било би погрешно на основу оваквих студија у потпуности потврдити одсуство течног слоја и формирање директног чврсто-фазног заваривања између материјала на другом делу споја. С обзиром на краткотрајност процеса заваривања, није било довољно времена да се развије колективна рекристализација и зрна завршне фазе нису прелазила величину од неколико микрометара, а у неким случајевима су била и субмикронских димензија (Bataev, 2019).

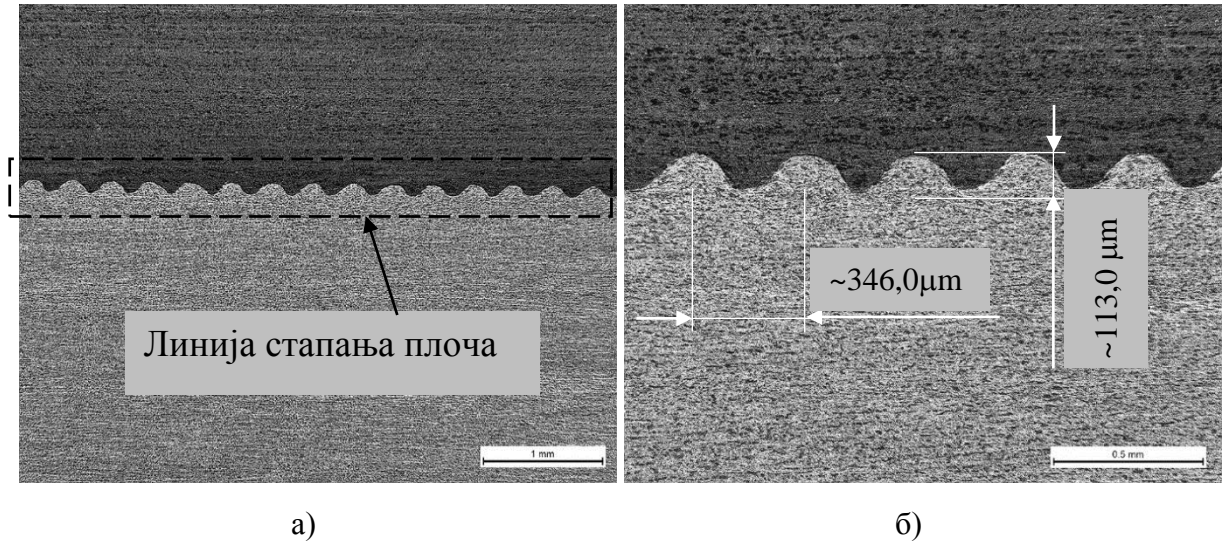
Према запажању направљеном на скенирајућем електронском микроскопу, није било очигледних дефеката пронађених на споју плоча, односно добијена је идеална морфологија таласасте везе. Висина таласа је означена на сликама 6.56 до 6.58. На узорку 1-10 није дошло до таласастог споја (слика 6.55).



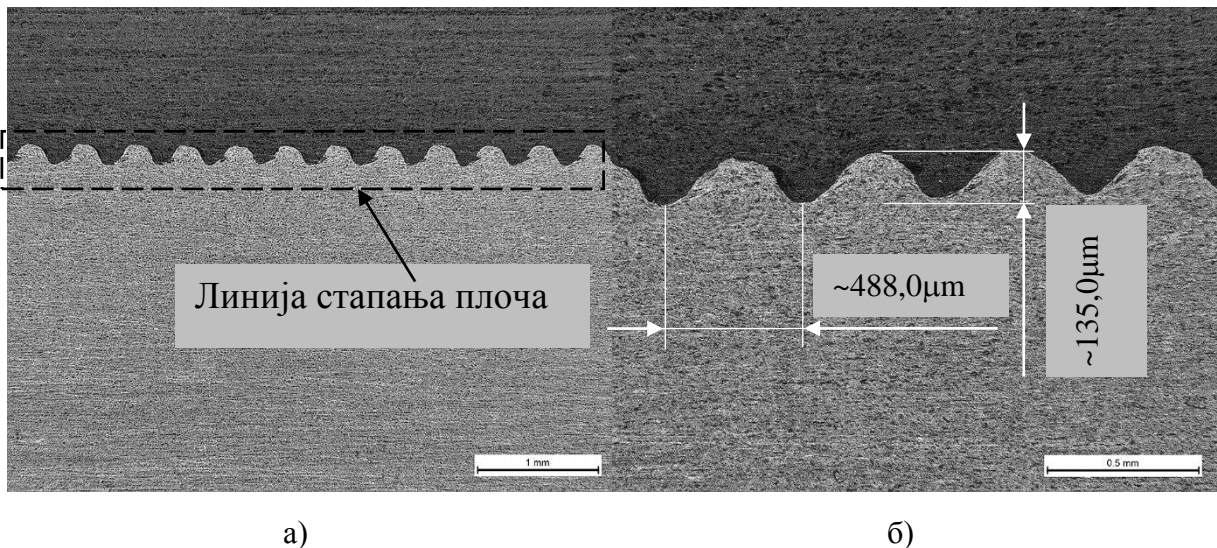
Слика 6.55. SEM фотографије споја а) челик  $X155CrVMo12-1$  (горња половина слике); б) челик  $S355J2$  (доња половина слике), узорак 1-10.



Слика 6.56. SEM фотографије споја а) челик  $X155CrVMo12-1$  (горња половина слике); б) челик  $S355J2$  (доња половина слике), узорак 2-12.



Слика 6.57. SEM фотографије споја а) челик  $X155CrVMo12-1$  (горња половина слике); б) челик  $S355J2$  (доња половина слике), узорак 3-11.

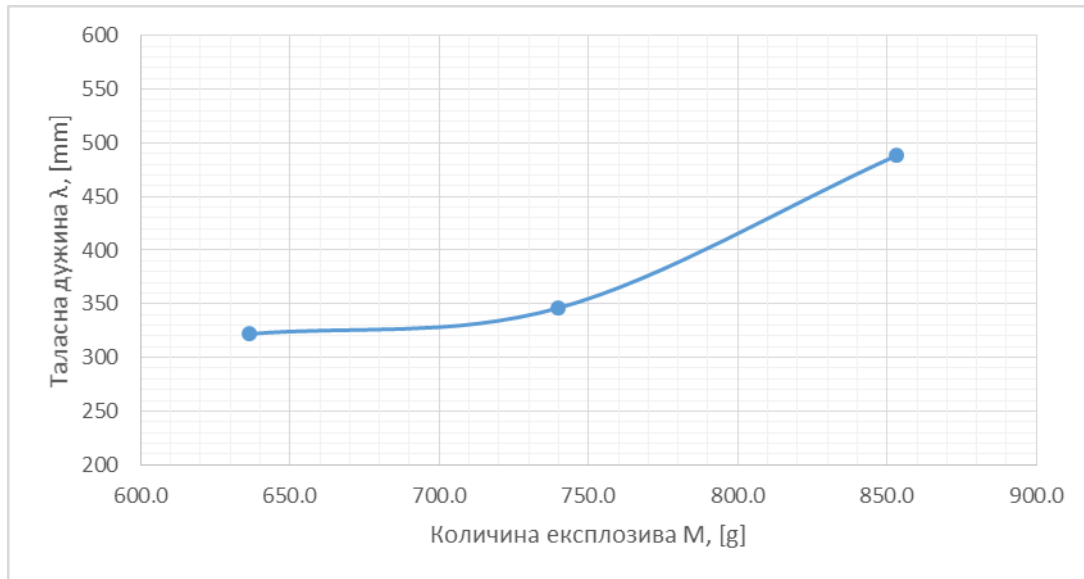


Слика 6.58. SEM фотографије споја а) челик  $X155CrVMo12-1$  (горња половина слике); б) челик  $S355J2$  (доња половина слике), узорак 4-11

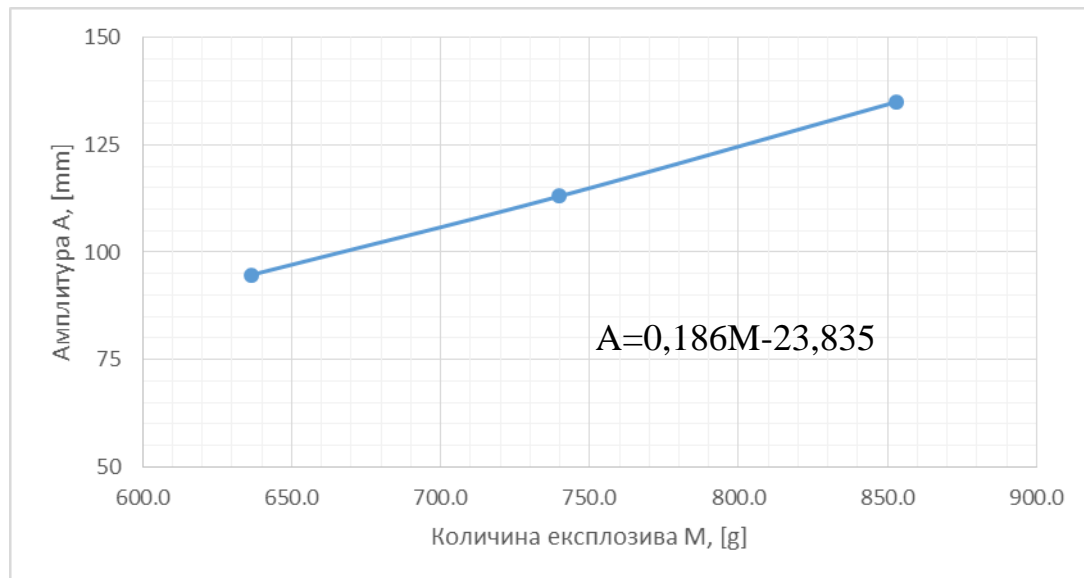
Таласи који су настали приликом активирања мање количине експлозива били су мали, док су таласи који су настали приликом активирања највеће количине експлозива били велики. Због коришћења различите количине експлозива дошло је до веће или мање деформације у близини споја. Дубина пенетрирања једног материјала у други и обратно је у линеарној зависности од количине експлозива. Вредности таласних дужина и амплитуда приказани су у табели 6.6. Таласasti спој је континуалан по целој дужини испитиваног узорка (55 mm). Приликом активирања најмање количине експлозива није дошло до формирања таласасте структуре због пада брзине детонације, нестабилног режима простирања детонационог таласа и самим тим изласком из зоне оптималног заваривања. Зависност таласне дужине и амплитуде формираног таласа је приказана на слици 6.59 и 6.60.

Табела 6.6. Вредности амплитуде и таласне дужине узорака.

Узорак	Количина експлозива $M$ , g	Таласна дужина $\lambda$ , $\mu\text{m}$	Амплитуда таласа $A$ , $\mu\text{m}$
1-10	541,9	-	-
2-12	636,5	322,0	94,7
3-11	739,7	346,0	113,0
4-11	852,9	488,0	135,0



Слика 6.59. Зависност таласне дужине таласа од количине експлозива.

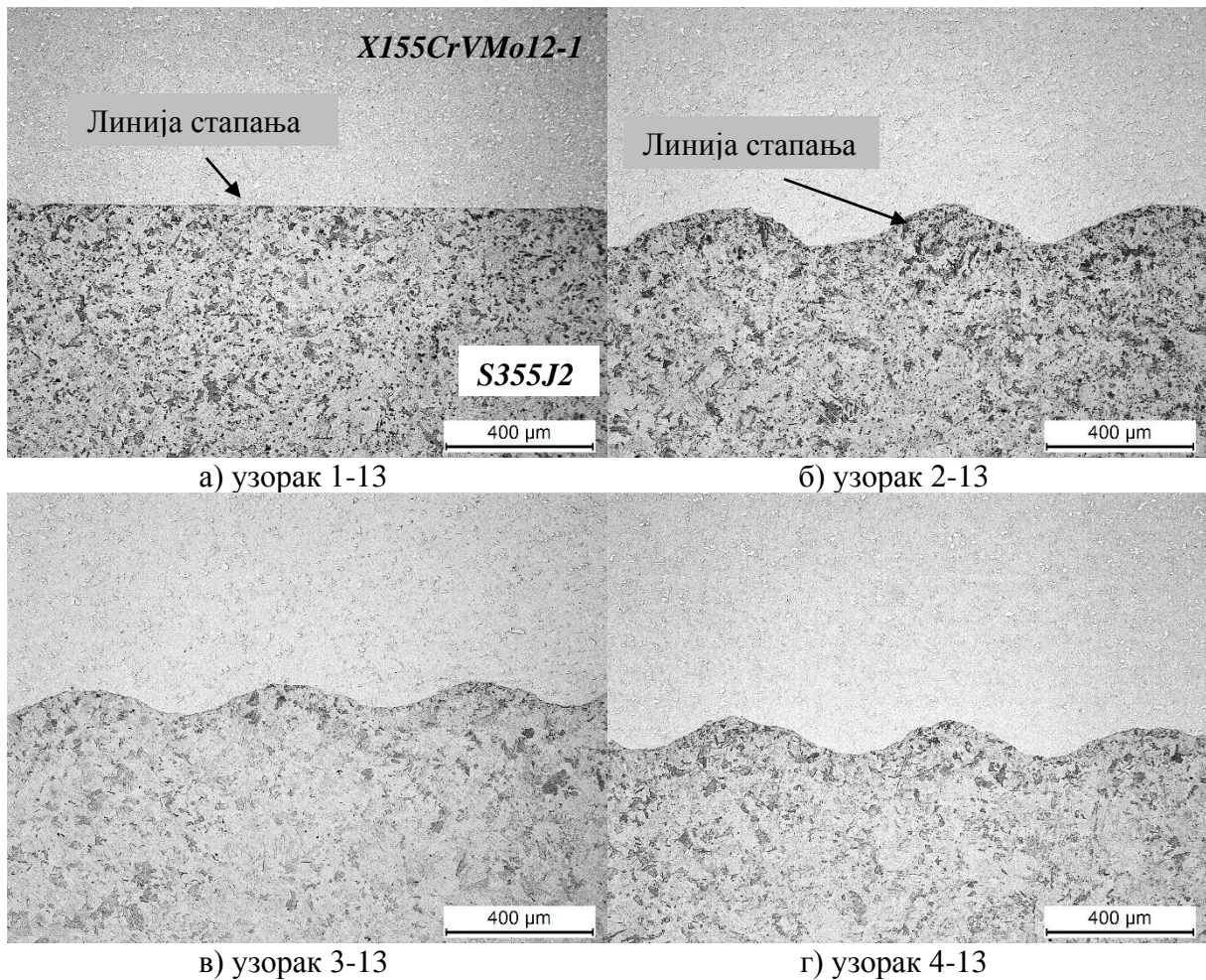


Слика 6.60. Зависност амплитуде таласа од количине експлозива.

### 6.9.3. Металографска испитивања након каљења (алатни/конструкциони челик)

Металографски узорци (1-13, 2-13, 3-13 и 4-13) су исечени из епрувета за енергију удара (жилавост) у попречном правцу. Узорци су након грубе и fine механичке припреме (брушења и полирања) нагрижени у пикринско-соној киселини.

На слици 6.61 приказана је микроструктура узорака 1-13, 2-13, 3-13 и 4-13, заварених различитим масама експлозива.



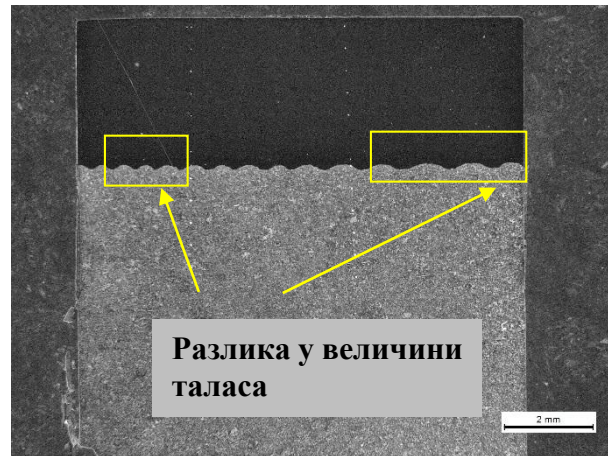
Слика 6.61. Микроструктура узорака: а) 1-13, б) 2-13, в) 3-13 и г) 4-13.

Горња плоча је израђена од челика ознаке *X155CrVMo12-1* и после термиче обраде код свих узорака (1-13÷4-13) микроструктура се састоји од мартензита и нерастворених карбида.

Доња плоча израђена је од угљеничног челика *S355J2*. Микроструктура доње плоче код свих узорака, након термичке обраде, сачињена је од ферита и перлита.

На основу прегледа микроструктуре на оптичком микроскопу није уочена зона топљења, односно, мешања основних материјала на линији стапања. Такође због природе каљења и температурног шока није уочена појава прелина на месту споја.

Примећено је да се, у зависности од примене различите масе експлозива за заваривање, облик и величина таласа на линији стапања разликују. Вредности ширине и висине „таласа“ на линији стапања, на узорцима 1-13, 2-13, 3-13 и 4-13, дате су у Табели 6.7.



Слика 6.62. Разлика у величини таласа.

Код узорка 2-13 (слика 6.62 и табела 6.7), примећена је знатна разлика у величини „таласа“ у различитим деловима узорка, која може бити последица неравномерно распоређеног експлозива по површини плоче.

Табела 6.7. Измерене вредности ширине и висине таласа на линији стапања заварених спојева.

Узорак	Ширина таласа ( $\mu\text{m}$ )	Висина таласа ( $\mu\text{m}$ )
1-13	раван	раван
2-13	Ужи талас	534
	Шири талас	971
3-13	481	83
4-13	451	98

Микроструктура горње плоче (основни материјал *X155CrVMo12-1*) свих узорака, након термичке обраде, састоји се од мартензита и нерастворених карбида, што потврђују и добијене високе вредности микротврдоће приказане у табели 6.5 и 6.13.

Микроструктуру доње плоче (челик ознаке *S355J2*) свих узорака, након термичке обраде, чине ферит и перлит.

На линији стапања није уочена зона топљења, односно, мешања основних материјала.

Облик и величина „таласа“ на линији стапања се разликују у зависности од примене различите масе експлозива за заваривање.

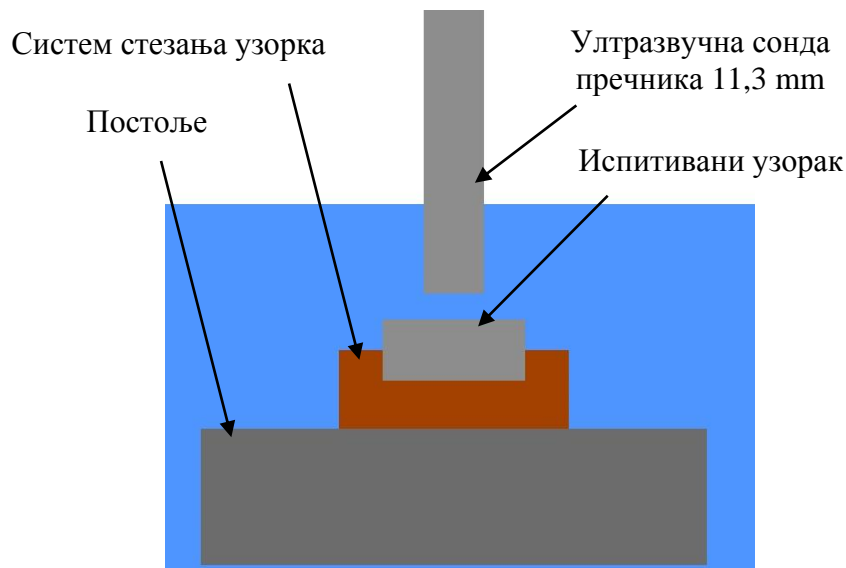
## 6.10. Кавитационо испитивање

Разарање материјала дејством кавитационог мехура изводи се са следећим параметрима уређаја:

- Фреквенција ултразвучних вибрација  $20 \pm 0,2$  kHz,
- Амплитуда ултразвучних вибрација на врху концентратора  $50 \pm 2$   $\mu$ m,
- Проток воде 5-10 ml/s,
- Температура воде у купатилу  $25 \pm 1$  °C,
- Одстојање сонде од узорка 0,5 mm и
- Ниво воде у односу на површину узорка 10 mm.

Узорак се позиционира испод концентратора механичких вибрација на одстојању 0,5 mm. Губитак масе током теста се прати аналитичком вагом тачности  $\pm 0,1$  mg. Након сат времена рада уређаја узорци се суше на повишеној температури до константне масе.

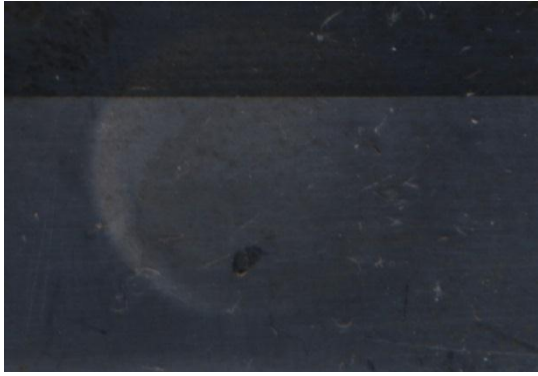
Класична метода испитивања отпорности на кавитацију се заснива на оцени квалитета визуелним прегледом површине узорка. Сваки вид визуелне контроле може имати изванредан део субјективне оцене што је један од недостатака. Други недостатак стандардне методе испитивања је немогућност тачног дефинисања стања површине узорка пре испитивања. Почетно стање узорка има пресудан значај за формирање иницијалних места за формирање кавитационог мехура и даљи ток ерозије материјала у времену. Коришћена је ултразвучна вибрациона метода са стационарним узорком. Шема коришћења уређаја приказана је на слици 6.63.



Слика 6.63. Шема експерименталне поставке испитивања.

Резултати испитивања отпорности материјала на кавитацију након 1h су приказани на слици 6.64 и 6.65., након 2h на слици 6.66 и 6.67, након 3 h на сликама 6.68 и 6.69 и након 4 h на сликама 6.70 и 6.71.

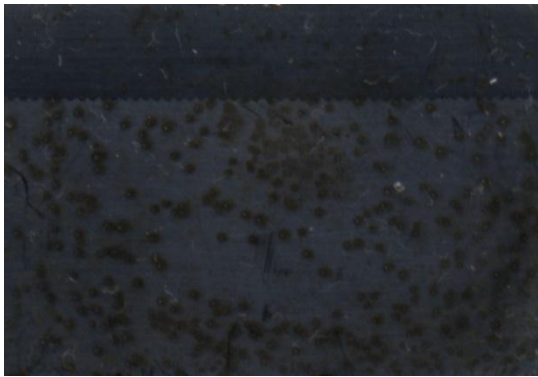




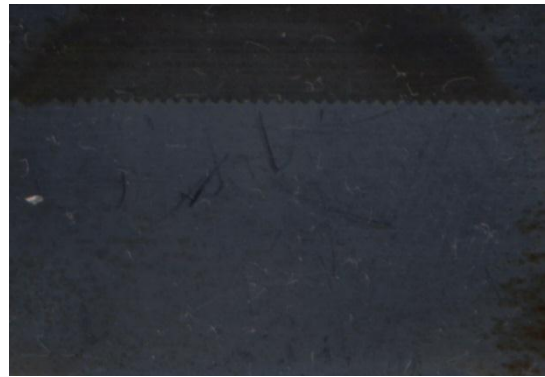
*1-10*



*2-12*

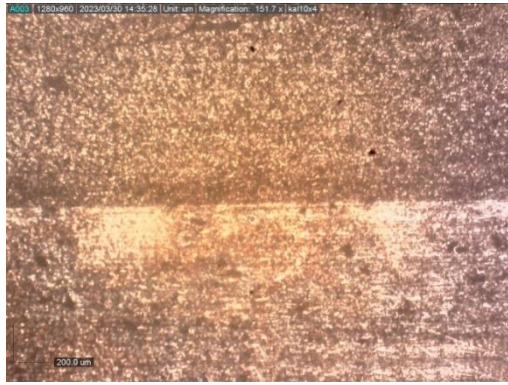


*3-11*

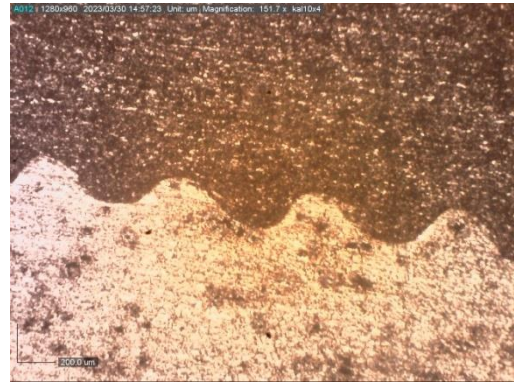


*4-11*

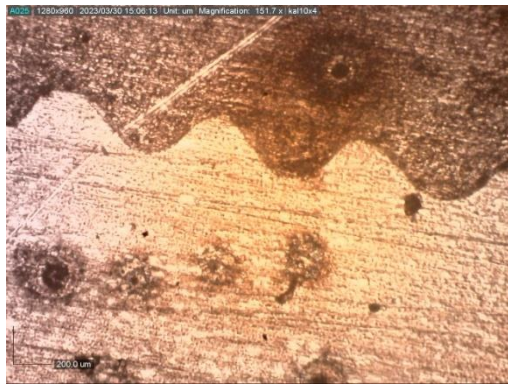
Слика 6.64. Кавитациона оштећења након 1h дејства.



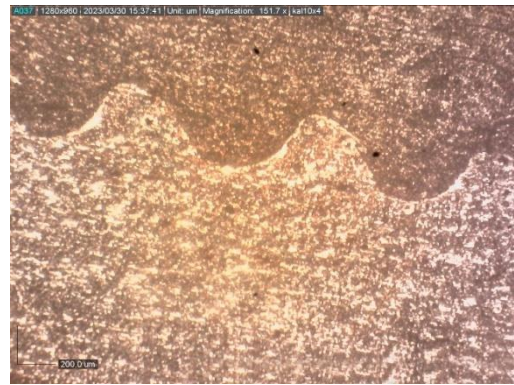
1-10



2-12

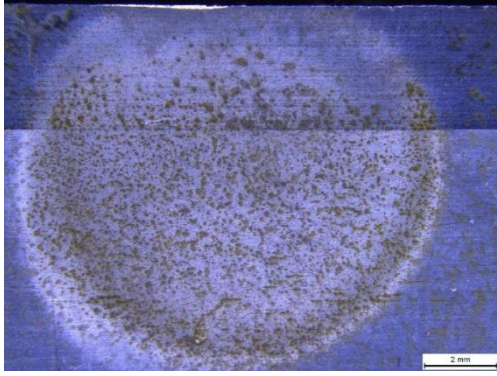


3-11

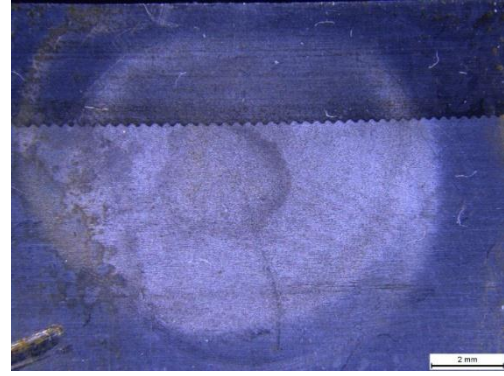


4-11

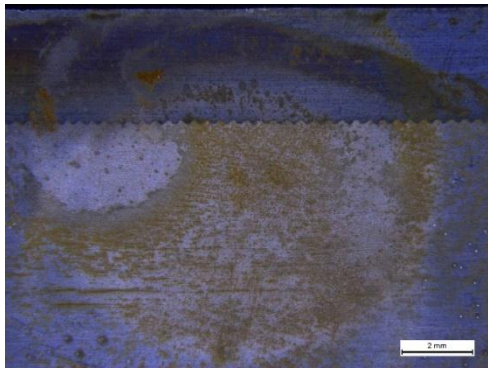
Слика 6.65. Узорци са траговима кавитационе ерозије у виду тачкица или јамица након 1h дејства.



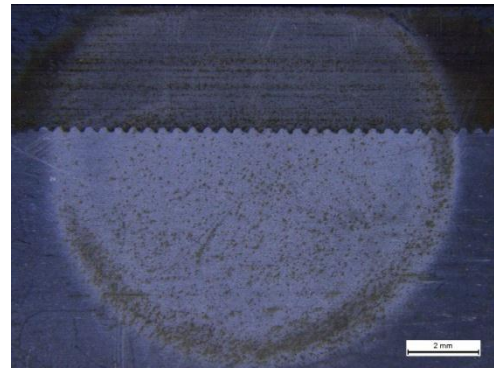
1-10



2-12

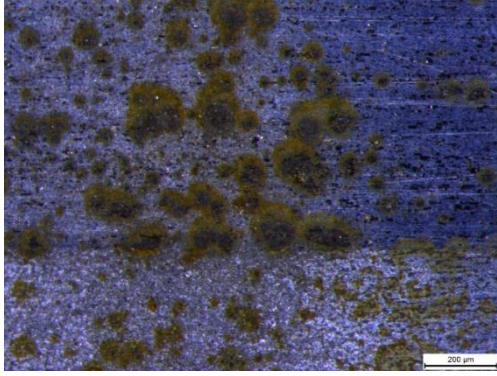


3-11

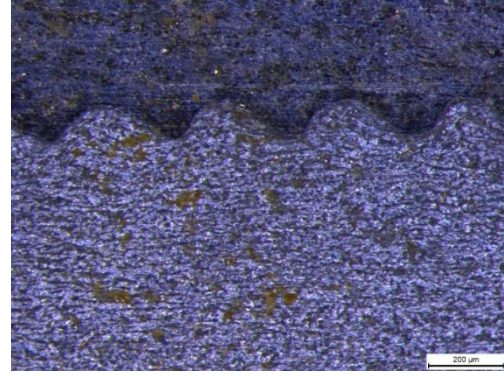


4-11

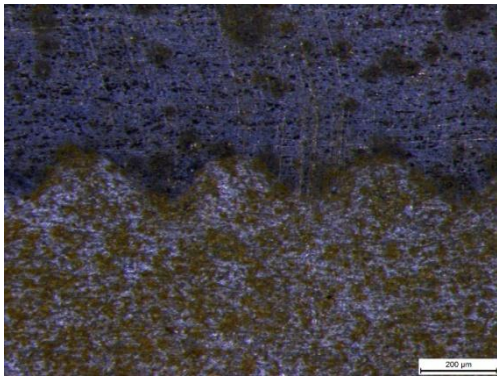
Слика 6.66. Кавитационо оштећење након 2h дејства.



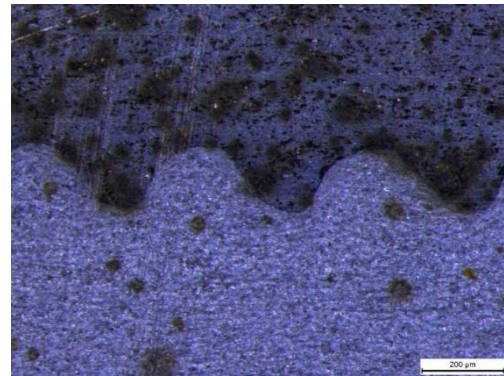
1-10



2-12

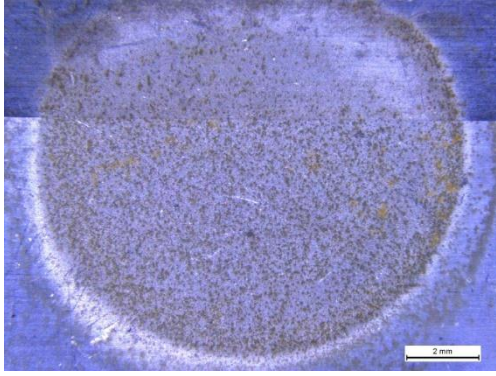


3-11

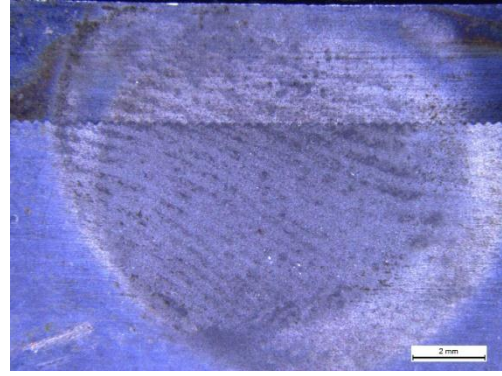


4-11

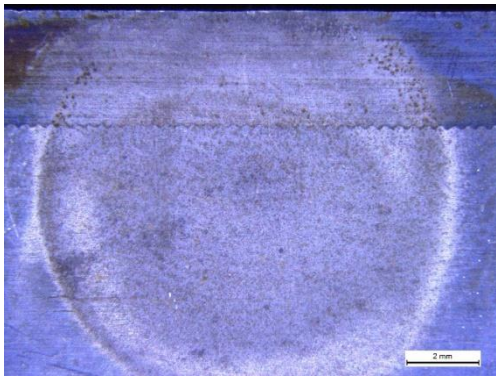
Слика 6.67. Узорци са траговима кавитационе ерозије у виду тачкица или јамица након 2h дејства.



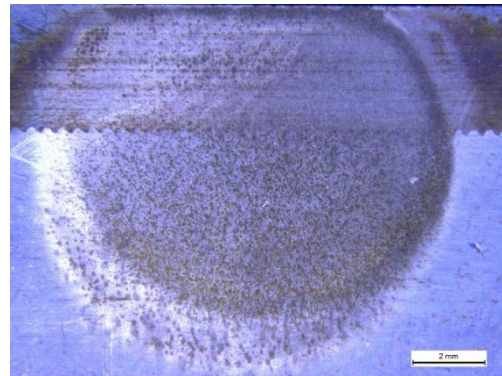
1-10



2-12

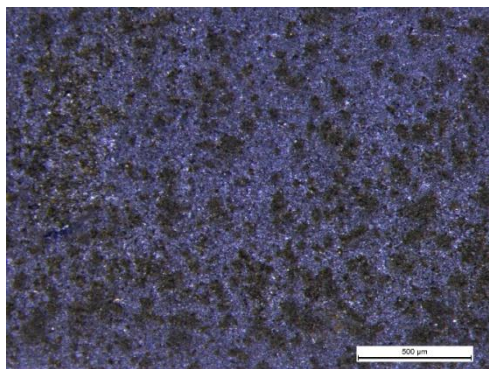


3-11

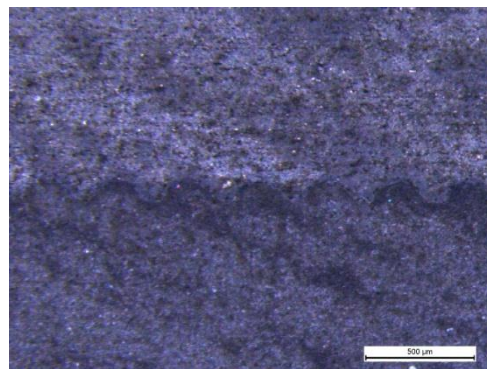


4-11

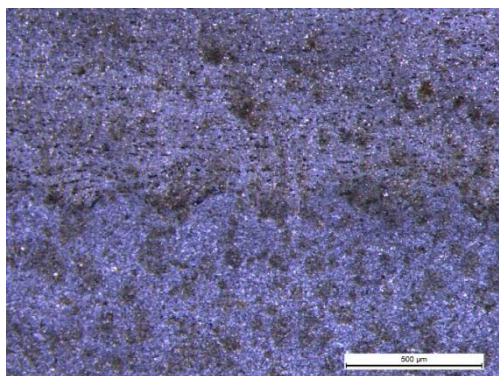
Слика 6.68. Кавитационо оштећење након 3h дејства.



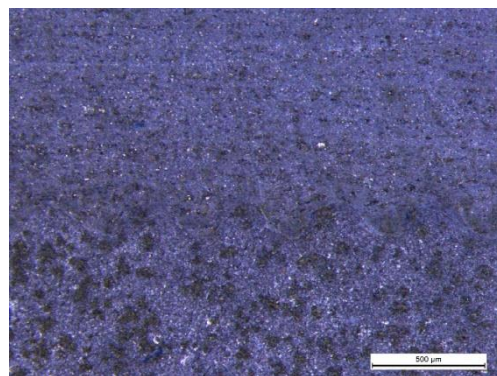
1-10



2-12

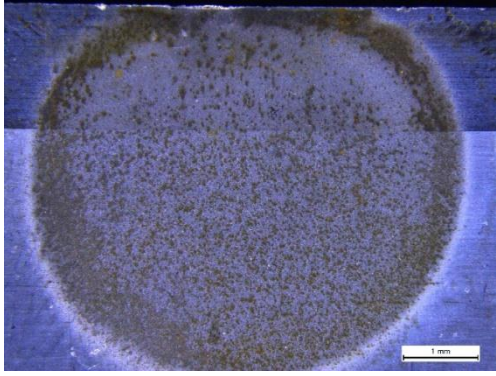


3-11

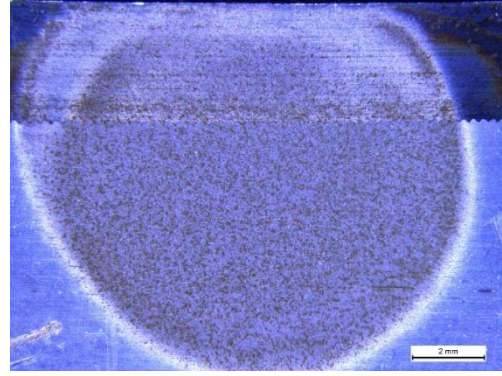


4-11

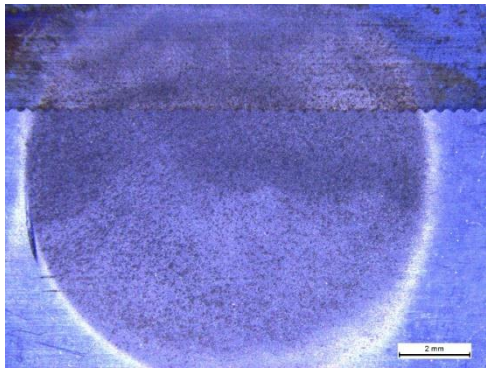
Слика 6.69. Узорци са траговима кавитационе ерозије у виду тачкица или јамица након 3h дејства.



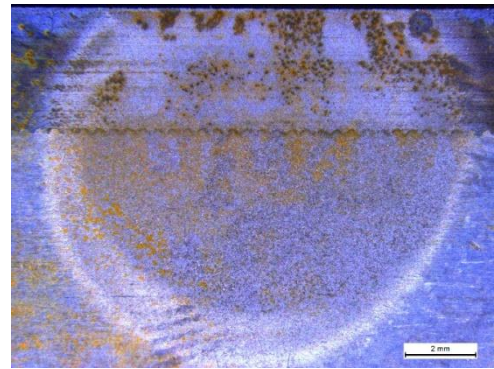
1-10



2-12

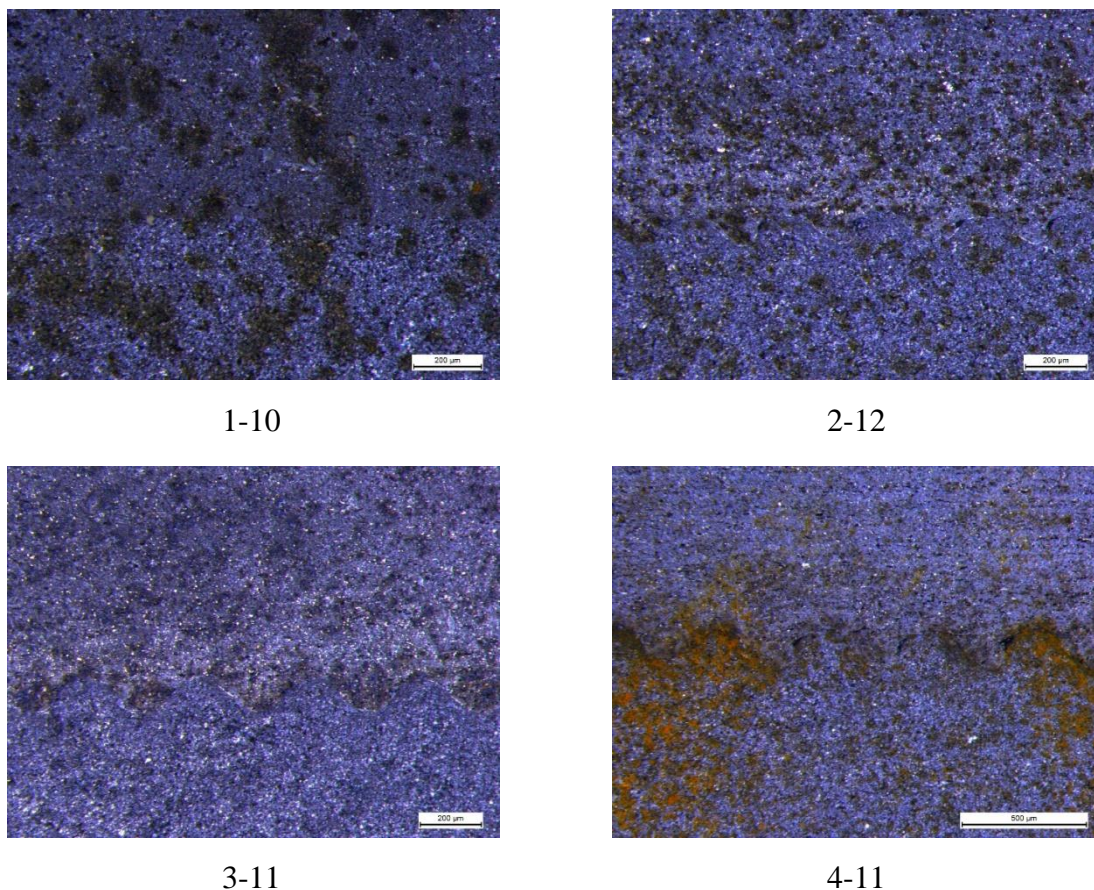


3-11



4-11

Слика 6.70. Кавитационо оштећење након 4h дејства.



Слика 6.71. Узорци са траговима кавитационе ерозије у виду тачкица или јамица након 4h дејства.

Отпорност материјала на дејство кавитације мери се губитком масе, у оквиру експеримента, одређивана је маса узорка пре и у току испитивања.

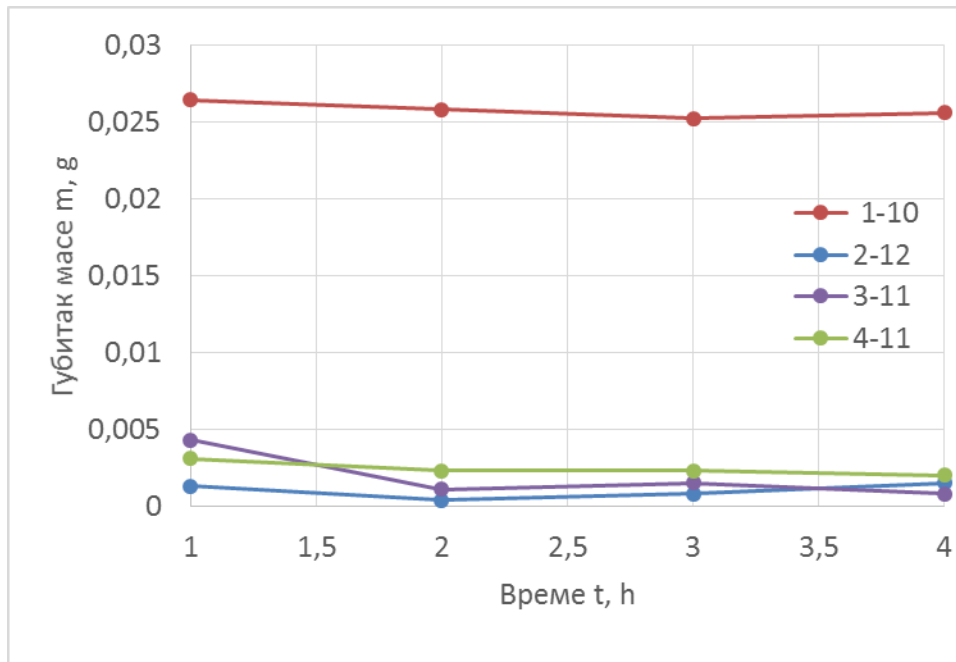
Табела 6.8. Губитак масе након дејства кавитације.

Узорак	Маса пре испитивања	Губитак масе после 1h испитивања	Губитак масе после 2h испитивања	Губитак масе после 3h испитивања	Губитак масе после 4h испитивања
1-10	28,0515	0,0264	0,0258	0,0252	0,0256
2-12	24,7016	0,0013	0,0004	0,0008	0,0015
3-11	26,8882	0,0043	0,0011	0,0015	0,0008
4-11	26,3250	0,0031	0,0023	0,0023	0,0020

Слике показује карактеристичне прстенове својствене за ову врсту испитивања. Сврха овог испитивања је откривање потенцијалног груписања оштећења у близини споја две плоче. Након сат времена дејства механичких вибрација у сваком циклусу, визуелним прегледом, није уочена велика концентрација јамица на месту споја.

Пошто се отпорност материјала на дејство кавитације мери и губитком масе пре и након испитивања, аналитичком вагом тачности 0,1 mg извршено је мерење чији су резултати приказани у табели 6.8. На основу измерених вредности конструисана је крива кавитационог хабања која је приказана на слици 6.72.



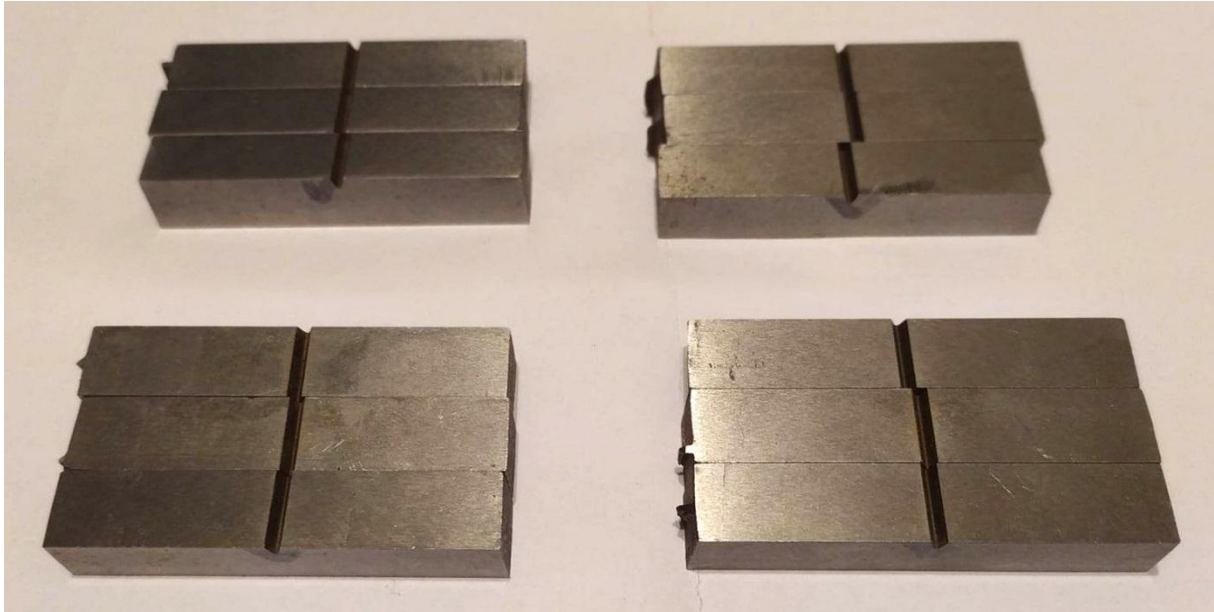


Слика 6.72. Зависност губитка масе од времена (крива кавитационог хабања).

Добијене вредности показују да је дошло до губитка материјала. Највећи губитак масе је код узорка 1-10. Разлог за оволико одступање у односу на резултате код осталих узорка може бити у неправилно завареном споју, односу у одсуству таласасте форме споја, што металографска испитивања потврђују. Губитак масе код узорка 2-12, 3-11 и 4-11 је сличан али показује благу зависност губитка масе у односу на количину употребљеног експлозива. Што је количина експлозива већа, то је већи губитак масе. Није дошло до концентрације кавитационе ерозије у близини споја већ је равномерно распоређена. Ово може ићи у прилог претпоставци да је дошло до доброг спајања два материјала. Место спајања два метала није створило услове за концентрисано дејство кавитационог хабања. Кавитационо дејство „види“ материјал као монолитну структуру.

### 6.11. Испитивања ударне жилавости

Експериментална испитивања ударне жилавости материјала изведена су на дванаест епрувета (слика 6.73) заварених плоча. Из сваке плоче је направљено по три епрувете.



Слика 6.73. Епрувете за испитивање ударне жилавости завареног споја.

Изглед епрувета за испитивање ударне жилавости дат је на слици 6.74.



слика 6.74. Изглед епрувете за испитивање ударне жилавости.

Наведене епрувете су израђене у фирми „*DESKE METAL PRES d.o.o*“ из Кнића, при чему је поред конвенционалног поступка обраде глодањем и сечењем абразивним воденим млазом, коришћена израда V жлеба електроерозионом обрадом (Gupta, 2016).

Експериментално одређивање ударне жилавости изведено је у хемијској лабораторији *Института IMW* у Лужицама, Крагујевац, на Чагру-јевом клатну произвођача „*EchoLab*“ који обезбеђује максималну енергију клатна од 450 J. Поступак испитивања дефинисан је стандардом *SRPS EN ISO 148-1:2017* (ASTME23-07, 2007), (SRPS EN ISO 148-1:2017, 2017). У току испитивања брзина клатна је износила 5,24 m/s.

Испитивања, уз претходно бочно обележавање епрувета електричном оловком, вршена су на собној температури. Пре спроведених испитивања измерене су стварне димензије епрувете (ширине, висине епрувета, дубине зареза, као и дебљина алатног челика на месту зареза), табела 6.9.

Табела 6.9. Стварне димензије попречног пресека епрувете на месту лома

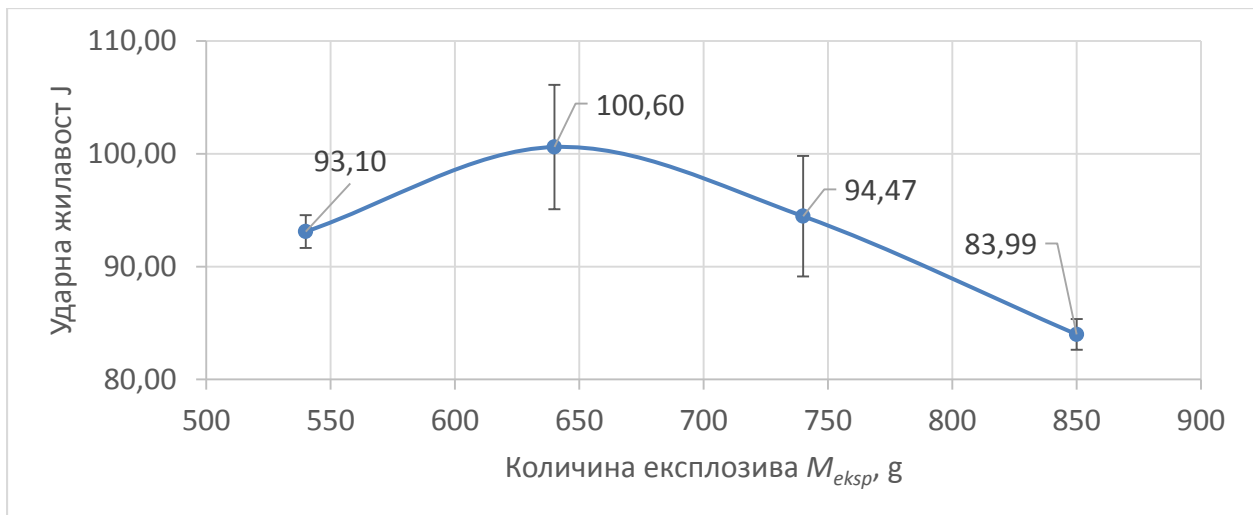
Ознака епрувете	Стварна ширина епрувете mm	Стварна висина епрувете mm	Дубина зареза mm	Површина попречног пресека mm	Дебљина алатног челика mm
1-8	10,03	10,02	2,01	100,50	3,55
1-13	10,01	10,01	2,03	100,20	3,45
1-14	10,00	10,00	2,02	100,00	3,50
2-7	10,00	10,01	2,05	100,10	3,20
2-12	10,01	10,01	2,02	100,20	3,25
2-13	10,01	10,00	2,04	100,10	3,20
3-8	10,00	10,00	2,04	100,00	3,00
3-13	10,00	10,00	2,00	100,00	2,60
3-14	10,00	10,00	2,01	100,00	3,20
4-8	10,00	10,00	2,01	100,00	3,58
4-13	10,00	9,99	2,03	99,90	3,35
4-14	9,98	10,00	2,02	99,80	3,60

Резултати испитивања ударне жилавости епрувета израђених од алатног и конструкционог челика приказани су у табели 6.10, као и упоредни дијаграми на слици 6.75.

Табела 6.10. Резултати испитивања ударне жилавости алатног и конструкционог челика.

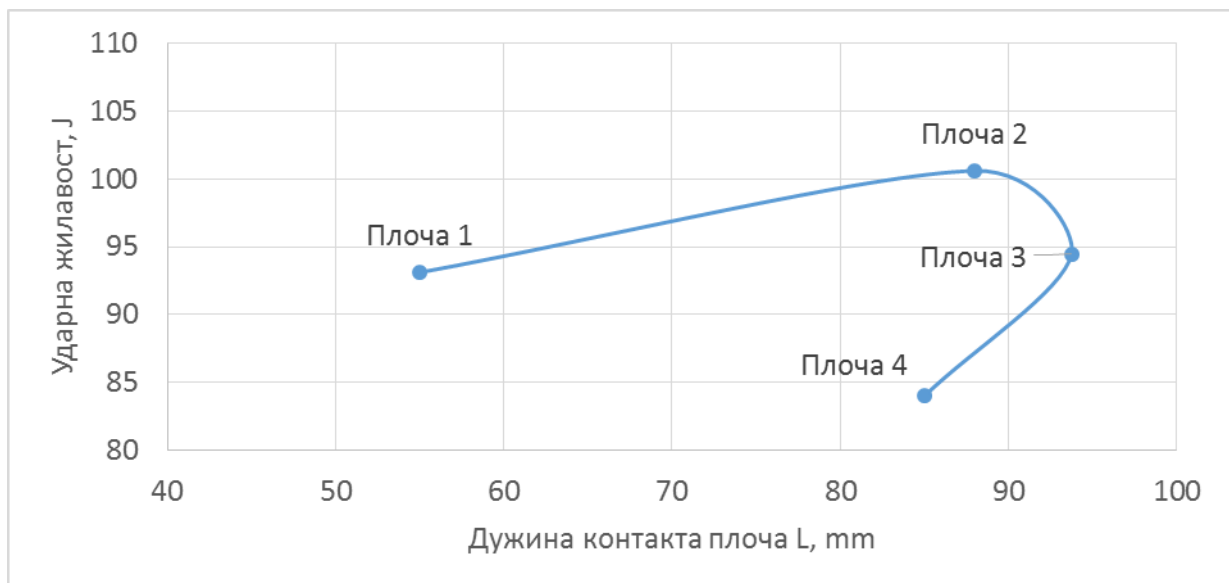
Ознака узорака	Енергија клатна $J$	Апсорбована енергија удара $J$	Стандардна девијација	Средња вредност $J$
1-8	300	92,99	1,4561	93,10
1-13	300	91,38		
1-14	300	94,94		
2-7	300	94,17	5,516	100,60
2-12	300	100,00		
2-13	300	107,64		
3-8	300	87,32	5,342	94,47
3-13	300	100,16		
3-14	300	95,92		
4-8	300	85,40	1,361	83,99
4-13	300	84,42		
4-14	300	82,15		

На слици 6.75 приказана је зависност ударне жилавости за различите плоче, односно од количине експлозива. Ударна жилавост прве плоче има нешто мању вредност од друге и треће плоче. Ако се усвоји податак добијен раније код металогрфског испитивања, да прва плоча нема таласасти профил споја и ако се она искључи из разматрања, долази се до закључка да ударна жилавост опада како се количина експлозива повећава.



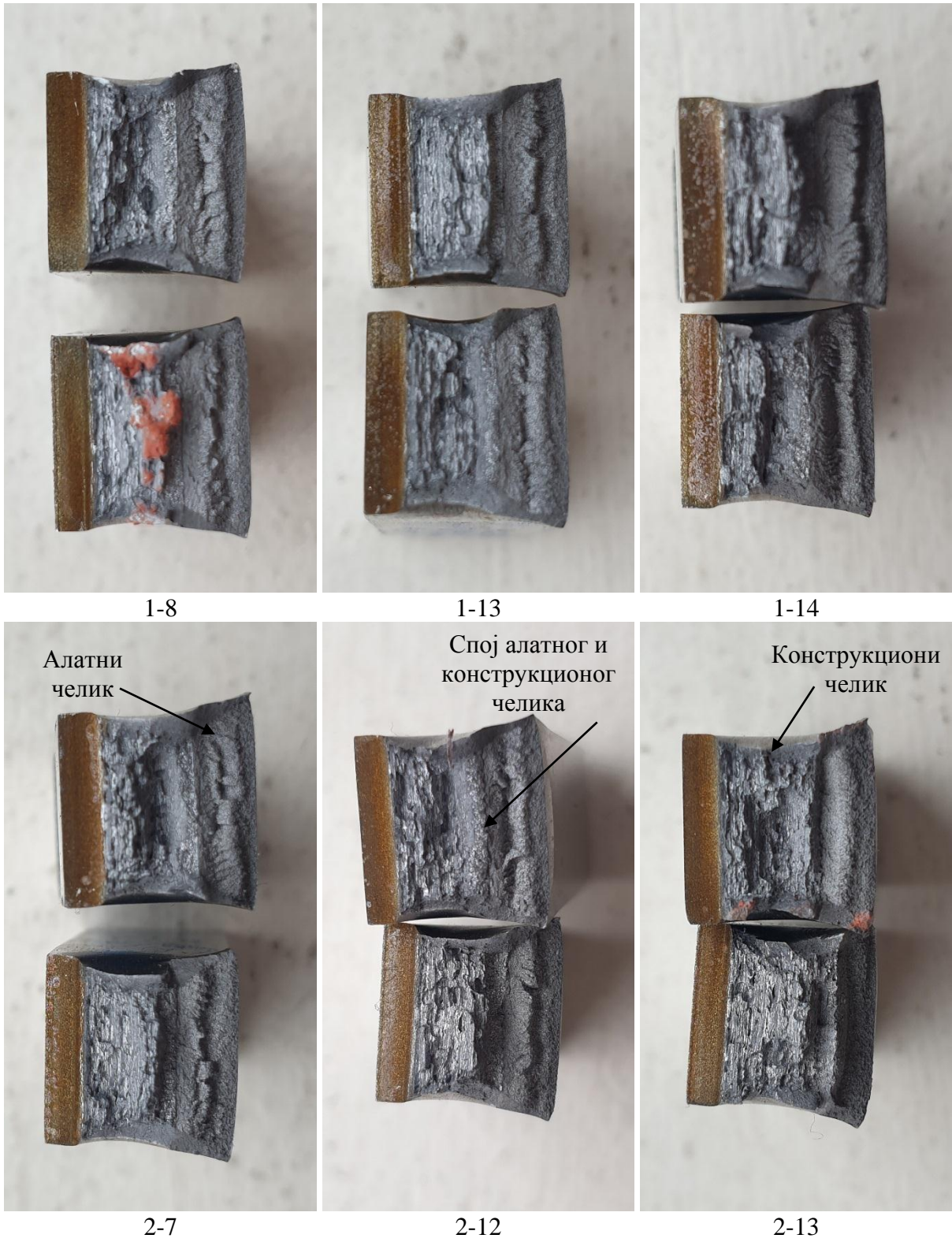
Слика 6.75. Вредности ударне жилавости епрувета израђених од алатног и конструкционог челика.

Такође ако се усвоји податак о површини контакта односно таласној дужини и амплитуди формираних таласа може се конструисати дијаграм зависности ударне жилавости од дужине контакта плоча (слика 6.76). Најбоље особине би имали они узорци чије би се вредности налазиле у горњем десном углу слике 6.76. На основу слике 6.76 уочено је да плоча број два има највећу вредност ударне жилавости а затим плоча број три.

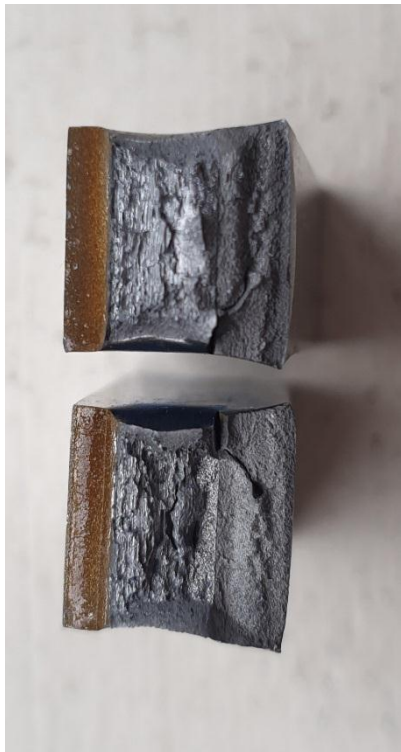


Слика 6.76. Зависност ударне жилавости од дужине контакта плоча (плоча 3 и 4).

Ударна жилавост експлозивно завареног споја креће се у границама од 82,15J до 107,64 J. На слици 6.77 и слици 6.78 приказан је карактер лома епрувете. На основу фотографија може се уочити да је присутан првенствено крт лом. Испитивања су вршена на собној температури. На свим епруветама није уочено разлистивање или цепање експлозивно завареног споја. На појединим узорцима уочена је таласаста линија споја настала експлозивним заваривањем.



Слика 6.77. Изглед лома епрувета (плоча 1 и 2).



3-8



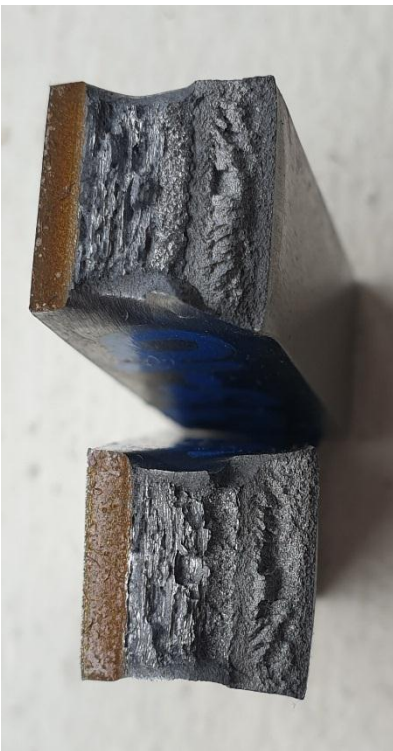
3-13



3-14



4-8



4-13



4-14

Слика 6.78. Изглед лома епрувета (плоча 3 и 4).

## 6.12. Испитивање тврдоће по Vickers-у

Испитивање микротврдоће завареног споја урађено је на Војнотехничком институту Београду. Коришћен је уређај „WilsonDiaMet“, произвођача „CSM“. Услови за испитивање микротврдоће су приказани у табели 6.11.

Табела 6.11. Услови за испитивање микротврдоће

Метода испитивања:	Vickers-ова метода испитивања
Врста утискивача:	Правилна четворострана дијамантска пирамида са углом при врху од 136°
Сила утискивања:	F=0,98N (HV0.1).
Време трајања дејства пуног оптерећења:	15 s

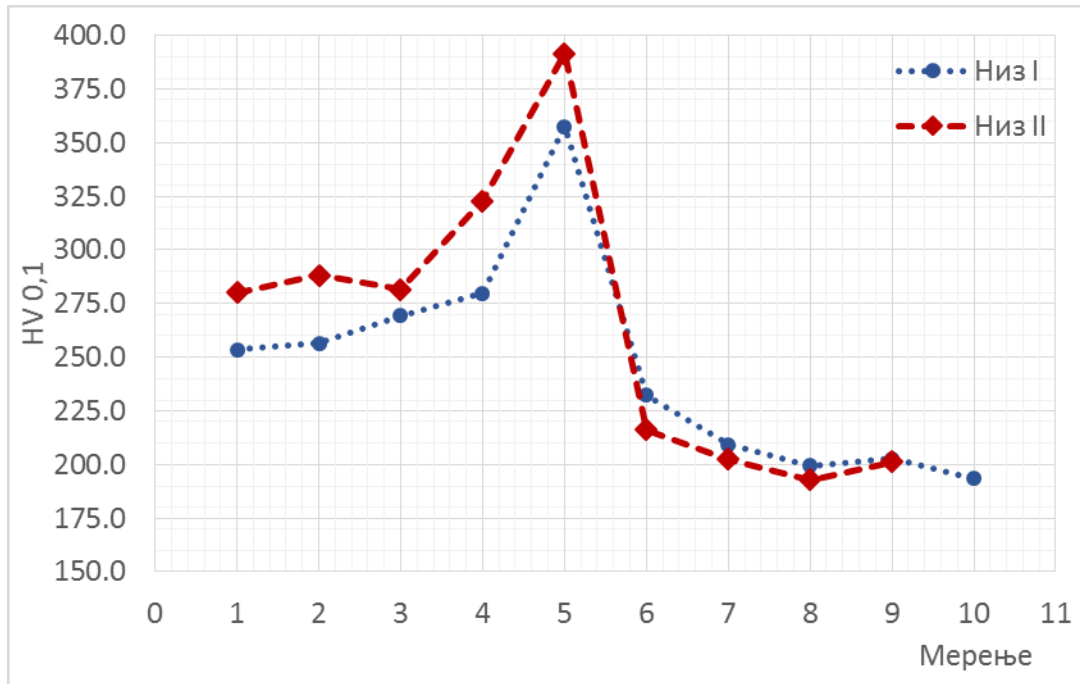
Мерење карактеристика остварено је утискивањем утискивача у површину плоче чије се карактеристике одређују. Тврдоћа је испитивана Vickers-овом методом са силом F=0,98 N (HV0.1). Коришћен је линијски тест. Смер линије заклапао је угао од 90° у односу на линију споја. Први отисак се налази на 150  $\mu\text{m}$  од ивице испитиваног узорка. Урађена су два испитивања на месту споја: 1) линијски тест са кораком од 55  $\mu\text{m}$  на десној половини узорка и 2) линијски тест са кораком од 55  $\mu\text{m}$  на левој половини узорка.

Табеларни приказ вредности микротврдоћа завареног споја приказан је у табели 6.12.

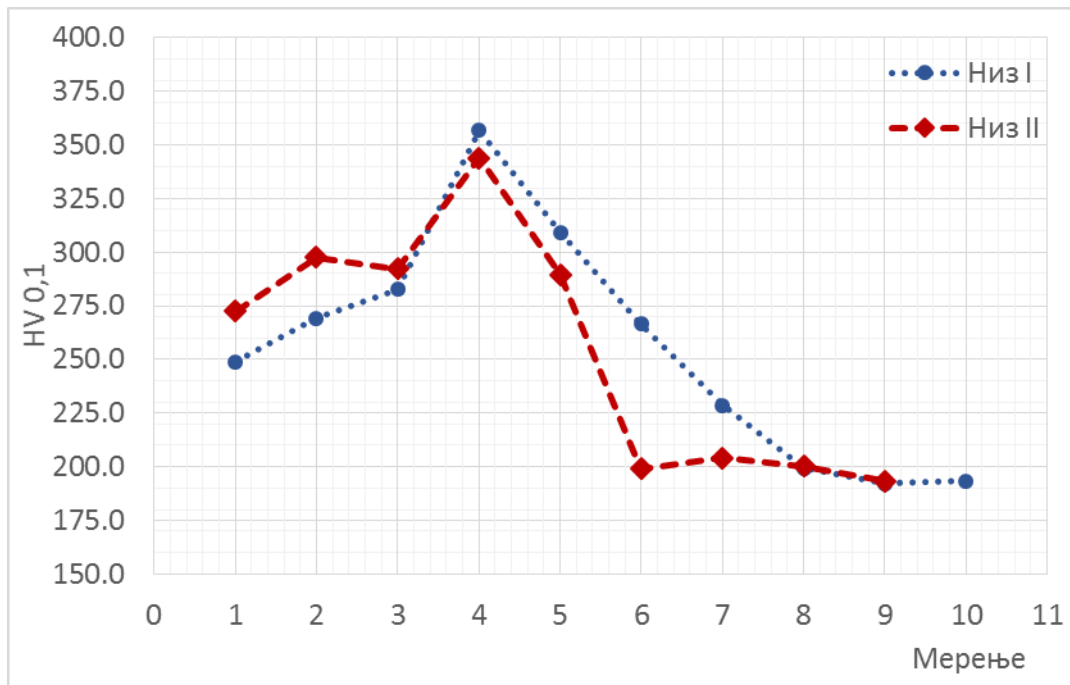
Табела 6.12. Вредности микротврдоће завареног споја.

Плоча 1	Алатни челик					Конструкциони челик				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Број испитивања	253,5	256,6	269,5	279,8	357,7	232,2	209,4	199,5	202,8	193,4
	280,1	288,3	281,5	322,7	391,5	216,1	202,4	192,8	201,1	-
Средња вредност	266,8	272,4	275,5	301,3	374,6	224,2	205,6	196,2	202,0	-
Плоча 2	Алатни челик					Конструкциони челик				
HV0.1	248,9	269,4	282,7	356,6	309,2	266,4	228,6	199,2	193,2	213,4
	272,4	297,5	292,2	343,8	289,7	199,1	204,2	200,3	193,2	-
Средња вредност	270,9	290,1	324,4	326,5	278,1	213,8	201,7	196,2	193,2	-
Плоча 3	Алатни челик					Конструкциони челик				
HV0.1	280,7	288,7	296,3	304,5	363,3	224,3	219,3	210,5	201,1	200,1
	283,1	276,5	308,8	348,9	275,3	233,8	223,7	219,2	205,2	198,0
Средња вредност	281,9	282,6	302,5	326,7	369,3	229,0	221,5	214,8	203,2	199,0
Плоча 4	Алатни челик					Конструкциони челик				
HV0.1	289,1	290,7	286,0	345,9	308,5	245,2	224,9	219,0	221,5	206,6
	298,8	291,7	321,6	377,3	241,8	233,3	224,7	204,6	203,6	-
Средња вредност	293,9	291,2	303,8	361,6	275,1	239,3	224,8	211,8	212,5	-

Вредности микротврдоће у завареном споју *X155CrVMo12-1* и *S355J2* приказани су на сликама 6.79-6.83. На левој страни дијаграма од вршне вредности представљена је тврдоћа *X155CrVMo12-1*, док је на десној тврдоћа челика *S355J2*.

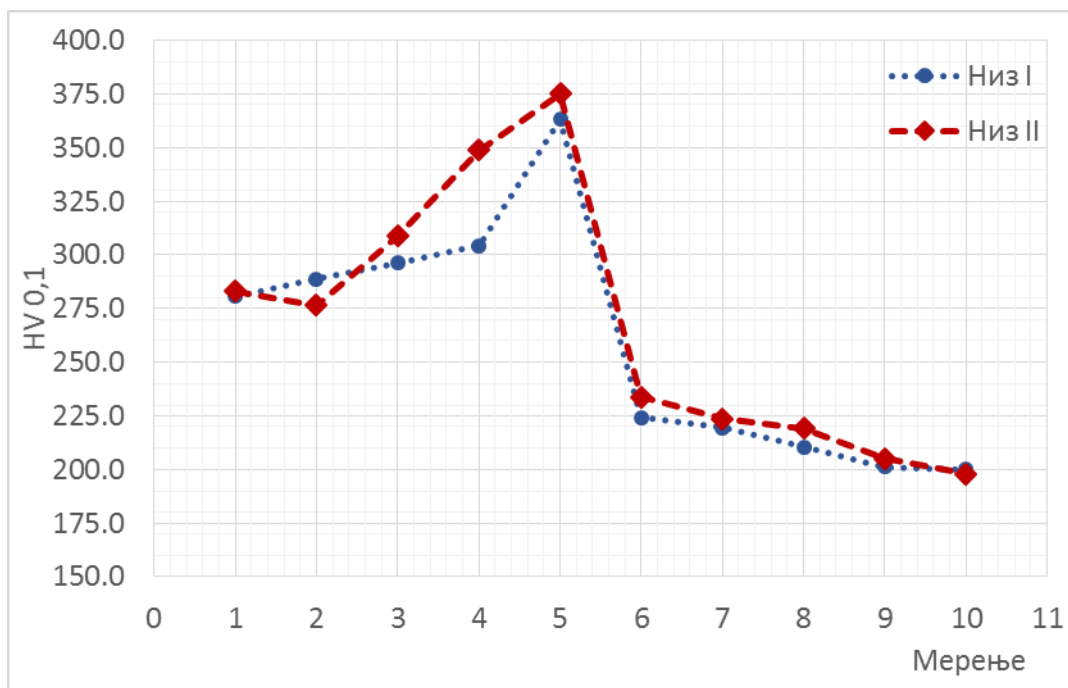


Слика 6.79. Дистрибуција тврдоће на месту спајања два челика (HV0.1 плоча 1).

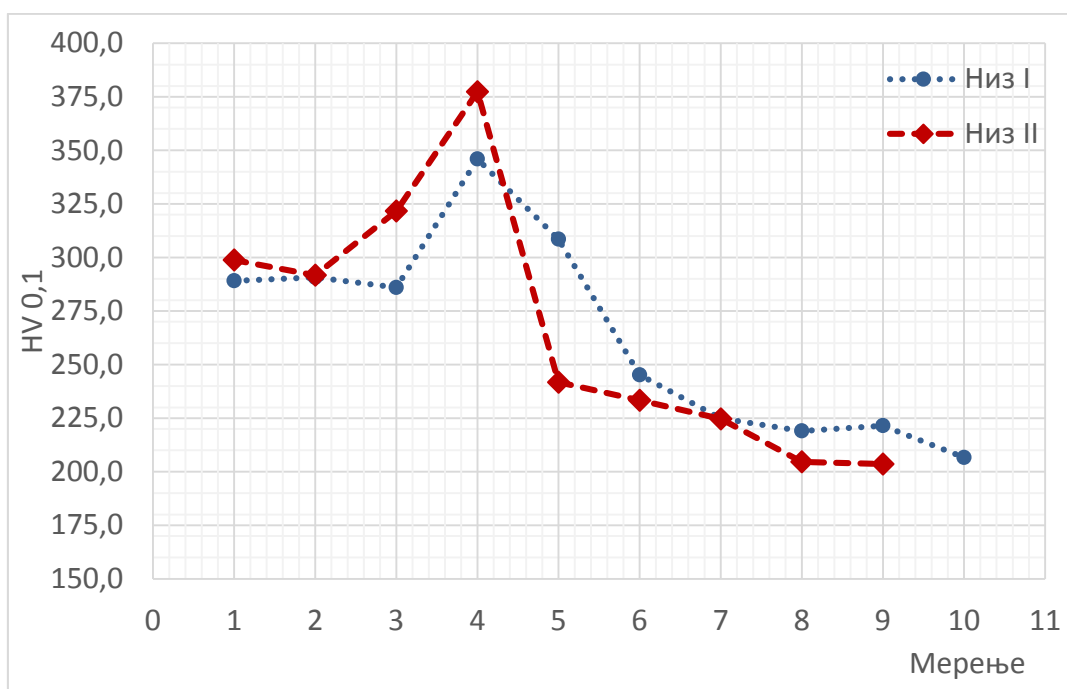


Слика 6.80. Дистрибуција тврдоће на месту спајања два челика (HV0.1 плоча 2).





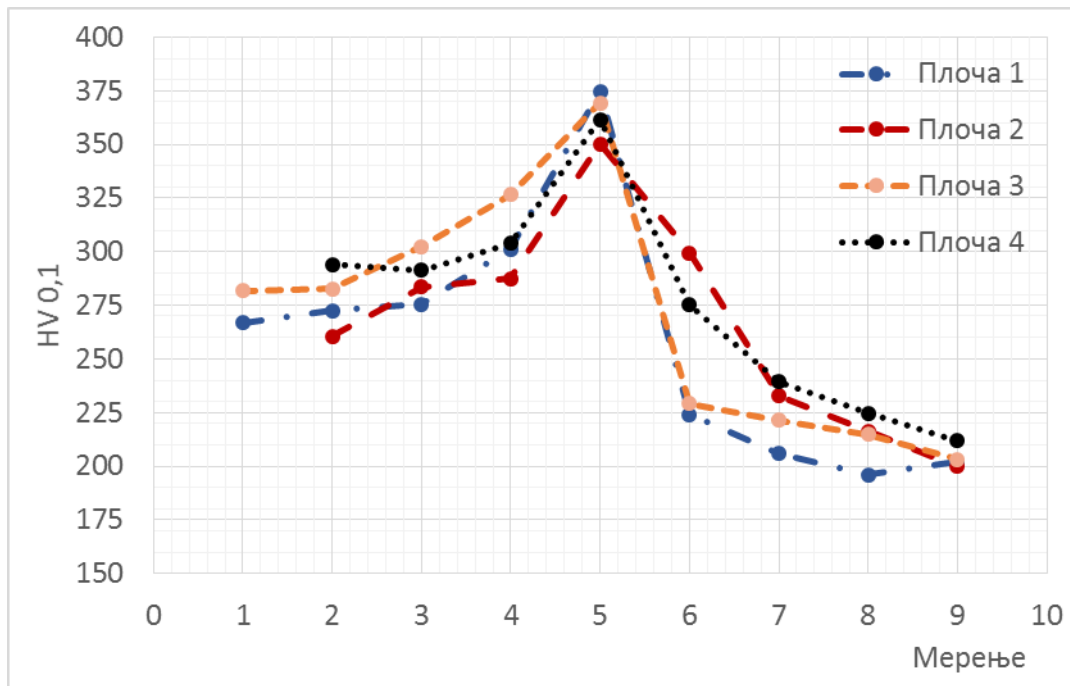
Слика 6.81. Дистрибуција тврдоће на месту спајања два челика (HV0.1 плоча 3).



Слика 6.82. Дистрибуција тврдоће на месту спајања два челика (HV0.1 плоча 4).

Мерења микротврдоће на споју су показала да је само уска зона била подвргнута значајном отврдњавању деформацијом (слика 6.79 до 6.82) у односу на периферне зоне. Вредност микротврдоће на површини споја узорка, после експлозивног заваривања је највећа. Према табели 6.11, ширина ове зоне се повећавала са повећањем масе експлозива. Испитивање је показало повећање тврдоће у близини споја приближно 27% за алатни челик, док је повећање тврдоће конструкционог челика износило приближно 20% у односу на тврдоћу ван споја.

На свакој страни површине споја, вредност микротврдоће се постепено смањује, а затим постаје стабилна како се растојање од места споја повећава. Ово је углавном због пластичне деформације у близини споја која настаје када се две плоче сударе једна са другом великом брзином током експлозивног заваривања. Пластична деформација узрокује отврдњавање материјала, што побољшава тврдоћу материјала; што је ближе споју, то је већа пластична деформација. Када растојање од споја пређе одређено растојање, не долази до пластичне деформације. Овај феномен је у складу са претходним истраживањем које су вршили Касаг и Асарер (Касаг, 2004) (Yingbin, 2019). На слици 6.83 приказан је дијаграм средњих вредности микротврдоће испитиваних узорака.



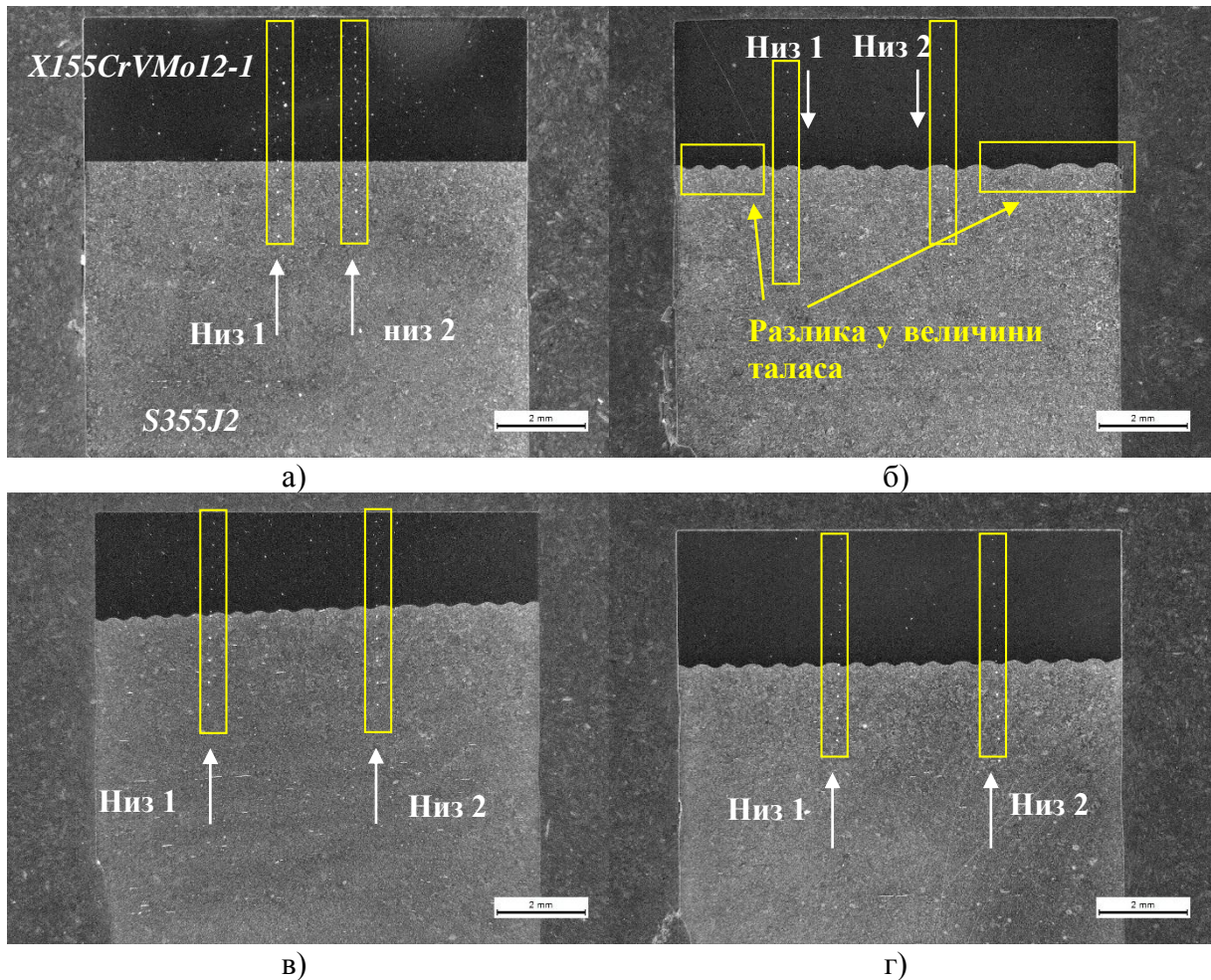
Слика 6.83. Дистрибуција тврдоће на месту спајања два челика (HV0.1 све плоче).

Упоређивањем вредности микротврдоће у различитим условима заваривања, што је већа количина експлозива, то је већа вредност микротврдоће на споју, што указује на већи степен очвршћавања на обе стране површине споја. Ово је углавном зато што је већа количина експлозива, то је већа брзина судара две плоче, што доводи до већег ударног притиска и пластичне деформације током процеса судара.

### 6.13. Испитивање тврдоће након каљења по Vickers-у

Испитивање микротврдоће завареног споја рађено је у истим условима као што је описано у претходном поглављу. На слици 6.84 приказана су места и трагови мерења микротврдоће на узорцима. Испитивање тврдоће након каљења извршено је у циљу проналажења потенцијалне примене материјала добијених експлозивним заваривањем, детаљније описана у првом поглављу (Тачка 1.4).

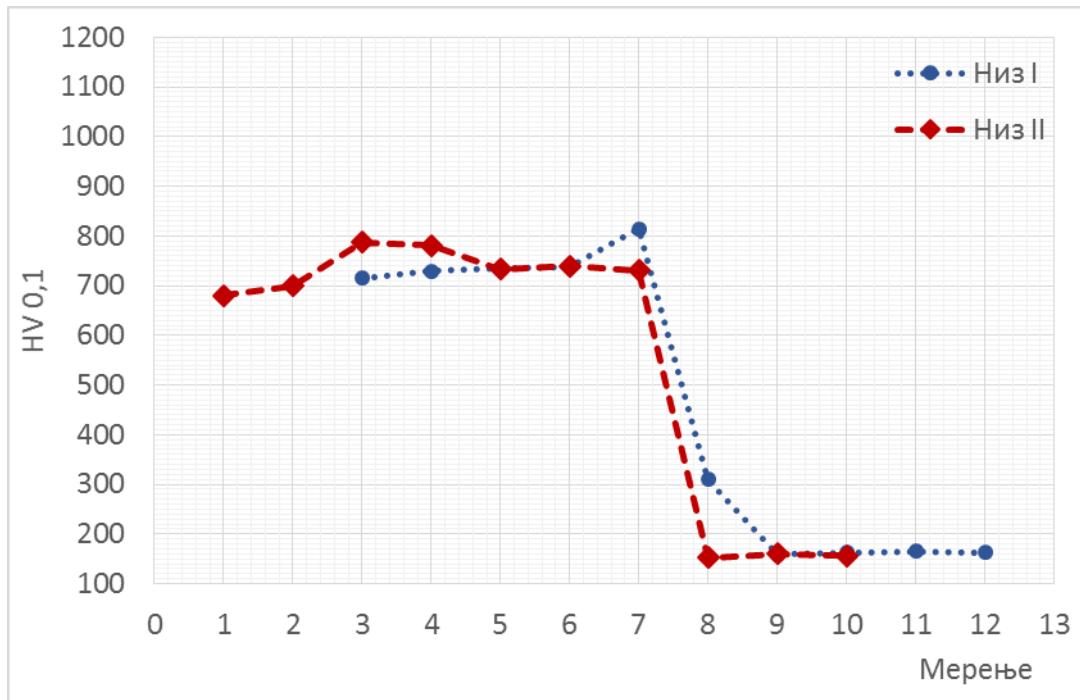
Вредности микротврдоће кроз заварени спој приказане су у табели 6.13, а одговарајући дијаграми расподеле приказани су на слици 6.85 до 6.88.



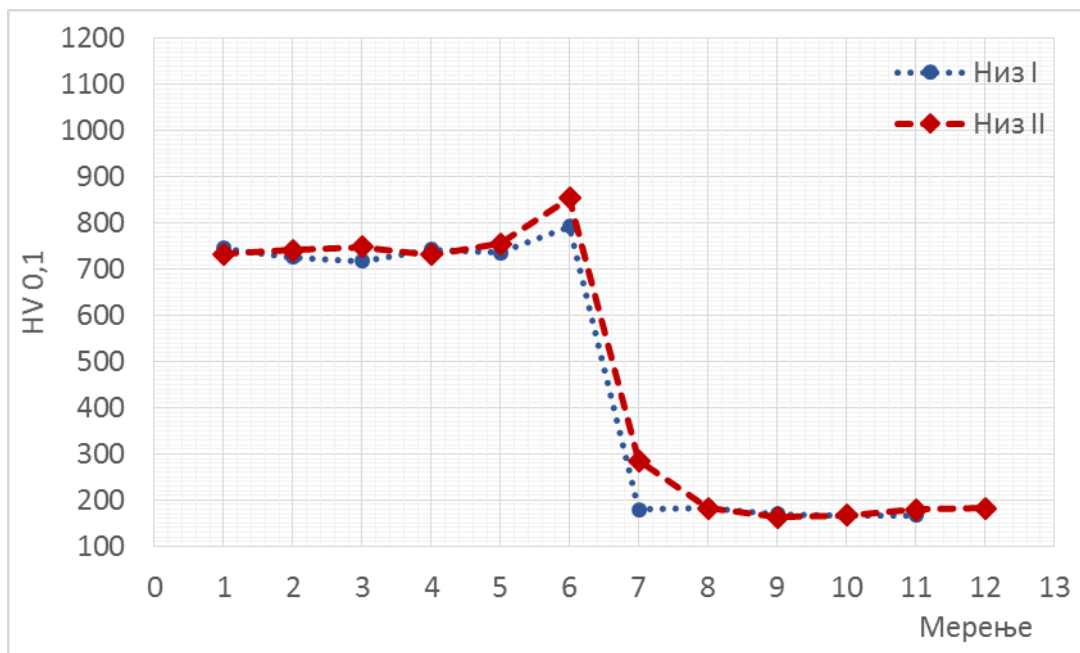
Слика 6.84. Места мерења микротврдоће на узорцима: а) 1-13, б) 2-13, в) 3-13 и г) 4-13.

Табела 6.13. Вредности микротврдоће завареног споја након каљења.

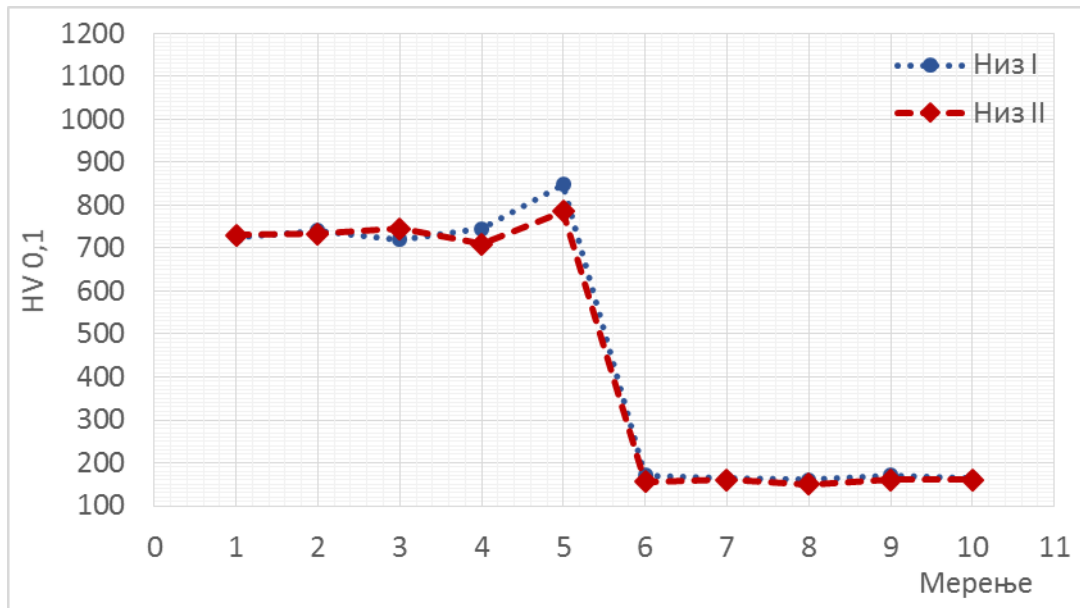
Плоча 1	Алатни челик							Конструкциони челик		
Број испитивања	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
HV0,1	715,4	729,7	734,5	738,2	814,6	309,4	159,1	163,2	165,3	162,1
	786,9	781,1	733,2	739,7	730,4	152,4	159,7	156,5	-	-
Средња вредност	751,2	755,4	733,9	739,0	772,5	230,9	159,4	159,9	-	-
Плоча 2	Алатни челик							Конструкциони челик		
HV0.1	746,0	725,5	718,4	743,1	735,5	792,7	180,0	183,3	169,3	167,5
	732,8	741,6	748,9	732,2	755,3	854,7	285,5	182,4	162,2	166,9
Средња вредност	739,4	733,6	733,7	737,7	745,4	823,7	232,8	182,9	165,8	167,2
Плоча 3	Алатни челик					Конструкциони челик				
HV0.1	725,5	740,1	719,7	745,5	848,8	170,5	163,1	160,5	171,6	163,1
	731,1	733,1	745,3	709,5	785,7	156,8	160,0	150,3	161,0	160,6
Средња вредност	728,3	736,6	732,5	727,5	817,3	163,7	161,6	155,4	166,3	161,9
Плоча 4	Алатни челик							Конструкциони челик		
HV0.1	725,0	776,2	767,7	1124,3	758,3	794,5	748,5	262,9	161,6	164,5
	739,4	779,7	736,7	757,2	755,9	743,3	741,3	174,7	170,4	170,4
Средња вредност	732,2	778,0	752,2	940,8	757,1	768,9	744,9	218,8	166,0	167,4



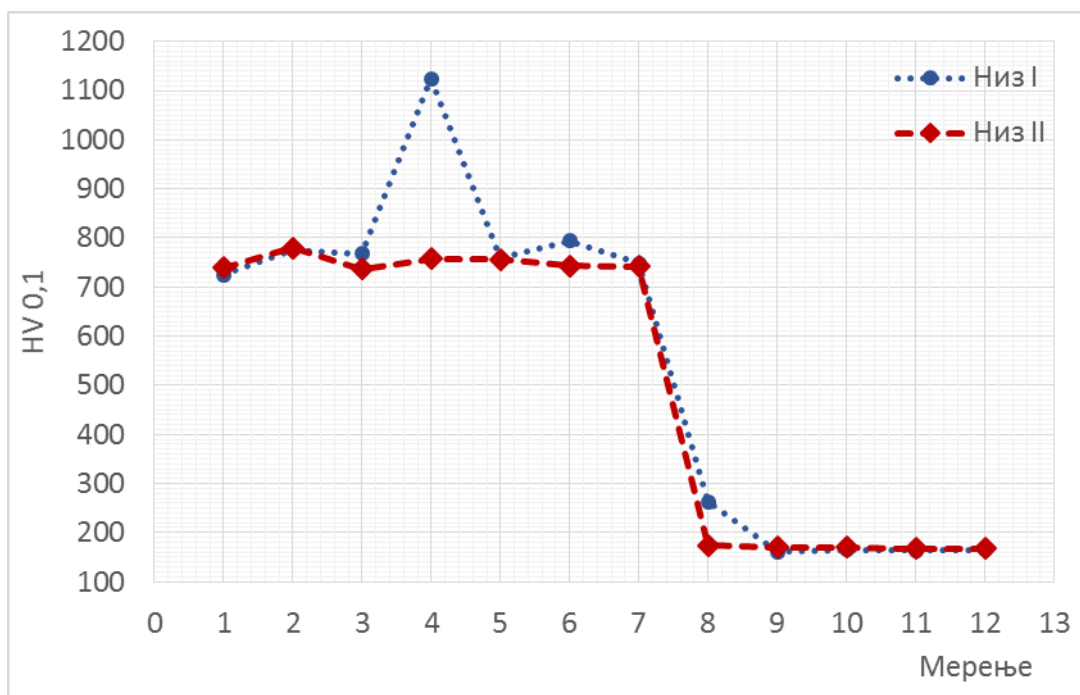
Слика 6.85. Дистрибуција тврдоће на месту спајања два челика након каљења (HV0.1 плоча 1).



Слика 6.86. Дистрибуција тврдоће на месту спајања два челика након каљења (HV0.1 плоча 2).

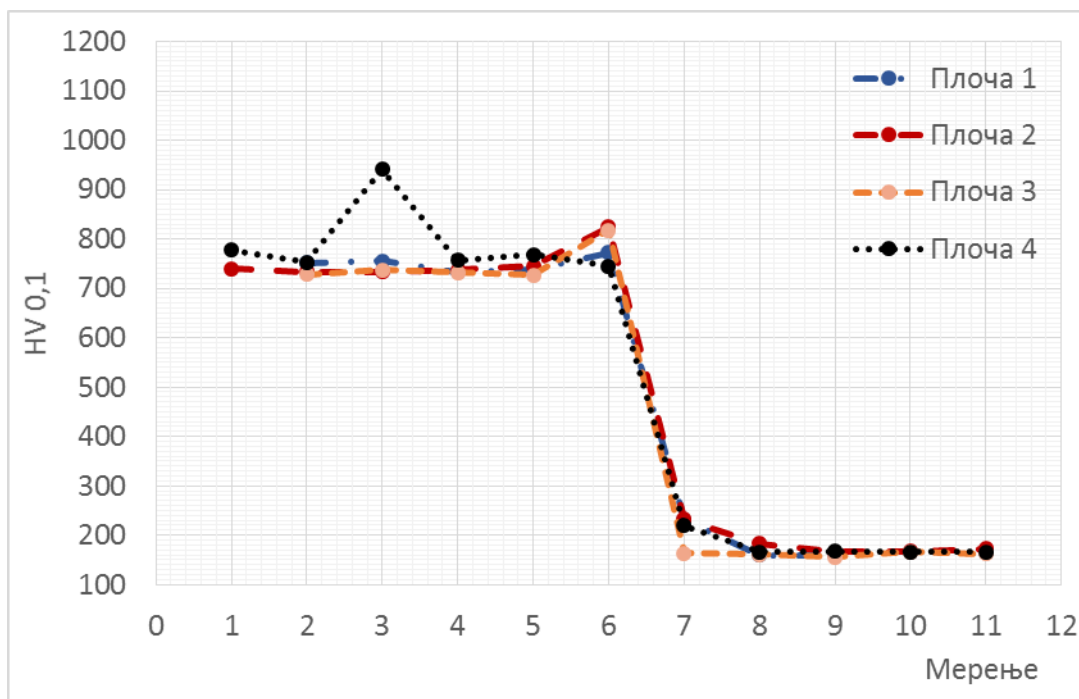


Слика 6.87. Дистрибуција тврдоће на месту спајања два челика након каљења (HV0.1 плоча 3).



Слика 6.88. Дистрибуција тврдоће на месту спајања два челика након каљења (HV0.1 плоча 4).

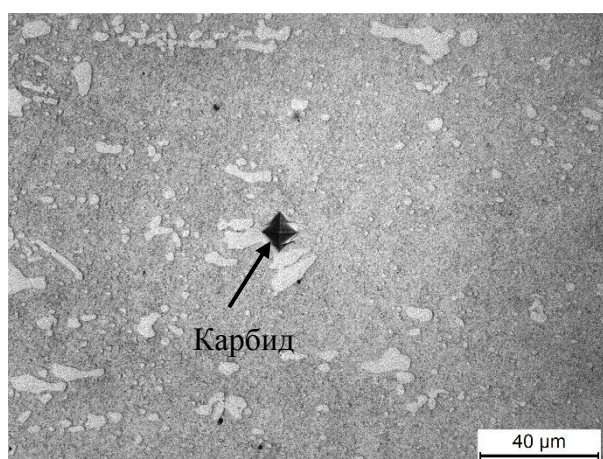
На приказаним дијаграмима расподеле микротврдоће (слике 6.85 до 6.88) уочава се да материјал *X155CrVMo12-1* има знатно већу тврдоћу од материјала *S355J2*. На слици 6.89 приказан је дијаграм средњих вредности микротврдоће испитиваних узорка.



Слика 6.89. Дистрибуција тврдоће на месту спајања два челика након каљења (HV0.1 све плоче).

У зони споја уочава се локално повећање тврдоће. Испитивање је показало повећање тврдоће у близини споја приближно 10% за алатни челик, док је повећање тврдоће конструкционог челика износило приближно 32% у односу на тврдоћу ван споја. Није примећено да код узорака који су подвргнути термичкој обради долази до ширења зоне очвршћавања као што је примећено код узорака који нису подвргнути термичкој обради.

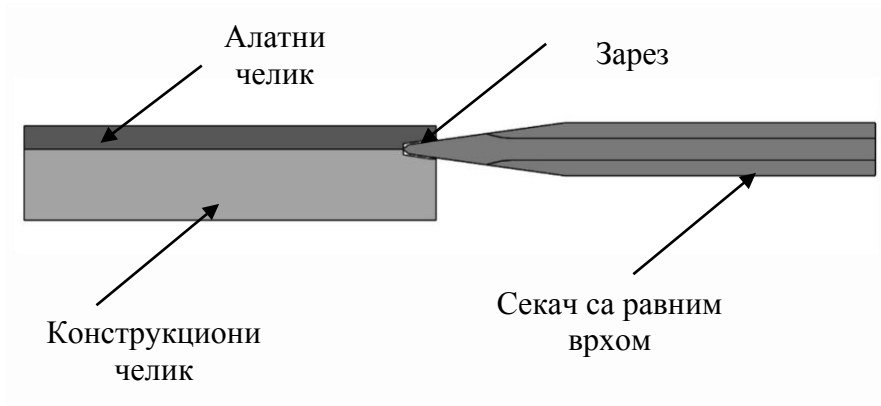
На дијаграму приказаном на слици 6.88 уочен је нагли пораст микротврдоће (1124,3 HV), код материјала *X155CrVMo12-1*. Добијена вредност одговара мерењу микротврдоће на месту карбида, приказаном на слици 6.90. Због процеса нормализације, није уочено повећање тврдоће у зависности од количине експлозива као у претходном поглављу.



Слика 6.90. Место мерења микротврдоће на узорку 4-13, карбид.

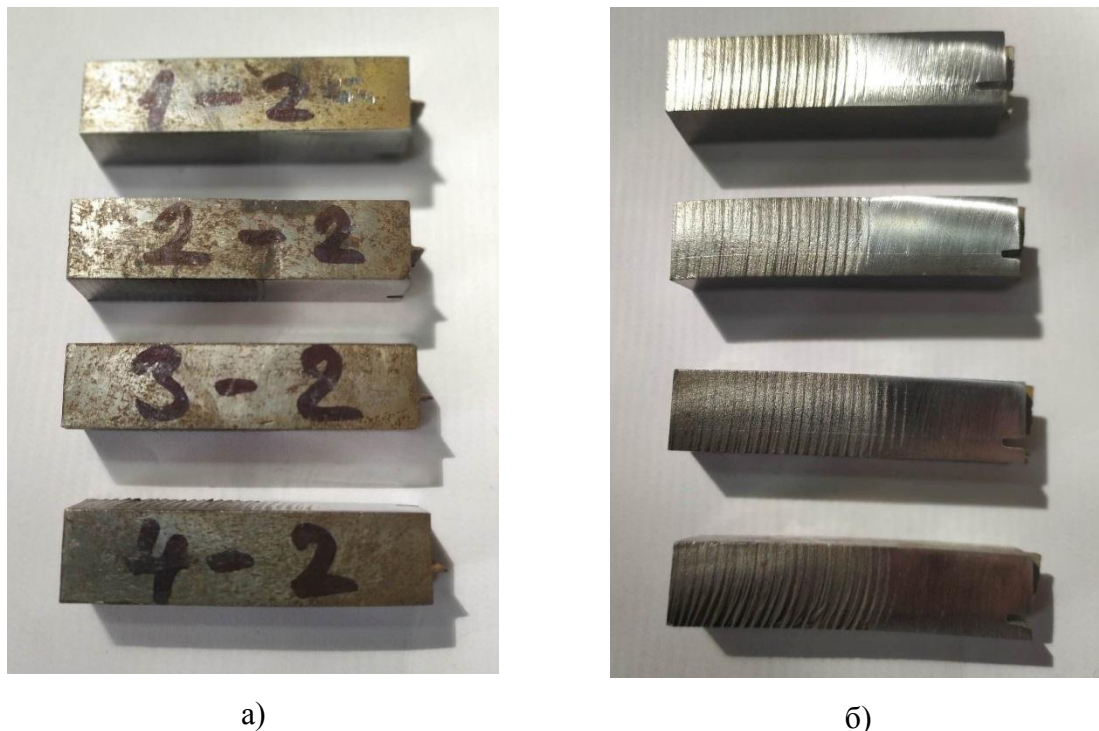
## 6.14. Тест равним секачем

Ово је једноставан, али веома важан тест, приказан је на слици 6.91. Секачем се покушава одвајање плоча. Лако одвајање плоча указује на непотпуно заваривање. Развој прслине цепањем, зареза, може изазвати лом померањем површина прслине тако да се оне отварају управно на првобитну раван (Ђорђевић, 2021).



Слика 6.91. Шема испитивања равним секачем.

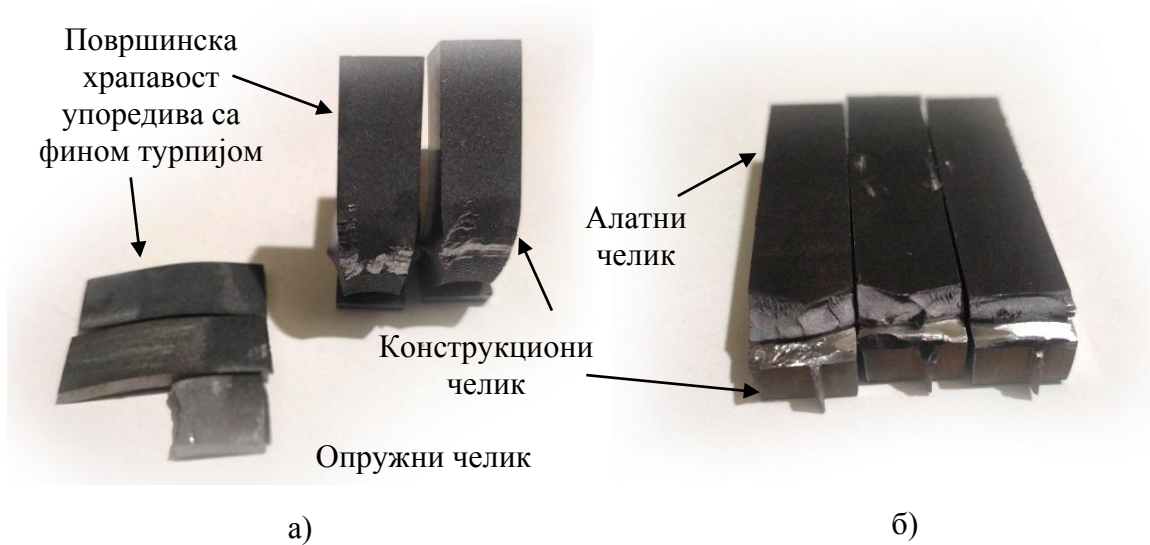
Површине узорка су очишћене и одмашћене на месту испитивања. Брусном плочом се формира зарез на месту споја алатног и конструкционог челика. Зарез је дубине 3-4 mm и ширине 1,5 mm (слика 6.92б).



Слика 6.92. Одабир узорка (лево), припрема узорка (десно).

Равни секач се поставља на засечено место и ударањем чекићем врши се раздвајање два метала. Снага везе дефинише начин на који ће се метали раздвојити. У случају лошег заваривања доћи ће до пуцања на месту споја применом мале ударне силе. У том случају

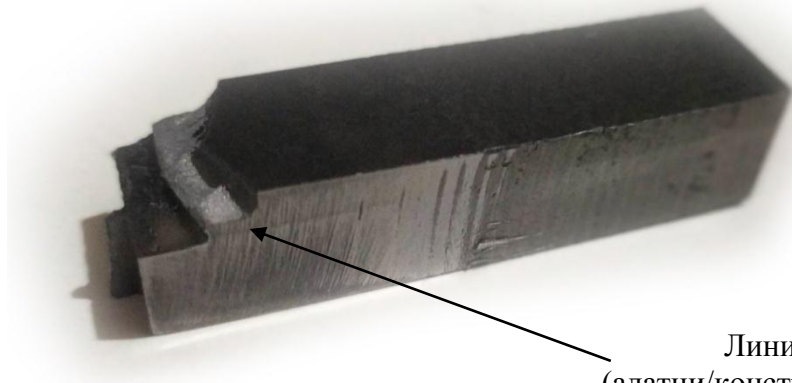
на површинама споја могуће је уочити таласасту површину налик површини турпије (слика 6.93а). Лош спој може бити проузрокован, малом количином експлозива, лошом припремом површине или због појаве растопљеног међуспоја.



Слика 6.93. Испитивани узорци, а) лоше заварен спој (опружни челик), б) добро заварен спој (алатни челик).

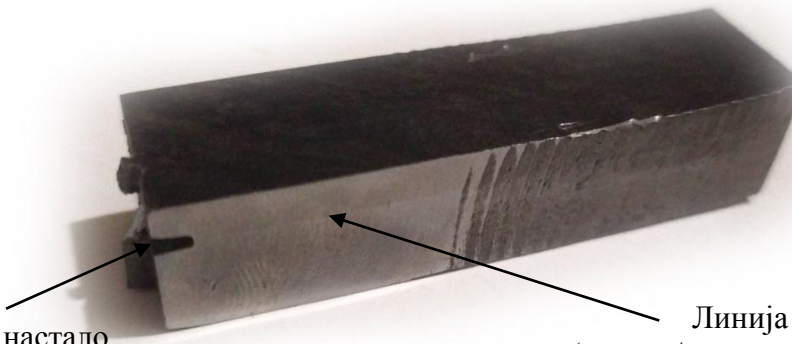
У случају доброг квалитета завареног споја, раздвајање није могуће или се јавља удаљено од места споја (слика 6.93б). Резултати испитивања споја алатног и конструкционог челика су приказани на слици 6.94 и слици 6.95.





Узорак 1-2

Линија споја  
(алатни/конструкциони челик)

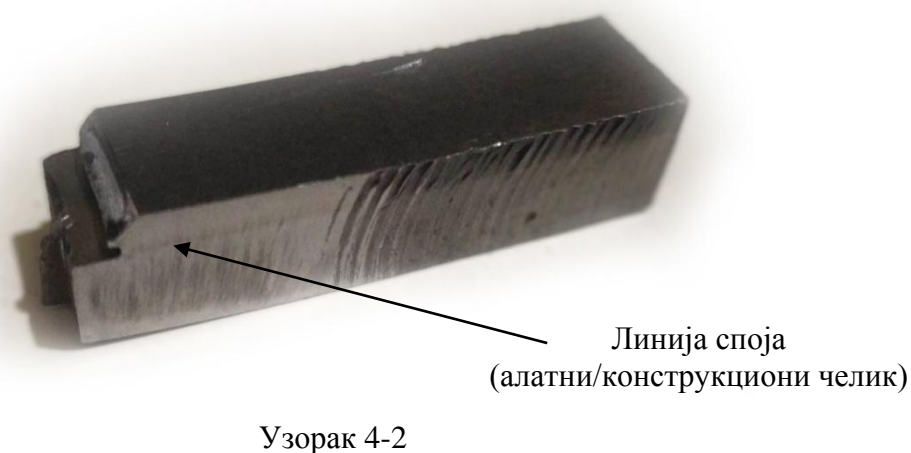
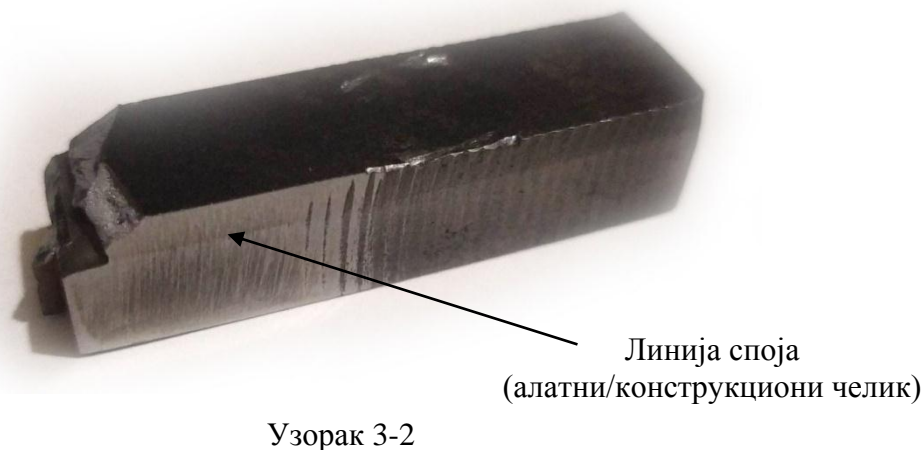


Оштећење настало  
дејством секача

Узорак 2-2

Линија споја  
(алатни/конструкциони челик)

Слика 6.94. Узорци након теста (узорак 1-2 и 2-2).



Слика 6.95. Узорци након теста (узорак 3-2 и 4-2).

Маса чекића износи пет килограма. Испитивање опружног челика вршено је ударањем чекићем секачем на месту споја неколико пута. Због јачине везе није било потребе применити већу силу јер је дошло до раздвајања споја након трећег ударца (слика 6.93а). Испитивање алатног челика вршено је на сличан начин. Примењена ја слична сила али није дошло до разарања споја код свих узорак. Замах и импулс силе је повећан до границе безбедног извођења испитивања. Након петог ударца дошло је до лома алатног челика и до разлетања парчади (слика 6.94 узорак 1-2 и 2-2 и слика 6.95 узорак 3-2 и 4-2). Визуелним прегледом установљено је да оштећење има оштре ивице што је једна од карактеристика кртог лома. На узорцима није уочена деформација споја. Слика 6.94 приказује узорак 2-2 који је претрпео минимално оштећење. Деловањем импулсне силе није дошло до лома алатног челика као код осталих узорак. Оваквим начином испитивања се на полигону, ван лабораторије, врло лако и једноставно могу одредити квалитативни параметри. Квантитативни параметри се могу добити у лабораторијским условима дефинисањем силе ударца.

## 7. ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА

Предмет ове докторске дисертације представља истраживање у области примене неконвенционалног извора енергије - експлозије, за развој нових материјала и технолошких процеса. Разматрана је примена експлозивног заваривања за добијање биметалног челика са комбинацијом високолегираног алатног челика и нискоугљеничног челика и методе за испитивање квалитета оствареног споја. Оваква комбинација челика налази намену за израду различитих ножева (сечива) за графичку индустрију, индустрију прераде дувана и сл.

Урађени су неопходни прорачуни потребни за реализацију експлозивног заваривања. На основу прорачуни везаних за безбедносни аспект утицаја притиска насталог експлозијом на привремени губитак слуха и трајно оштећење услед пуцања бубне опне, анализиран је утицај експлозије при експлозивном заваривању, при чему се могу донети следећи закључци:

- Критично растојање експлозије добијено методом Sadovskog, под условом максималног притиска при којем долази до привременог губитка слуха на равном терену износи 18,71 m, док критично растојање експлозије у условима максималног притисак при којем долази до пуцања бубне опне, на равном терену износи 5,94 m.
- Критично растојање експлозије добијено Kingery-Bulmash методом, под условом максималног притисак када долази до привременог губитка слуха, на равном терену износи 23,1 m. Критично растојање експлозије добијено истом методом у условима максималног притисак када долази до пуцања бубне опне, на равном терену износи 7,00 m.
- Критично растојање експлозије добијено методом Sadovskog са коефицијентима из (Вајић, 2009), под условом максималног притисак при коме долази до привременог губитка слуха, на равном терену износи 23,10 m, а критично растојање експлозије добијено овом методом у условима максималног притисак када долази до пуцања бубне опне, на равном терену износи 7,47 m.
- Једначина Sadovskog је првобитно развијена за врло велике количине експлозива, тако да се поставља питање њена применљивост у разматраним случајевима. Прорачун са коефицијентима из (Вајић, 2009) показују да добијени резултати не одступају значајно од резултата добијених Kingery-Bulmash методом. Kingery-Bulmash метода која се користи у међународним прописима и применљива је и у случајевима заваривања експлозијом.

Прорачун експлозивног заваривања је обухватао низ параметара којима се дефинише област заварљивости. Ови параметри морају бити задовољени за добијање квалитетног завареног споја. У дисертацији разматран утицај следећих параметара на особине завареног споја:

- Количина потребног експлозива и
- Брзина детонације експлозива.

Приказана експериментална поставка обухватала је избор полазних материјала: експлозива, електрично детонаторских каписли, плоча, кутијастих елемената и др. Обављање припремних радњи: сечење и уклањање оксидног слоја плоча, формирање кутијастих елемената са уметком за електричну детонаторску капислу, обезбеђење алата и прибора за теренске услове, обезбеђење адекватног полигона за извођење експеримента, обезбеђење пиротехничког тима за реализацију експеримента и др. Након успешног обављања експлозија и добијања заварених плоча, подвргнуте су деструктивним и недеструктивним методама испитивањима. Прелиминарна испитивања су вршена експлозивним заваривањем опружног легираног челика и конструктивног челика са различитим количинама експлозива веће брзине детонације. Коначни експеримент је извршен експлозивним заваривањем алатног и конструкционог челика са експлозивом одговарајуће брзине детонације и то са:

- 540 грама,
- 640 грама,
- 740 грама и
- 850 грама експлозива.

Испитивања са и без разарања су уређена коришћењем већег броја метода и применом савремене мерне опреме у сврху одређивања квалитета добијеног споја. Сви добијени резултати су анализирани на основу количине коришћеног експлозива за сваку заварену плочу посебно.

Анализом добијених аналитичко-експерименталних резултата испитивања експлозивно завареног алатног и конструкционог челика закључено је следеће:

- Ултразвучном дефектоскопиом откривене су незаварене области, које се не разликују много од оних описане у доступној литератури. Код свих узорака није дошло до спајања метала на месту иницирања експлозива и на периферним деловима плоча.
- Рендгенографско испитивање није дало много корисних информација. Рендгенографијом је откривено стањивање материјала на месту иницирања код свих плоча. Откривена је прслина која се појавила након извршеног експеримента због велике деформације. Рендгенографским испитивањима није могуће тачно одредити области завареног споја.
- Испитивање профилометрисањем је проверена површинска хрпавост припремљених плоча. Установљена је површинска хрпавост истог реда величине које задовољавају критеријум за добијање најквалитетнијег споја.
- Механичко испитивање равним секачем припремљених исечених узорака се показала као јефтина и поуздана метода испитивања завареног споја. Испитивање конзистентности споја средишњег дела може се испитати на лицу места уметањем равног секача у процеп на периферним незавареним местима. У случају да овај тест покаже задовољавајуће резултате постоје основе за даља неопходна испитивања квалитета добијених заварених плоча.
- Пенетрантско испитивање споја није показало заостале трагове пенетранта по целој дужини споја. Није уочена никаква пукотина на свим испитиваним узорцима.

- Метода металографског испитивања недвосмислено открива несавршености споја код опружног челика (непровар, пукотине, топљење и мешање материјала, стање материјала пре заваривања, појаву укључака тракавости и слично). Металографска испитивања алатног челика рађена на скенирајућем електронском микроскопу, металуршком и оптичком микроскопу показују савршен синусни спој на плочама које су добијене са 640, 740, 850 грама експлозива. Свака количина експлозива је дала разлику таласне дужине и амплитуде таласа. Због коришћења различите количине експлозива дошло је до веће или мање деформације у близини споја. Дубина пенетрирања једног материјала у други и обрнуто је у линеарној зависности од количине експлозива. Таласести спој је континуалан по целој дужини испитиваног узорка (55 mm). Приликом активирања најмање количине експлозива није дошло до формирања таласасте структуре због пада брзине детонације, нестабилног режима простирања детонационог таласа и самим тим изласком из зоне оптималног заваривања. У непосредној близини споја, феритна зрна су била значајно растегнута дуж таласног профила и, сходно томе, скупљена у попречном правцу. У испитиваним узорцима вртложне зоне су лоциране са једне стране врха или корита таласа упоредиво са морским таласима.
- Микроструктура алатног челика свих узорака, након термичке обраде, састоји се од мартензита и нерастворених карбида, што потврђују и добијене високе вредности микротврдоће.
- Микроструктуру конструкционог челика свих узорака, након термичке обраде, чине ферит и перлит.
- На линији стапања није уочена зона топљења, односно, мешања основних материјала.
- Испитивање отпорности на кавитацију показало је да након дејства кавитације није дошло до груписања јамица на споју већ су оне равномерно распоређене по површини. Добијене вредности показују да је дошло до губитка материјала. Највећи губитак масе је код узорка 1-10. Разлог за оволико одступање у односу на резултате код осталих узорака може бити у неправилно завареном споју, односу у одсуству таласасте форме споја, што металографска испитивања потврђују. Губитак масе код узорака 2-12, 3-11 и 4-11 је сличан али показује благу зависност губитка масе у односу на количину употребљеног експлозива. Што је количина експлозива већа, то је већи губитак масе. Дејство кавитације је показало да се узорак понаша као монолитна структура.
- Испитивање ударне жилавости узорака је показало вредности упоредиве са вредностима ударне жилавости конструкционог челика.
- Испитивање тврдоће је показало повећање тврдоће у близини споја приближно 27% за алатни челик, док је повећање тврдоће конструкционог челика износило приближно 20% у односу на тврдоћу ван споја. Што је већа количина експлозива, то је шири зона повишених вредности микротврдоће, што указује на већи степен ојачавањана обе стране површине споја.
- Испитивање након каљења је показало повећање тврдоће у близини споја приближно 10% за алатни челик, док је повећање тврдоће конструкционог челика износило приближно 32% у односу на тврдоћу ван споја. Није примећено да код

узорака који су подвргнути термичкој обради долази до ширења зоне ојачавања као што је примећено код узорака који нису подвргнути термичкој обради.

- Испитивање споја алатног челика равним секачем, показало је лом алатног челика ван линије споја. Узорак који је заварен са 640 грама експлозива је претрпео минимално оштећење без лома. Потврда зашто није дошло до лома може се видети код претходног испитивања где је установљено да плоча која је заварена наведеном количином експлозива има највећу вредност ударне жилавости. Испитивањем опружног челика слика је потпуно другачија. На два узорак, применом мале силе, дошло је до раздвајања метала по линији споја.
- Темичка обрада је урађена успешно без појаве видљивих прелина или деформација.

Реализована испитивања су омогућила овладавањем потребним знањима како за припрему и добијање успешно завареног споја, тако и методама за утврђивање квалитета ново добијеног експлозивно заварених двослојног материјала.

На основу експерименталног испитивања и претходног теоријског разматрања могу се дефинисати могући правци наредних истраживања:

- Проширити област експлозивног заваривања на многе друге материјале (различите комбинације железних и не железних материјала),
- Повећањем површине плоча истражити утицај на смањење ивичних ефеката и повећање површина корисног материјала,
- Истражити утицај примене различитих помоћних/приручних алата у поставци, другачије поставке дистанцера, примене адекватног уводника за активирање експлозива, и слично.
- Истраживање утицаја растојања плоче које се заварују, као и различитог угла постављања плоча,
- Истраживање утицаја различитих подлога за постављање стационарне плоче,
- Даље истраживање утицаја различитих врста експлозива и брзина детонације,
- Истраживање могућности добијање вишеслојних материјала (експлозивно заваривање три и више материјала),
- Испитивањем отпорности материјала на кавитацију у дужем временском периоду како би се добила јаснија слика ерозије.
- Истраживање примене других деструктивних метода на одређивање квалитета завареног споја,
- Експлоатациона испитивања различитих комбинација заварених материјала,
- Даља испитивања примене термичких обрада,
- Даљи развој метода за дефинисање примене експлозивно завареног споја не само легираног алатног и конструкционог челика и метода за испитивање квалитета оствареног споја,
- Креирање информационог система о резултатима испитивања и примене експлозивно заварених материјала, итд.

## 8. ЛИТЕРАТУРА

AASTP-1, 2010, Manual of NATO safety principles for the storage of military ammunition and explosives, Ed.1, Change 3,

Abrahamson G. R., 1961, Peranent periodic surface deformations due to a travelling jet. J. Appl. Mech. 28(4): 519-528 <https://doi.org/10.1115/1.3641777>.

Addison H., Kowalick J., Cavell W., 1969, Explosion welding of cylindrical shapes. Department of the army Frankford arsenal Philadelphia, Pa. 19137.

Ahasan Habib M., Ruan L.Q., Kimura R., Manikandan P., Hokamoto K., 2013, Cladding of Titanium and Magnesium Alloy by Explosive Welding Using Underwater Shockwave Technique and Effect on Interface, Materials Science Forum (Volume 767).

Aleksić V., Dojčinović M., Milović Lj., Zečević B., Maksimović A., 2021, Mehanizmi i morfologije kavitacionog oštećenja čelika Nionikral 70, Zastita Materijala 62 broj 2, <https://doi.org/10.5937/zasmat2102095A>.

Alil A., 2017, Materijal za obuku – ispitivanje tehničkim penetrantima, Apave VerTech, Beograd.

Anđelić U., Simić D., Terzić S., Dimitrijević I., Borković Z., 2018, „Improvement of experimental method for detonation velocity determination,“ International Scientific Conference on Defensive Technologies OTEH, Beograd.

ASTM G 32 - 03, 2010, Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus, ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.

ASTM G32-10, 2010, Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus, ASTM International, West Conshohocken, PA, [www.astm.org](http://www.astm.org), n.d

ASTM: E23-07, 2007, Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. Diamet.

Aziz A. K., Hurwitz, H. and Sternberg, H. M., 1961, Energy transfer to a rigid piston under detonation loading, Phys. Fluids, 4, 380--4.

Bahrani A. S. and Crossland, B., 1964, Proc. Inst. Mech. Eng., 179, 264.

Bajić Z. & Bogdanov J. & Jeremić R., 2009. Blast Effects Evaluation Using TNT Equivalent. Scientific Technical Review. 59(3), p.50. Доступно на: <http://www.vti.mod.gov.rs/ntp/rad2009/34-09/7/7.pdf>.

Bataev I. A., 2019. Towards better understanding of explosive welding by combination of numerical simulation and experimental study, Materials and Design 169(1), Доступно на: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107649>. (Accessed 05.31.2020.)

Bataev I.A., Tanaka S., Zhou Q., Lazurenko D.V., Jorge Junior A.M., Bataev A.A., Hokamoto K., Mori A., Chen P., 2019, Towards better understanding of explosive welding by combination of numerical simulation and experimental study. Materials & Design, Volume 169, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107649>.

Becker N., Gauthier D., Vidal E., Vidal E., 2020, Fatigue Properties of Steel to Aluminum Transition Joints Produced by Explosion Welding, International Journal of Fatigue 139:105736,

<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105736>.

- Beveridge A. 2012. Forensic Investigation of Explosions. Florida: Boca Raton. CRC Press.
- BlackBox Biometrics, 2018, Pressure thresholds: what your medic needs to know. New York: Blast Gauge System.
- Blazynski, T. Z., 1983, Explosive Welding Forming and Compaction. Springer Netherlands.
- Branislav R.Đ., 2021, Žilavost feritnog reaktorskog čelika u području prelazne temperature, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu mašinski fakultet, Beograd.
- Brode, H.L., 1955, Numerical solutions of spherical blast waves. J. Appl. Phys., 26, pp.766–775, Доступно на: <https://doi.org/10.1063/1.1722085>.
- Carpenter S.H., Wittman, R.H., 1975, Explosion Welding. Annu. Rev. Mater. Sci. 5, 177–199. <https://doi.org/10.1146/annurev.ms.05.080175.001141>.
- Carton E. P., 2004, Wave Forming Mechanisms in Explosive Welding, Materials Science Forum Vols. 465-466 pp. 219-224
- Carvalho G., Galvao I., Mendes R., Leal M., Loureiro A., 2018, Explosive welding of aluminium to stainless steel. Journal of Materials Processing Technology.
- Carvalho G., Galvão I., Mendes R.M., Leal R., Loureiro A., 2020, Aluminum-to-Steel Cladding by Explosive Welding. Metals 10, 1062. <https://doi.org/10.3390/met10081062>.
- Corigliano P., Crupi V., Guglielmino E., Sili A.M., 2018, Full-field analysis of AL/FE explosive welded joints for shipbuilding applications, Marine Structures, <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2017.10.004>.
- Coskun T.K., 2015, J. Phys.: Conf. Ser. 602 012026
- Cowan G.R., Bergman D.R., Holtzman A.H., 1971, Mechanism of Explosive Bonding. Metall. Trans. 2 3145-3155.
- Crossland B., 1982. Explosive welding of metals and its application. Clarendon Press, Oxford.
- Crossland B., Williams J., 1970, Explosive welding. Metallurgical reviews.
- Deribas A.A., 1967 Proc. Sympos. Behavior of Dense Media Under High Dynamic Pressures, Paris.
- Deribas A.A., Zakharenko I.D., 1974, Surface effects with oblique collisions between metallic plates, Combust. Explosion Shock Waves 10 (3) 358–367, <https://doi.org/10.1007/BF01463767>.
- Dojčinović M., T. Volkov-Husovic, 2008, Cavitation damage of the medium carbon steel: Implementation of image analysis, Materials Letters, 62.
- Dojčinović I., Trklja N., 2023, Primenjena spektroskopija – praktikum (radna verzija), Fizički fakultet, Univerzitet u Beogradu. Доступно на: <https://emineter.files.wordpress.com/2019/12/d09fd180d0b0d0bad182d0b8d0bad183d0bc-d0b8d0b7-d0a4d0b8d0b7d0b8d0bad0b5-d0b0d182d0bed0bcd0b0-3.-d0b4d0b5d0be.pdf>
- Dojčinović M., 2007, Uticaj strukture na mehanizam razaranja čelika pod dejstvom kavitacije, doktorska disertacija Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd.



- Dojčinović M., 2013, Razaranje materijala pod dejstvom kavitacije, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, ISBN: 978-86-7401-305-2, str.99.
- Dorđević V., Vukićević M., 1998, Mašinski materijali, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd.
- Franc J.P., Michel J.M., 2004, Fundamentals of Cavitation, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Gale W.F., Totemeier T.C., 2004, Smithells Metals Reference Book (Eighth Edition), <https://doi.org/10.1016/B978-075067509-3/50036-1>.
- Ghomi M., 2009, Impact wave process modeling and optimization in high energy rate explosive welding, Mälardalen University Press Licentiate Theses.
- Gilbert F.K. & Kenneth J.G., 1985, Explosive Shocks in Air. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Gupta K., Jain N.K., 2016, Near - Net Shape Manufacturing of Miniature Spur Gears by Wire Spark Erosion Machining. Singapore: Springer Singapore.
- Hampel H. Some aspects of explosive tube to tubeplate welding in heat exchangers, *ibid.* ref. 19,173-85.
- Henan Gang Iron and Steel Co. Ltd. , 2023, Доступно на: <http://www.steelspecs.com/EN10025-2/EN10025-2S355J2G3STEELPLATE.html>
- Hermetic solutions group, 2023, Доступно на: <https://www.hermeticsolutions.com/wp-content/uploads/2019/07/bonded-maritime-industrial-web.pdf>
- High Energy Metals, Inc, 2023, Доступно на: [http://www.explosionbonding.com/ground\\_straps.htm](http://www.explosionbonding.com/ground_straps.htm).
- High Energy Metals, Inc., Explosive Metalworking Experts, 2023, Penetrantsko ispitivanje, Доступно на: <http://highenergymetals.com>.
- IATG 01.80., 2015, International Ammunition Technical Guideline - Formulae for ammunition management, Ed. 2, United Nations Office for Disarmament Affairs, New York.
- IATG 01.80., 2021, International Ammunition Technical Guideline - Formulae for ammunition management, Ed. 3, United Nations Office for Disarmament Affairs, New York.
- Incognlegde, 2015, Chapter 337 Blast-Induced Neurotrauma. New York: Clinicalgate.
- IMW Institut, 2023, Доступно на: <https://imw.rs>
- Insze, 2023, Доступно на: <https://www.insz.eu/drsnometry/drsnomer-insize-isr-c002/>.
- ISR-C002 INSIZE, 2023, Доступно на: <https://store.gaging.com>
- IUZ, 2023, Ispitivanje udarne žilavosti na sobnoj i sniženim temperaturama
- IZV, Ispitivanje žilavosti-Vezba 6, 2023, Masinski fakultet, Vežbe predlog Mehanika, Доступно на: <https://www.docsity.com/sr/ispitivanje-zilavosti-vezba-6-masinski-fakultet/280135/>
- Jeremić R., 2002, Eksplozivni procesi. Belgrade: GŠ VJ, Uprava za ŠiO VA (in Serbian).

- Jindrich K, Petr N, Martin K, Jiri P., 2016, Measurement of impact velocity of cladding metal by photonic Doppler velocimetry (PDV), 19th New Trends in Research of Energetic Materials, Kacar R.; Acarer, M., 2004, An investigation on the explosive cladding of 316l stainless steel-din-p355gh steel. *J. Mater. Process. Technol.*, 152, 91–96.
- Keković Z., Savić S., Komazec N., Milošević M., Jovanović D., 2011, Procena rizika u zaštiti lica, imovine i poslovanja, Centar za analizu rizika i upravljanje krizama, Beograd.
- Keller K. 1968, Investigations of explosive cladding, *Z. Metallkunde*, 59, No. 6, 503-13
- Kennedy J.E., 1970, Gurney energy of explosives: estimation of the velocity and impulse imparted to driven metal, Sandia Laboratories (New Mexico), Report No. SC-RR-70790.
- Kingery C.N. & Bulmash, G., 1984, Air Blast Parameters from TNT Spherical Air Burst and Hemispherical Surface Burst. Scotland: Ballistic Research Laboratories.
- Kinney G.F. & Graham K.J., 1985, Explosive Shocks in Air, Springer Science + Business Media.
- KOMPANIJA SLOBODA – SRBIJA, 2023, Интерна документација компаније „SLOBODA AD ČAČAK“
- Kucera J., Nesvadba P., Kunzel M., Anastacio A.C., Pachman J., 2016, Measurement of impact velocity of cladding metal by photonic Doppler velocimetry (PDV), *New Trends in Research of Energetic Materials*, Czech Republic.
- Kury J.W., Hornig H.C., Lee E.L., McDonnel J.L., Ornellas D.L., Finger M., Strange F.M., Wilkins M.L., 1965, Metal acceleration by chemical explosives, 4th Symp. on Detonation, *ONR ACR-126*, 1-13.
- Lazarević M.S., Nedić B., Bajić D.M., Đurić S., Marušić L., 2023, Quality Parameters of Explosively Welded Spring Steel and Carbon Steel. *Tehnički vjesnik*, 30 (2), 530-537. <https://doi.org/10.17559/TV-20220810110706>
- Lazarević M.S., Nedić B., Bogdanov J.Đ., Đurić S.V., 2020, Determination of the critical distance in the procedure of explosive welding. *Vojnotehnički glasnik*, vol. 68, br. 4, str. 823-844.
- Lazynski J., 1983, Mechanics of explosive welding, In *Explosive forming, welding and compaction*, Applied Science Publishers, London, 189 – 217
- Linse V.D., 1974, The Application of Explosive Welding to Turbine Components, *Research Metallurgist*, Battelle Columbus Laboratories, Columbus, Ohio.
- Liu Y., Li C., Hu X., Yin C., Liu T., 2019, Explosive Welding of Copper to High Nitrogen Austenitic Stainless Steel, *Metals*, 9(3), 339; <https://doi.org/10.3390/met9030339>.
- Lopez A., Bacelar R., Pires I., Santos T.G., Sousa J.P., Quintino L., 2018, Non-destructive testing application of radiography and ultrasound for wire and arc additive manufacturing. *Addit. Manuf.*, 21, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.03.020>.
- Mahi F.T., Dilthey U., 2016, Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, *Joining of Metals*, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.03785-1>.
- Majstorović A., Đukić V., 1988, ‘Ispitivanje mašinskih materijala’, Naučna knjiga, Beograd.

- Manufacturing Guide. 2020. Explosion Welding [online]. Доступно на: <https://www.manufacturingguide.com/en/explosion-welding>. [Accessed: 02. February 2020.].
- Markučić D., 2012, Metode nerazornih ispitivanja" [www.fsb.unizg.hr](http://www.fsb.unizg.hr).
- MCM, 2023, Inženjerska sredstva i obuka, Доступно на: [https://www.mycity-military.com/Inzinjerija/Inzinjerijska-sredstva-i-obuka\\_9.html](https://www.mycity-military.com/Inzinjerija/Inzinjerijska-sredstva-i-obuka_9.html).
- MEADinfo, 2023, Mechanical Engineer's Information Hub <https://www.meadinfo.org/2015/08/s355-steel-properties.html>
- Mendes R., Ribeiro J.B., Loureiro A., 2013, Effect of explosive characteristics on the explosive welding of stainless steel to carbon steel in cylindrical configuration. Mater. Des. 51, 182–192. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.03.069>.
- Mihaljević M., 2023, Princip ultrazvučne metode nerazornog ispitivanja, Доступно на: [https://www.fsb.unizg.hr/atlantis/upload/newsboard/07\\_12\\_2018\\_30131\\_Osnove\\_ultrazvuka.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/atlantis/upload/newsboard/07_12_2018_30131_Osnove_ultrazvuka.pdf)
- NIST, 2023, Доступно на: <https://www.nist.gov/pml>.
- Nobelclad, 2023, Доступно на: <https://www.nobelclad.com/process/explosive-welding>.
- Okada T., Iwai Y., 1990, Cavitation erosion, JSME Int. J., 33, 128-135.
- Olson D.L., Siewert T.A., Liu S., Edwards G.R., 1993, ASM Handbook Volume 6: Welding, Brazing, and Soldering, ASM International.
- Orlenko L. P. & Ohitin V. N., 2004, An explosions in the air, in Physics of Explosion (in Russian), Book 1, Edition 3, FIZMATLIT, pp.470-612
- Ovako, 2023, 51CrV4, Material data sheet Steel grade. Доступно на: <https://steelnavigator.ovako.com/steel-grades/51crv4-en100892002/>
- Panowicz R., Konarzewski M., 2016. Analysis of Criteria for Determining a TNT Equivalent. Journal of Mechanical Engineering. 63(2017)11, p.666. Доступно на: <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2016.4230>.
- Pejčinović M., 2000. Analiza postupaka obrade eksplozijom. Ph.M. thesis. Leeds: Faculty of Engineering University of Kragujevac. (in Serbian).
- Prazmowski M., Najwer M., Paul H., Andrzejewski D., 2017, Influence of explosive welding parameters on properties of bimetal Ti-carbon steel, MATEC Web of Conferences 94, <https://doi.org/10.1051/mateconf/20179402012>.
- Radić V., 2000, Izbor parametara zavarivanja eksplozijom u ravanskoj geometriji (The selection of explosion welding parameters in plane geometry), Zavarivanje i zavarene konstrukcije, 1/2000, pp.13-18, Beograd.
- Reid S.R., 1974, A discussion of the mechanism of interface wave generation in explosive welding, Int. J. Mech, Sci, Pergamon Press.
- Rice M. H., McQueen R. G., Walsh J. M., 1958, Compression of solids by strong shock waves. in Seitz and Turnbull (editors) Solid State Physics, Vol. 6, Academic Press, New York.
- Rovalma S.A., 2023, RV-2379 Cold Work Tool Steel EN/DIN 1.2379, Доступно на: [https://rovalma.com/wp-content/uploads/2018/10/RV-2379\\_datasheet.pdf](https://rovalma.com/wp-content/uploads/2018/10/RV-2379_datasheet.pdf)

Sadovskii M.A., 1952, The mechanical effect of blast waves in air with respect to data from experimental studies, physics explosions. SSSR: Akad. Nauk SSSR.

Scallan P., 2003, 4 - Material evaluation and process selection, Pages 109-170, <https://doi.org/10.1016/B978-075065129-5/50005-2>.

SEM, 2023, EDS, Доступно на: <http://www.rgf.bg.ac.rs/semlab>.

Sherpa B.B., Kumar P.D., Upadhyay, A., 2021, Experimental and theoretical study of dynamic bend angle in the explosive welding process. Trans Indian Inst Met 74, 511–519 <https://doi.org/10.1007/s12666-021-02189-7>.

Smith E.G., Laber D., Linse V.D., Ryan M.J., 1971, Development of explosive-welding techniques for fabrication of regeneratively cooled thrust chambers for large-rocketengine requirements, National aeronautics and space administration.

Solomos G., Larcher M., Valsamos G., Karlos V., Casadei F., 2020, A survey of computational models for blast induced human injuries for security and defence applications.

SRPS EN ISO 148-1:2017, 2017, Metallic materials - Charpy pendulum impact test - Part 1: Test method (ISO 148-1:2016), Доступно на: [https://iss.rs/sr\\_Cyrl/project/show/iss:proj:62229](https://iss.rs/sr_Cyrl/project/show/iss:proj:62229)

Stamatović A., 1995, Konstruisanje projektila, Belgrade: "Ivexy" p.o. (in Serbian).

Stewart C., 2006, Blast Injuries: Preparing for the Inevitable. Emergency Medical Practice. 8(4), p.8. Доступно на: <http://www.storysmith.net/page5/files/Blast%20Injuries%200406.pdf>. (Accessed 21.01.2020.)

Tecs, 2023, Доступно на: <https://www.tec-science.com/material-science/material-testing/vickers-hardness-test/>

Teledyne ICM Company History, 2023, Powder explosives. Доступно на: <https://www.teledyneicm.com>

Trayal corporation, 2008, Technological procedure for making industrial powdered explosives. French Patent number WO2008009031A1, Доступно на: <https://patentimages.storage.googleapis.com/6a/99/15/c0851bd88c81b6/WO2008009031A1.pdf>

Trayal corporation, 2022, Powder explosives, Доступно на: <https://trayal.rs/en/products/explosives/explosives-and-initiating-devices/explosives/explosive-cartridges/#599>

TSSM, 2023, Tehnologija spajanja savremenih materijala - Materijali i njihovo ponašanje pri zavarivanju, Доступно на: <http://www.dpm.ftn.uns.ac.rs/sr/studenti/nastavni-materijal/cetvrta-godina-oas/tehnologije-spajanja-savremenih-materijala>.

Vaidyanathan P., Ramanathan A.R., 1992, Design for quality explosive welding, Journal of Materials Processing Technology, 32 439-448 439, Elsevier.

VTI, 2023, Интерна документација Војнотехничког института у Београду.

Wright E. S., Bayce A. E., 1967, US Patent No. 3,313,021.

Wronka B., 2010, Testing of explosive welding and welded joints: joint mechanism and properties of explosive welded joints. J Mater Sci 45, 4078–4083. <https://doi.org/10.1007/s10853-010-4494-4>.

Wu X., Shi C., Feng K., Gao L., Li W., Qian K., 2021, Experimental and numerical approach to titanium aluminum explosive welding, Mater. Res. Express 8 (2021) 096503, <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ac2017>.

Yang M, Ma H., Shen Z., 2019, Study on explosive welding of Ta2 titanium to Q235 steel using colloid water as a covering for explosives, Journal of Materials Research and Technology, Volume 8, Issue 6, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.09.025>.

YS&K, The York Saw And Knife Company, 2023, Доступно на: <https://www.yorksaw.com/industrial-machine-knives/film-cutting-blades/>

Zhou Q., Feng J., Chen P., 2017, Numerical and Experimental Studies on the Explosive Welding of Tungsten Foil to Copper, August 2017, Materials 10(9):984, <https://doi.org/10.3390/ma10090984>.

ZK, Zavarene konstrukcije, 2023, Доступно на: <https://zavarenekonstrukcije.rs/o-nama/>.

Богданов Ј., 2016, Прилог истраживању процеса детонације сферичних барута, докторска дисертација Универзитет одбране у Београду, Војна Академија.

Богданов Ј., 2015, Минскоексплозивна средства за паљење, иницирење и рушење (скрипта за вежбе из предмета Експлозивни процеси), Универзитет одбране у Београду Војна академија, Београд.

Богданов Ј., 2015, Познавање убојних средстава, Универзитет одбране у Београду - Војна академија, Београд.

Emcotest, 2023, Доступно на: <https://www.emcotest.com/en/>.

Јеремић Р., 2002, Експлозивни процеси, Сектор за ШОНИД, Београд.

Кропус, 2012, UCD-50 Univerzalniultrazvučnidefektoskop, Uputstvozarukovanje. Доступно на: <https://www.scribd.com/document/369499077/Uputstvo-UCD-50-pdf>.

Марјановић М.М., 2022, Истраживање утицаја примене наноматеријала на ојачања композита угљенично влакно – епокси смола, докторска дисертација, Београд.

Недић Б., Митровић С., 2014, Софтвер за анализу сигнала и прорачун параметара топографије површина, техничко решење, Факултет инжењерских наука, Универзитета у Крагујевцу.

Правилник о заштити на раду при изради експлозива и барута и манипулисању експлозивима и барутима, 2005, Службени лист социјалистичке федеративне републике југославије, Београд.

Савић М., 2000, Минирање на површинским коповима, Бор: Институт за бакар.

Џунић Д.С., 2015, Анализа процеса трења и хабања нанокмозита са металном основом, Докторска дисертација, Факултет инжењерских наука Универзитет у Крагујевцу, Крагујевац.

## БИОГРАФИЈА АУТОРА

Милош Лазаревић је рођен у Крагујевцу, Република Србија, 26.01.1993. године.

Основно образовање је стекао у основној школи „21. октобар“ у Крагујевцу, а даље школовање је наставио уписом и завршетком Политехничке школе у Крагујевцу, на смеру Машински техничар за компјутерско конструисање.

Након завршетка средње школе, 2012. године уписао је Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу избором студијског програма Војноиндустријско инжењерство на којем је дипломирао у редовном року 2016. године. Током студирања, посебна област интересовања су му биле науке и технологије из области минско експлозивних средстава а избором модула Пројектили и упаљачи стиче знања из ових области.

Паралелно са студијама, бива ангажован као носилац пројекта реализације иновативних решења у фирми “CrownTrust&Trade” са седиштем у Београду.

Стручни назив дипломираног индустријског инжењера стиче одбраном дипломског рада на студијском програму основних академских студија Војноиндустријско инжењерство. Тема дипломског рада је "Технологија производње артиљеријске муниције са кумулативним ефектом".

Након завршетка основних академских студија, студирање наставља уписом мастер академских студија Војноиндустријско инжењерство, у школској 2016/2017. години. Стручни назив мастер инжењера индустријског инжењерства – војноиндустријско инжењерство, стиче пријавом и одбраном мастер рада под називом "Борбена жилавост лансираног система". Основне академске студије Војноиндустријског инжењерства завршава са просечном оценом 7,07 док мастер академске студије завршава са просечном оценом 9,00.

Докторске академске студије (ДАС) је уписао 2017. године на студијском програму Машинско инжењерство, на катедри за Производно машинство. Током прве две године ДАС, успешно је полагао све испите предвиђене наставним планом и програмом. У склопу реализованих активности, прикупљао је литературу и реализовао експерименте из области теме докторске дисертације, на основу којих је публикувао радове. Досадашњи научно-истраживачки рад и интересовања, тежишно су усмерена на области војног и производног машинства.

**ИЗЈАВА АУТОРА О ОРИГИНАЛНОСТИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

Изјављујем да докторска дисертација под насловом:

**„ИСТРАЖИВАЊЕ ПРОЦЕСА ЕКСПЛОЗИВНОГ ЗАВАРИВАЊА И  
КАРАКТЕРИЗАЦИЈА ДОБИЈЕНОГ СПОЈА ВИСОКОЛЕГИРАНОГ АЛАТНОГ И  
НИСКОУГЉЕНИЧНОГ ЧЕЛИКА“**

представља оригинално ауторско дело настало као резултат сопственог истраживачког рада.

Овом Изјавом такође потврђујем:

- да сам једини аутор наведене докторске дисертације,
- да у наведеној докторској дисертацији нисам извршио повреду ауторског нити другог права интелектуалне својине других лица,

У Крагујевцу, 14.08, 2023 године,

Милош Назаревић

потпис аутора

**ИЗЈАВА АУТОРА О ИСТОВЕТНОСТИ ШТАМПАНЕ И ЕЛЕКТРОНСКЕ ВЕРЗИЈЕ  
ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

Изјављујем да су штампана и електронска верзија докторске дисертације под насловом:

**„ИСТРАЖИВАЊЕ ПРОЦЕСА ЕКСПЛОЗИВНОГ ЗАВАРИВАЊА И  
КАРАКТЕРИЗАЦИЈА ДОБИЈЕНОГ СПОЈА ВИСОКОЛЕГИРАНОГ АЛАТНОГ И  
НИСКОУГЉЕНИЧНОГ ЧЕЛИКА“**

истоветне.

У Крагујевцу, 14.08, 2023 године,

Милош Џазаревић

потпис аутора



**ИЗЈАВА АУТОРА О ИСКОРИШЋАВАЊУ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

Ја, Милош С. Лазаревић,

дозвољавам

не дозвољавам

Универзитетској библиотеци у Крагујевцу да начини два трајна умножена примерка у електронској форми докторске дисертације под насловом:

**„ИСТРАЖИВАЊЕ ПРОЦЕСА ЕКСПЛОЗИВНОГ ЗАВАРИВАЊА И КАРАКТЕРИЗАЦИЈА ДОБИЈЕНОГ СПОЈА ВИСОКОЛЕГИРАНОГ АЛАТНОГ И НИСКОУГЉЕНИЧНОГ ЧЕЛИКА“**

и то у целини, као и да по један примерак тако умножене докторске дисертације учини трајно доступним јавности путем дигиталног репозиторијума Универзитета у Крагујевцу и централног репозиторијума надлежног министарства, тако да припадници јавности могу начинити трајне умножене примерке у електронској форми наведене докторске дисертације путем преузимања.

Овом Изјавом такође

дозвољавам

не дозвољавам<sup>25</sup>


припадницима јавности да тако доступну докторску дисертацију користе под условима утврђеним једном од следећих Creative Commons лиценци:

---

<sup>25</sup>Уколико аутор изабере да не дозволи припадницима јавности да тако доступну докторску дисертацију користе под условима утврђеним једном од *Creative Commons* лиценци, то не искључује право припадника јавности да наведену докторску дисертацију користе у складу са одредбама Закона о ауторском и сродним правима.

- 1) Ауторство
- 2) Ауторство - делити под истим условима
- 3) Ауторство - без прерада
- 4) Ауторство - некомерцијално
- 5) Ауторство - некомерцијално - делити под истим условима
- 6) Ауторство - некомерцијално - без прерада<sup>26</sup>

У Крагујевцу, 14.08, 2023 године,



потпис аутора

---

<sup>26</sup> Молимо ауторе који су изабрали да дозволе припадницима јавности да тако доступну докторску дисертацију користе под условима утврђеним једном од CreativeCommons лиценци да заокруже једну од понуђених лиценци. Детаљан садржај наведених лиценци доступан је на: <http://creativecommons.org.rs>