

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ  
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ

Андријана А. Ђурђевић

**ТЕХНОЛОГИЈА ЗАВАРИВАЊА ТРЕЊЕМ  
СА МЕШАЊЕМ Т-СПОЈЕВА ОД ЛЕГУРЕ  
АЛУМИНИЈУМА**

Докторска дисертација

Београд, 2015.

UNIVERSITY OF BELGRADE  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

Andrijana A. Đurđević

**FRICION STIR WELDING  
TECHNOLOGY OF ALUMINIUM ALLOY  
T-JOINTS**

Doctoral dissertation

Belgrade, 2015.

**Ментор:**

---

др Александар Седмак, редовни професор  
Машински факултет, Универзитет у Београду

**Чланови комисије за преглед и одбрану докторске дисертације:**

---

др Срђан Тадић, научни сарадник  
Иновациони Машинског факултета, Универзитет у Београду

---

др Марко Ракин, редовни професор  
Технолошко-металуршки факултет, Универзитет у Београду

---

др Оливера Поповић, ванредни професор  
Машински факултет, Универзитет у Београду

---

др Бојан Бабић, редовни професор  
Машински факултет, Универзитет у Београду

**Датум одбране дисертације:** \_\_\_\_\_

**Кандидаткиња:**

---

дипл. инж. маш. Андријана Ђурђевић

## ЗАХВАЛНОСТ

Израдом Докторске дисертације руководио је др Александар Седмак, редовни професор на Машинском факултету Универзитета у Београду, коме се захваљујем на изузетном ангажовању и свесрдној подршци током рада.

Захваљујем се Министарству просвете, науке и технолошког развоја Владе Републике Србије. Ова Докторска дисертација је настала као део истраживања у оквиру пројекта основног истраживања Министарства просвете, науке и технолошког развоја Владе Републике Србије „Микромеханички критеријуми оштећења и лома“, број пројекта 174004. Руководилац пројекта је др Марко Ракин, редовни професор на Технолошко-металуршком факултету Универзитета у Београду, коме се захваљујем на пруженој помоћи и саветима око израде дисертације.

Такође, ова Докторска дисертација је настала и као део истраживања у оквиру иновационог пројекта Министарства просвете, науке и технолошког развоја Владе Републике Србије под називом „Освајање технологије израде Т-спојева поступцима фриксионог заваривањем мешањем“, број пројекта 451-03-2802/2013-16/69. Руководилац пројекта је био др Александар Живковић коме се захваљујем на великој помоћи и издвојеном времену током извођења експерименталног заваривања.

Др Игору Радисављевићу из Одељења за металне материјале, Сектора за материјале и заштиту Војнотехничког института у Београду се захваљујем на помоћи око испитивања заварених спојева, као и на корисним предлозима.

Захваљујем се др Срђану Тадићу на свесрдној помоћи и стрпљењу око нумеричког дела рада дисертације.

Предузећу „Еурометал“ на челу са дипл. инж. маш. Милорадом Ђурђевићем се захваљујем на помоћи око припреме материјала за заваривање.

Захваљујем се др Слободану Ристићу, директору Високе инжењерске школе струковних студија „Техникум Таурунум“ на подршци и корисним саветима током рада.

Хвала мојој породици на разумевању, љубави и подршци коју ми је пружила током израде дисертације.

# ТЕХНОЛОГИЈА ЗАВАРИВАЊА ТРЕЊЕМ СА МЕШАЊЕМ Т-СПОЈЕВА ОД ЛЕГУРЕ АЛУМИНИЈУМА

## Резиме:

У овом раду дати су резултати истраживања могућности израде Т-спојева од алуминијумских легура процесом заваривања трењем са мешањем. Ова релативно нова метода заваривања обезбеђује производњу спојева високог квалитета, где чврстоћа споја достиже чврстоћу основног материјала. Експерименталним заваривањем трењем са мешањем израђени су Т-спојеви помоћу алатне глодалице, специјалног алата за заваривање, специјалног стезног помоћног прибора и избором одговарајућих параметара заваривања. Варирани су следећи технолошки параметри заваривања у циљу добијања Т-спојева без грешака: брзина заваривања, брзина обртања алата, дубина урањања алата у радни материјал и угао нагиба алата. Експериментални рад је подељен у две фазе да би се боље сагледао утицај параметара заваривања и одабир материјала стезног помоћног прибора.

Прва фаза експерименталног рада је подразумевала заваривање плоча од алуминијумске легуре 5052-Н32 и добијање Т-споја. Материјал стезног помоћног прибора био је угљенични челик S355. Након заваривања плоча, извршено је визуелно испитивање спојева, мерење микротврдоће кроз попречни пресек споја нормалан на правац заваривања плоча и испитивање макроструктуре споја. На макроскопским снимцима уочене су карактеристичне структурне зоне споја и примећене су грешке завареног споја типа тунела, непровареног корена метала шави и линије везивања. Након сагледавања и анализе добијених резултата закључено је да је превише топлоте одведено током процеса заваривања услед неодговарајућег материјала стезног помоћног прибора и приступило се другој фази експеримента.

У другој фази експерименталног рада Т-спојеви су остварени заваривањем плоча од алуминијумске легуре 5754-Н111. Добијени заварени спојеви су подвргнути визуелном испитивању, измерена је микротврдоћа кроз попречни пресек спојева нормалан на правац заваривања плоча и извршено је макроскопско испитивање структуре споја где је уочено са су спојеви без грешака. Током друге фазе

експерименталног рада главни елементи специјалног стезног помоћног прибора и подложне плоче биле су од нерђајућег челика класа 1,4301 и 1,4541.

Нумеричко истраживање заваривања трењем са мешањем у циљу освајања технологије заваривања Т-спојева од легуре алуминијума се односи на израду термо-механичког модела процеса. Извршена је нумеричка симулација процеса ЗТМ и добијен је Т-спој. Дат је дијаграм расподеле температуре у зависности од растојања дуж правца заваривања, као и дијаграм зависности чврстоће материјала од температуре. Резултати добијени експерименталним испитивањем и нумерички израчунати су приближно једнаки.

**Кључне речи:** заваривање трењем са мешањем, алуминијумска легура 5052-Н32, алуминијумска легура 5754-Н111, Т-спој, параметри заваривања, микротврдоћа, грешке, нумеричка симулација процеса

**Научна област:** Техничке науке

**Ужа научна област:** Заваривање и заварене конструкције

**УДК број:** 621.791.1:669.715(043.3)

**621.791.05(043.3)**

# FRICION STIR WELDING TECHNOLOGY OF ALUMINIUM ALLOY T-JOINTS

## **Abstract:**

In this paper are given results of research on possibility of production T-joints of aluminium alloy by friction stir welding process. These relatively new welding technology realizes the high quality weld joints, where strength of joint can to reach the strength of the base material. T-joints are made using milling machine, special tools for friction stir welding, special clamping tool, backing plates, and selection of appropriate welding parameters. The following technological process parameters were varied in order to obtain T-joints without defects: transverse (welding) speed, the speed of rotation of the tool, tool-plunge depth in the working material and tool tilt-angle. Experimental work is divided into two phases in order to better examine the influence of welding parameters and material selection of the special clamping tool.

In the first phase of the experimental work plates of aluminum alloy 5052-H32 are welded into T-joints. Material of special clamping tool was the carbon steel S355. Visual inspections, macrostructure examination and micro-hardness measuring of T-joints were processed after welding process. Typical microstructural zones for FSW joint and some types of defects (tunnel, bonding line and kissing bond) in the weldments were observed in macroscopic recordings. After reviewing and analyzing the obtained results it was concluded that it was too much heat taken during the welding process due of the improper material of the special clamping tool. And then started a second phase of the experiment.

In the second phase of the experimental work T-joints are obtained by welding plates of AA 5754-H111. Visual inspections, macrostructure examination and micro-hardness measuring of T-joints were processed after welding process. All tested T-joints were without defects. In the second phase of the experimental work the elements of special clamping system and backing plates were made of stainless steel classes 1.4301 and 1.4541.

The thermo-mechanical model of the process is made for the numerical study of the application of friction stir welding technology to produce a T-joints of aluminum alloy. The numerical simulation of FSW process is made and obtained a T-joint. It is given a diagram

of depending temperature distribution on the distance along the direction of welding, as well as a diagram of depending the strength of material on temperature. Results obtained by experimental tests and numerical calculate are approximately equal.

**Keywords:** friction stir welding, AA 5052-H32, AA 5754-H111 T-joints, technological welding parameters, microhardness, defects, numerical simulation

**Research field:** Tehnical science

**Specific field:** Welding and welded construction

**UDC number:** 621.791.1:669.715(043.3)

**621.791.05(043.3)**



## Садржај:

1. УВОД.....	1
2. ЗАВАРИВАЊЕ ТРЕЊЕМ СА МЕШАЊЕМ.....	3
2.1. Апаратура за извођење заваривања трењем са мешањем.....	3
2.2. Материјали заварљиви поступком ЗТМ и врсте заварених спојева.....	5
2.3. Фазе ЗТМ поступка .....	8
2.4. Параметри процеса заваривања трењем са мешањем.....	11
2.5. Структура завареног споја.....	16
2.6. Генерисање и пренос топлоте код заваривања трењем са мешањем .....	19
2.7. Течење материјала и грешке завареног споја .....	25
2.7.1. Грешке у завареним спојевима .....	27
2.8. Механичка испитивања заварених спојева од алуминијумских легура.....	30
2.8.1. Испитивање тврдоће завареног споја .....	31
2.8.2. Испитивање затезањем. Замор материјала. Заостали напони .....	32
2.9. Алати за ЗТМ .....	35
2.10. Машине за заваривање трењем са мешањем .....	45
2.11. Предности и недостаци поступка .....	47
3. Т-СПОЈЕВИ .....	49
3.1. Начини добијања и примена Т-спојева од легуре алуминијума .....	49
4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РАД .....	51
4.1. Опис експерименталног рада .....	51
4.2. Материјали .....	52
4.2.1. Основни материјал.....	52
4.2.2. Материјал алата и стезног помоћног прибора .....	55

4.3. Опрема за заваривање .....	57
4.3.1. Машина за заваривање.....	57
4.3.2. Алат и стезни помоћни прибор.....	59
4.4. Заваривање .....	62
4.4.1. Заваривање легуре 5052-Н32 .....	64
4.4.2. Заваривање легуре 5754-Н111 .....	66
4.5. Испитивања заварених спојева .....	68
4.5.1. Испитивања без разарања .....	69
4.5.2. Одређивање микротврдоће .....	69
4.5.3. Макроструктурна испитивања.....	71
5. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНОГ ИСТРАЖИВАЊА .....	72
5.1. Визуелна контрола .....	72
5.2. Микротврдоћа .....	78
5.2.1. Расподела микротврдоће кроз спој легуре 5052-Н32 .....	78
5.2.2. Расподела микротврдоће кроз спој легуре 5754-Н32 .....	82
5.3. Карактеризација структуре.....	95
5.3.1. Макроструктура спојева од легуре 5052-Н32.....	96
5.3.2. Макроструктура спојева од легуре 5754-Н111.....	100
6. НУМЕРИЧКИ МОДЕЛ ПРОЦЕСА ЗАВАРИВАЊА ТРЕЊЕМ СА МЕШАЊЕМ	105
6.1. Математички модел.....	107
6.1.1. Израз за регулисање процеса .....	107
6.1.2. Генерисање топлоте.....	108
6.1.3. Гранични услови .....	110
6.1.4. Почетни услов.....	112

6.2. Утицај улазних технолошких параметара заваривања на генерисање топлоте код заваривања трењем са мешањем сучеоног споја .....	113
6.3. Мрежа коначних елемената .....	120
7. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА НУМЕРИЧКОМ МЕТОДОМ ДОБИЈЕНИХ РЕЗУЛТАТА .....	123
8. ЗАКЉУЧАК .....	129
ЛИТЕРАТУРА .....	132
ПРИЛОЗИ	
БИОГРАФИЈА АУТОРА	

## 1. УВОД

Заваривање трењем са мешањем, скраћено ЗТМ (на енглеском језику Friction Stir Welding - FSW) је релативно нов поступак заваривања настао крајем 1991. године од стране Wayne M. Thomas-а из Института за заваривање TWI (The Welding Institute, Cambridge, UK), који је успешно заварио лимове од легуре алуминијума. Поступак је веома брзо, већ 1994. године, добио своју комерцијалну примену и изазвао велику пажњу истраживача у пракси. Прва примена ЗТМ поступка везује се за производњу железничких возила и заваривање алуминијума и његових легура, али временом се проширио опсег примене. Данас се овим поступком успешно заварује велики број чистих метала, легура метала, као и неметала. Овај поступак заваривања се користи у производњи шинских возила, аутомобилској индустрији, авиоиндустрији, производњи космичких летелица, бродоградњи, производњи процесне опреме, итд. Две ипо деценије по настајању, поступак ЗТМ највише се користи за заваривање лимова од алуминијума и његових легура [1].

Поступак заваривања трењем са мешањем обезбеђује спајање материјала без њиховог топљења и коришћења додатног материјала. Овај поступак је настао као резултат истраживања вршених у циљу проналажења нових решења при заваривању алуминијумских легура како би се избегли проблеми који се јављају код конвенционалних поступака заваривања (локално загревање материјала до и преко тачке топљења, при чему се значајно смањују механичка својства материјала). Применом овог поступка добијају се заварени спојеви са захтеваним нивоима чврстоће и пластичности [2].

ЗТМ поступак је посебно погодан за спајање алуминијумских легура са великим распоном дебљина плоча. Могуће је заварити алуминијумске лимове дебљине од 0,5 до 50 mm у једном пролазу, односно 75 mm дебљине формирањем двостраног вара [3]. Могу се заварити истородни и разнородни материјали. Поступак је најпогоднији за спајање плоча, мада се користи и за заваривање цеви и делова компликованијих геометрија.

Заваривање трењем са мешањем је процес спајања материјала у чврстој фази комбинованим деловањем топлоте и механичког рада. Алат и радне плоче остају у чврстом стању. Само се у зони заваривања материјал радних плоча налази у благо размекшаном, односно пластичном стању под дејством генерисане топлоте која се јавља услед трења између алата и радних плоча. У току овог процеса температуре које се јављају у зони споја не прелазе тачку топљења основног материјала. Код легура алуминијума крећу се у интервалу од  $400 \div 500$  °С. Значи, оптимална достигнута температура током овог процеса је око 0,8 од температуре топљења радних материјала. При томе су избегнуте грешке које су карактеристичне за процес топљења материјала које се јављају код конвенционалних поступака заваривања [4]. Дакле, заварени спој се добија дејством алата на радне плоче, трење алата и радних плоча доводи до загревања материјала радних плоча, а алат врши мешање материјала плоча и самим тим спајање истих.

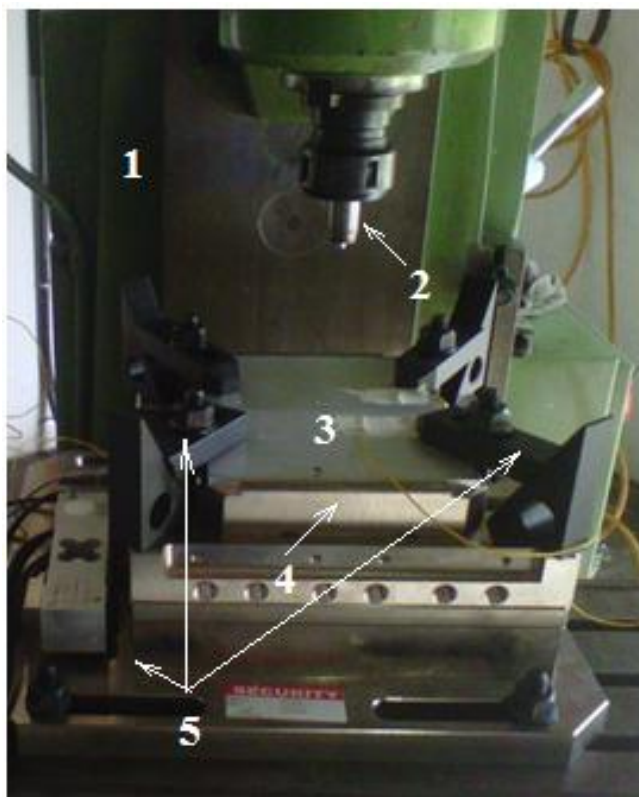
ЗТМ има изузетне карактеристике: рад је једноставан и лако може да се аутоматизује, енергетски је убедљиво најефикаснији, еколошки је апсолутно чист и заварени спојеви имају врло висок квалитет [5].

Нумеричком симулацијом термо-механичког процеса заваривања трењем са мешањем Т-спојева смањују се трошкови експеримента и убрзава се развојни процес истог. Поређењем експерименталних и нумеричких резултата доносе се закључци о оптималним параметрима заваривања у циљу добијања спојева без грешака са одговарајућим механичким карактеристикама.

## 2. ЗАВАРИВАЊЕ ТРЕЊЕМ СА МЕШАЊЕМ

### 2.1. Апаратура за извођење заваривања трењем са мешањем

За спајање два или више радних материјала поступком ЗТМ потребни су: машина, цилиндрични алат, два или више радних материјала који су од истих или разнородних материјала, подложна плоча и стезни помоћни прибор [5,6,7], као што је показано на *Слици 2.1.*

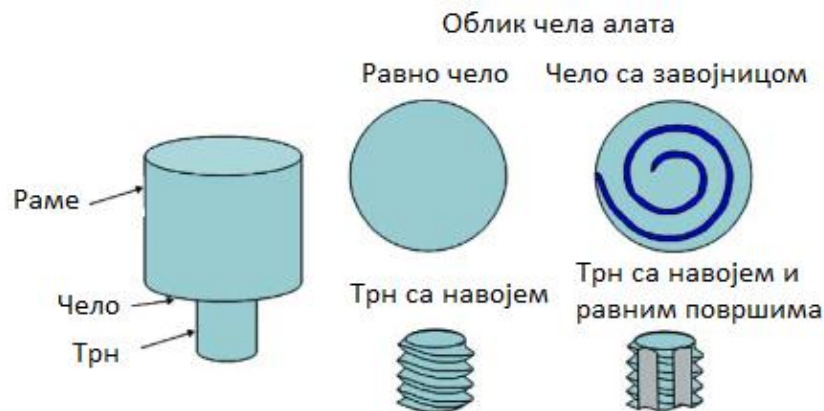


*Слика 2.1* Опрема за заваривање трењем са мешањем: 1- машина, 2- алат, 3- радни материјали, 4- подложна плоча и 5- стезни помоћни прибор [8]

Машина за заваривање која може бити специјализована за ЗТМ, обрадни центар или глодалица мора да обезбеди обртно кретање алата, трансляторно кретање по  $x$ ,  $y$  и  $z$  оси и одговарајућу притисну силу по оси  $z$ . Зависно од конструкционог

решења машине, трансляторно кретање по  $x$  и  $y$  оси изводи алат или радни сто машине [9]. Такође, потребно је обезбедити стезање радних плоча за радни сто машине.

Облик радног дела алата (Слика 2.2) је комбинација два концентрична цилиндра познатих под називом раме алата (цилиндар већег полупречника) и трн алата (цилиндар мањег полупречника). Прелаз између рамена и трна алата назива се чело алата, и оно може бити равно или рељефно, са или без удубљења, тзв. резервоара. Облик трна алата такође може бити различит, што је детаљније описано у поглављу 2.9.



Слика 2.2 Шематски приказ алата за ЗТМ [10]

Корен шави добијеног ЗТМ поступком нема надвишење јер се формира према облику подложне плоче. Материјали подложних плоча су јако битни, јер приликом поступка заваривања долази до прекомерног одвођења топлоте што доводи до лошег мешања материјала, а тиме завареног споја са грешкама. Најбоље би било када би подложне плоче биле од керамике.

Стезање материјала је један од најважнијих процеса код ЗТМ. Стезни прибор мора да обезбеди добру крутост и димензиону прецизност, као и да не дође до појаве додатних отпора (момената и сила) у току извођења заваривања, јер се у противном не би могла прецизно измерити притисна сила. Неправилно стегнут радни материјал може угрозити упарене површине које треба заварити. Тада долази до померања

плоча и услед тога настатају шупљине у споју. ЗТМ је поступак који не користи додатни материјал при заваривању и зато не постоји могућност додавања материјала за попуњавање шупљина насталих од одвајања плоча услед лошег стезања.

## 2.2. Материјали заварљиви поступком ЗТМ и врсте заварених спојева

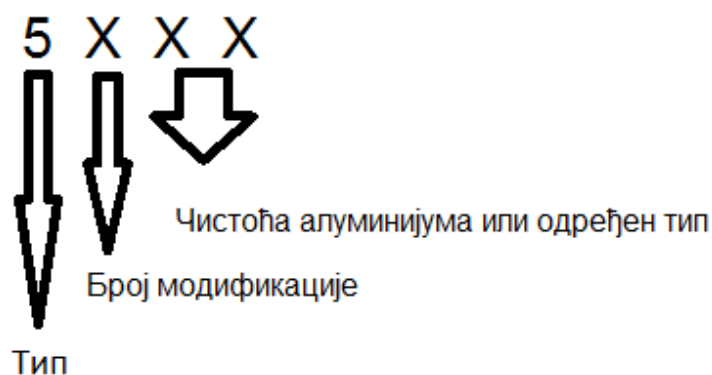
Заваривањем трењем са мешањем могуће је успешно заварити следеће материјале: алуминијум, титанијум, олово, легуре алуминијума, бабра, магнезијума, олова, титанијума, никла, конструкциони челик, нисколегирани, меки, нерђајући, аустенитни, дуплекс челик и полимере [4].

ЗТМ је посебно погодан поступак за спајање легура алуминијума. Означавање легура алуминијума је дато у *Табели 2.1*, а означавање термичке обраде у *Табели 2.2*. Ознака легуре алуминијума одређене серије састоји се од четири цифре. Прва цифра означава тип легуре (највећи проценат легирајућег елемента), друга цифра представља број модификације, последње две чистоћу алуминијума или одређен тип (*Слика 2.3*).

*Табела 2.1 Означавање легура алуминијума [4]*

ОЗНАЧАВАЊЕ ЛЕГУРА АЛУМИНИЈУМА	
1XXX	алуминијум (минимум 99%)
2XXX	алуминијум – бакар ( Al – Cu )
3XXX	алуминијум – манган ( Al – Mn )
4XXX	алуминијум – силицијум ( Al – Si )
5XXX	алуминијум – магнезијум ( Al – Mg )
6XXX	алуминијум – магнезијум – силицијум ( Al – Mg – Si )
7XXX	алуминијум – цинк ( Al – Zn )
8XXX	алуминијум – други елементи
9XXX	непознато





Слика 2.3 Значење цифара ознаке легуре алуминијума [4]

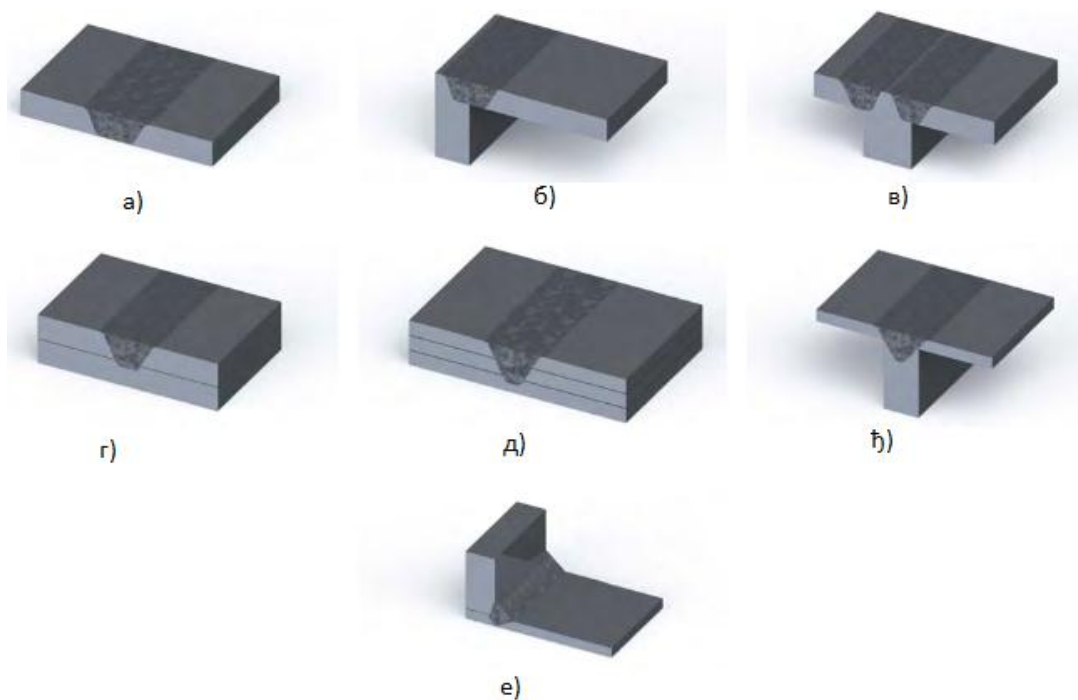
Легуре са ознаком 2XXX и 7XXX врло тешко се заварују поступцима заваривања који подразумевају топљење материјала. Применом поступка ЗТМ овај проблем је превазиђен. Такође, ова техника заваривања је погодна за спајање разнородних материјала и доста научних радова базирано је на томе. Успешно је извршено спајање алуминијумских легура са магнезијумом, бавром и ниско угљеничним челиком [11-13].

Табела 2.2 Означавање термичке обраде [4]

ТЕРМИЧКА ОБРАДА	
F	Ковани делови, накнадно термички обрађени, укључујући одливке. Не постоји гаранција карактеристика.
O	Отпуштање
H	Очвршћавање деформацијом, нпр. хладна обрада.
H1	Очвршћавање само деформацијом.
H2	Очвршћавање деформацијом и делимично жарен.
H3	Очвршћавање деформацијом и стабилизован.
W	Раствор топлотно третиран, нестабилно стање настаје након каљења.
T	Термичко старење.
T1	Природно старење.

T2	Хладно обрађен и природно старење.
T3	Раствор топлотно третиран (на 540 °С), хладно обрађен, природно старење (код плоча).
T4	Раствор топлотно третиран (од 450 – 550 °С), природно старење.
T5	Хлађење, вештачко старење.
T6	Раствор топлотно третиран, вештачко старење.
T7	Раствор топлотно третиран, двоструко старење.
T8	Раствор топлотно третиран, хладно обрађен, вештачко старење.
T9	Раствор топлотно третиран, вештачко старење, хладно обрађен.
T10	Хладно обрађен, вештачко старење.

**Врсте спојева** остварених поступком ЗТМ дате су на *Слици 2.4*. Најпогодније конфигурације за заваривање овим поступком су сучеоно и преклопни спој. Многе друге врсте спојева су добијене комбинацијом сучеоног и преклопног споја. Важно је напоменути да није потребна припрема површина радног материјала код сучеоног и преклопног споја.



Слика 2.4 Врсте спојева остварених поступком ЗТМ: а) сучеони спој, б) угаони-сучеони спој, в) Т-спој три плоче, г) једноструки преклопни спој, д) вишеструки преклопни спој, ж) Т-спој две плоче и е) угаони спој [5]

### 2.3. Фазе ЗТМ поступка

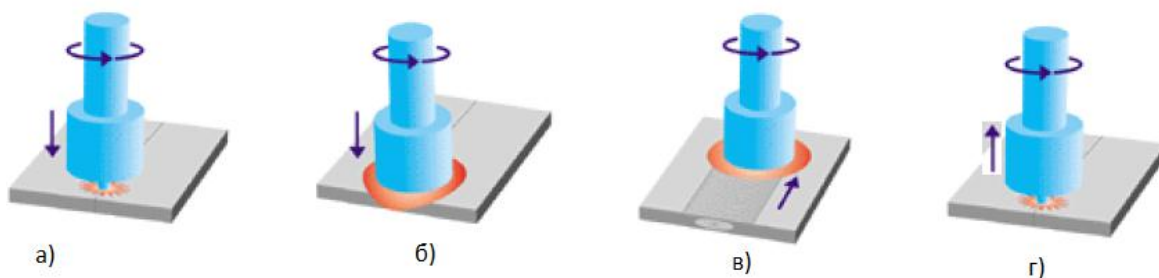
ЗТМ подразумева три фазе [8, 14,15], и то:

1. фаза продирања алата у материјал,
2. фаза заваривања и
3. фаза извлачења алата из материјала.

Укратко, процес почиње урањањем трна алата који се обрће у материјал две или више радних плоча које треба заварити, под сталним аксијалним оптерећењем које служи за генерисање топлоте изазване трењем. Током овог процеса, стално ће се повећавати температура у непосредном контакту површина ротирајућег алата и радних материјала. Процес се наставља све док се температура у непосредном

контакту ротирајућег алата и радних материјала не повећа на температуру која доводи до омекшавања радних материјала. Према томе, ови услови дозвољавају да трн алата продре до одређене дубине у материјал (зависно од врсте споја).

Омекшани материјал приморан је да се креће око трна алата услед његовог обртања и услед продирања у материјал. Долази и до непосредног контакта рамена алата који се обрће и површина радних плоча, *Слика 2.5 а)-б)*.

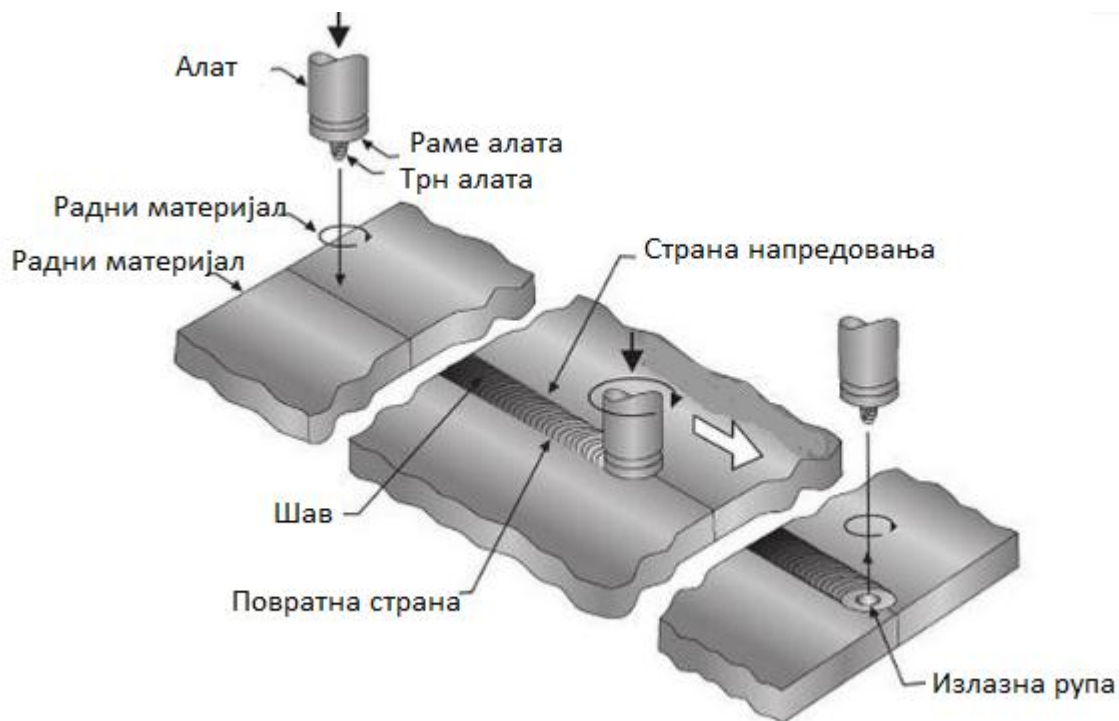


*Слика 2.5 Фазе процеса код заваривања трењем са мешањем [15]*

Пред крај прве фазе заваривања алат извршава само обртно кретање у материјалу радних плоча, задржава се неко време изазивајући повећање температуре до вредности потребне за омекшавање радних материјали, тј. за заваривање. Топлота настаје и услед трења чела алата и горњих површина радних плоча, изазивајући да материјал плоча у непосредном контакту изгуби сву своју снагу, односно да омекша. Генерисање топлоте код ЗТМ поступка и пренос топлоте биће детаљно објашњени у поглављу 2.6.

Након ове фазе, следи фаза заваривања (*Слика 2.5 в)*). Радна температура је достигнута и износи око 0,8 од температуре топљења, материјал је довољно мекан да би се мешао и транспортовао. Алат уз константно обртање креће се дуж линије заваривања, односно дуж линије спајања радних материјала. Омекшали материјал се принудно транспортује око трна алата, а и дуж осе алата, односно између чела алата и чврстих зидова материјала. Од омекшалог материјала који се налази на крајњим ивицама трна алата у слојевима формира се грумен. Сваким трансверзалним померајем алата који ротира, транспорт размекшалог радног материјала биће на

задњој ивици алата, а предњом ивицом ће захватати и уводити нов радни материјал  
ниже температуре.

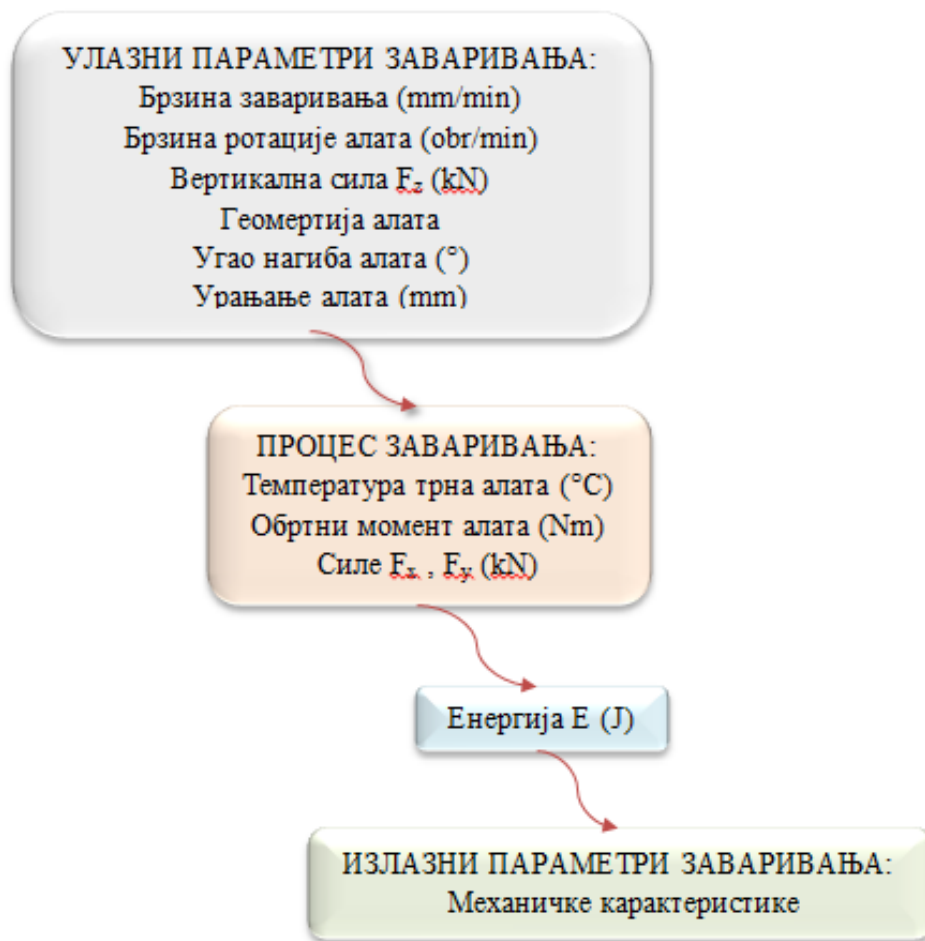


Слика 2.6 Фазе код поступка ЗТМ при формирању сучеоног споја [8]

Током последње фазе заваривања, (Слика 2.5 з)) алат који се обрће престаје да се креће дуж линије спајања материјала, извлачи се далеко од радних материјала остављајући за собом цилиндричну рупу (Слика 2.6). Из естетских разлога цилиндрична рупа може бити испуњена додатним материјалом на крају процеса заваривања. Најчешће се врши одсецање дела заварене плоче где је излазна рупа, а потом се изврши обрада ивица на жељену димензију.

Од датих процесних фаза ЗТМ-а праћених параметрима заваривања зависи квалитет завареног споја. Квалитет завареног споја одређује се контролом и мерењем параметара заваривања као што су: брзина ротације алата, притисна сила, обртни момент, брзина заваривања, геометрија алата и температура алата. Слично као код конвенционалних метода за заваривање, топлотна енергија такође одређује квалитет

споја. На *Слици 2.7* дата је веза између улазних и излазних параметара заваривања [8,14,15].

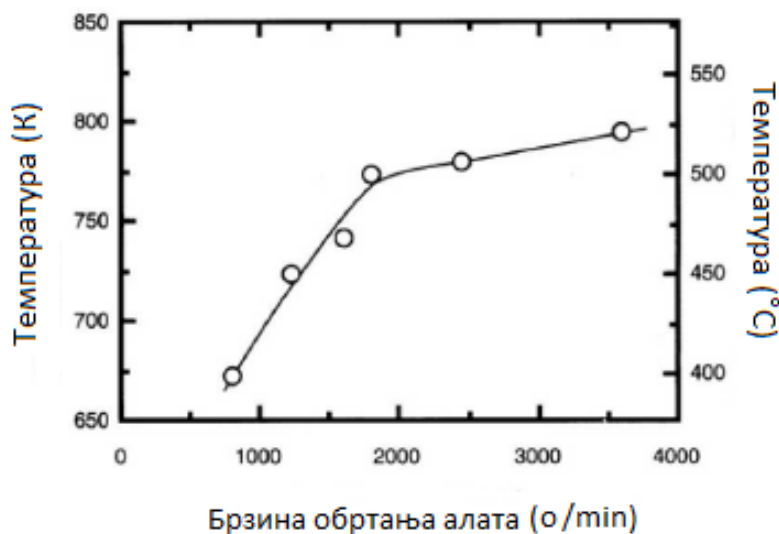


*Слика 2.7 Веза између улазних и излазних параметара заваривања [14]*

#### 2.4. Параметри процеса заваривања трећем са мешањем

Брзина обртања (ротације) алата, брзина заваривања, вертикална (притисна) сила алата на радне материјале, угао нагиба алата, дубина урањања алата и геометрија алата су главни параметри који служе за извођење и контролу овог поступка заваривања. Дати главни параметри утичу на квалитет и ефикасност завареног споја. Топлотна енергија процеса, температурна поља, стопа хлађења, силе

у правцу  $x$  и  $y$  оса, обртни момент алата и температура алата зависе од датих главних параметара заваривања. На пример, температура процеса расте при повећању броја обртаја алата, а смањује се благо при повећању брзине заваривања. Температура процеса се такође повећава услед повећања притисне силе. *Слика 2.8* показује значајно повећање температуре процесас услед повећања брзине обртања алата [7,14,16-20].



*Слика 2.8* Веза брзине обртања алата и температуре при заваривању легуре алуминијума 6063 поступком ЗТМ [7]

**Брзина обртања алата** одређује унос топлоте и температуре током заваривања (*Слика 2.8*). Према томе, она утиче на микроструктуру и механичке особине завареног споја. Она је константна током заваривања и може износити од 100÷4000 o/min.

**Брзина заваривања** (брзина транслаторног кретања) константна је током заваривања и зависи од механичких својстава и дебљине радних материјала. Одређује се најчешће из односа  $\frac{v}{\omega R}$ , где је  $v$  брзина заваривања,  $R$  полупречник трна алата и  $\omega$  угаона брзина алата. Однос се креће од 0,01÷0,02. Ако је брзина

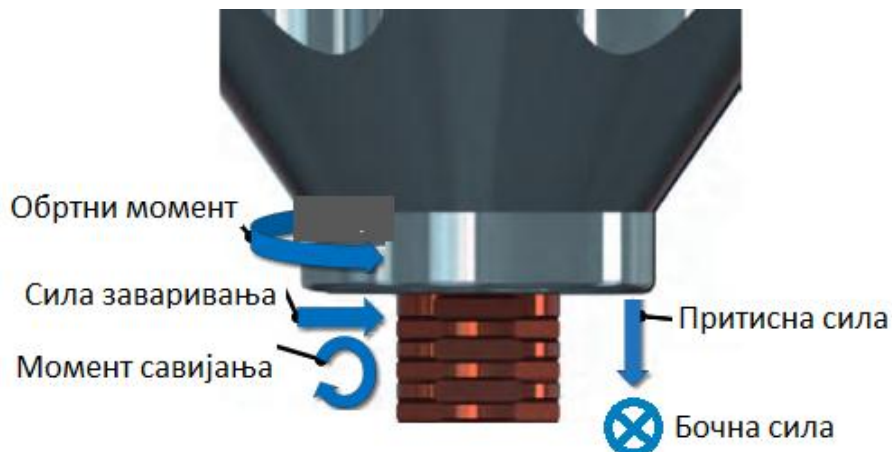
заваривања превисока, долази до грешака споја типа тунела и непровареног корена споја. Брзина заваривања не утиче на обртни момент, самим тим ни на брзину стварања топлоте.

Већа температура процеса јавља се услед веће брзине обртања алата и мање брзине заваривања и зато је веома важно наћи одговарајућу равнотежу између ова два параметра. Другим речима, када температуре нису довољно високе радни материјал нема довољну температуру да потпуно омекша у зони заваривања, и то доводи до грешака. Супротно томе, када је температура превисока услед превелике брзине обртања алата, долази до непожељних промена у микроструктури материјала метала шава јер почиње топљење материјала и зрна структуре се увећавају. Однос брзине обртања алата и брзине заваривања назива се корак заваривања.

**Вертикална сила**  $F_z$  делује у аксијалном правцу. Том силом алат делује на радне материјале, па се зато назива и притисна сила. Она зависи од својства материјала који се заварују и геометрије алата. Креће се од  $2 \div 200$  kN. Исувише висока вредност вертикалне сила доводи до оштећења алата, у екстремним случајевима и лома алата. Такође, вертикална сила утиче на квалитет шава завареног споја. У случају превише високе вредности притисне силе долази и до прегревања и истањења метала шава (радни материјал се истискује око ивица рамена алата). Недовољно високе вредности притисне силе доводе до недовољног загревања радних материјала и тада се јавља грешка типа тунела.

**Уздужна сила**  $F_x$  је у правцу заваривања, а позитиван смер се дефинише смером кртања алата. Јавља се као последица отпора материјала кретању алата. Уздужна сила се смањује уколико се температура материјала око алата повећава.



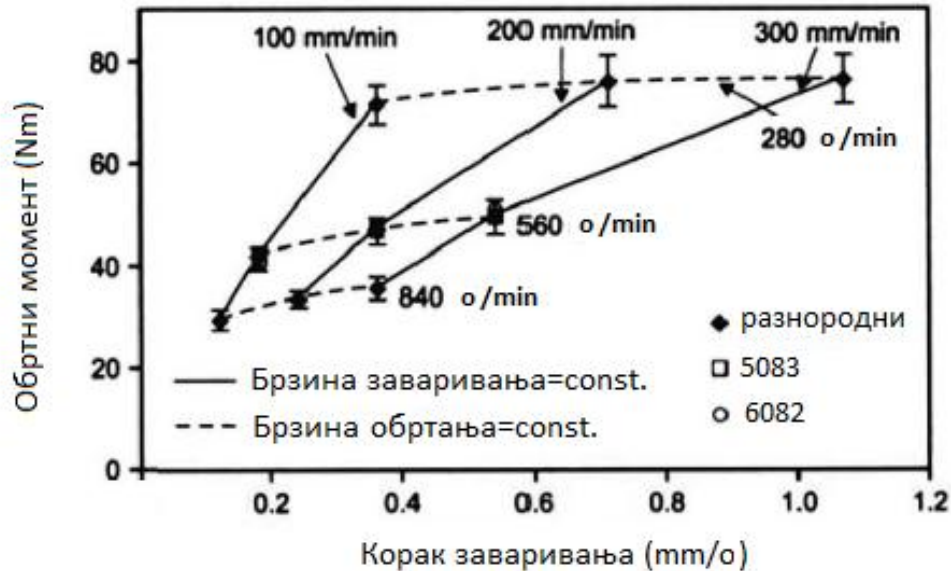


Слика 2.9 Оптерећења алата током процеса заваривања [21]

**Бочна сила**  $F_y$  делује нормално на правац кретања алата, а позитиван смер се дефинише ка страни напредовања споја. На *Слици 2.9* приказани су правци и смерови сила  $F_x$ ,  $F_y$  и  $F_z$ .

**Обртни момент** алата зависи од неколико параметара и променљивих утицаја, као што су вертикална сила, геометрија алата, угао нагиба алата, локални напон смицања на алату услед контакта са радним материјалима и коефицијента трења. Мерењем вредности обртног момента могу се претпоставити вредности о напону око алата и величини клизања између алата и радних материјала, али само када су остале променљиве константне.

Обртни момент опада са повећањем брзине обртања алата због повећања температуре, ако су остале променљиве константне. Материјал на високим температурама лакше тече. Међутим, на обртни момент не утиче значајно промена брзине заваривања, као што је приказано на *Слици 2.10*. Велика брзина заваривања тежи да смањи унос топлотне енергије и температуре. Обртни момент се јако мало повећава услед повећања брзине заваривања (материјал теже тече на нижим температурама). Обртни момент на алату служи за израчунавање снаге која је потребна  $P = T\omega$ , где  $T$  представља укупни обртни момент на алату, а  $\omega$  угаону брзину ротације алата.



Слика 2.10 Промена обртног момента алата услед промене корака заваривања [22]

**Угао нагиба алата** у односу на вертикалну осу износи обично од 0 до 4 степена. Он служи за боље транспортовање и мешање омекшалога (пластичног) материјала. Повећањем угла нагиба смањује се хоризонтална сила јер бочна површина чела алата не задире у материјал приликом заваривања. Превелика вертикална сила у комбинацији са нешто већим углом нагиба алата доводи до лица шава са гребенастом површином.

**Дубина урањања алата** у радне материјале је такође јако битан параметар заваривања. Одређена је висином трна алата. Испод чела и трна алата се ствара притисак који доприноси бољем мешању размекшалих радних материјала. Ако дубина урањања трна алата није потпуна онда раме алата, односно чело алата не долази у контакт са радним материјалима и не може да се оствари довољна количина топлоте настала трењем потребна за процес заваривања. Тада чело алата не може да погура назад промешани материјал до врха трна алата и настају грешке у завареном споју типа тунела или гребенаста површина лица метала шава. Међутим, ако је превише велико урањање алата, раме алата улази у радне материјале остављајући за собом велики бљесак (енг. *flash*). Бљесак се формира на повратној страни лица

метала шава у виду неправилне ивице која је настала од материјала метала шава који тече преко основног материјала. У овом случају шав је конкавног облика и долази до истањења завареног споја.

**Геометрија алата** је један од најважнијих параметара заваривања који јако утиче на микроструктуру и карактеристике споја. Већина алата који се данас користе имају конкавано раме које спречава да се радни материјал разноси око ивице рамена. Трн најчешће има навој и уздужне канале у циљу бољег транспортовања материјала око алата и у правцу дебљине радних материјала. Тако се добијају спојеви високог квалитета без грешака типа тунела и може се применити већа брзина заваривања. Чело алата има завојницу која елиминира потребу за нагињањем алата, а тиме спречава добијање гребенасте површине лица метала шава и истањења споја на месту шава. Геометрија алата је највећа тајна произвођача истих, док се истраживачи и компаније труде да открију што више информација. Избор алата код овог поступка детаљније је објашњен у поглављу 2.9.

## **2.5. Структура завареног споја**

Типичан изглед структуре пресека завареног споја добијеног поступком ЗТМ нормалног на правац заваривања дат је на *Слици 2.11*. Облик метала шава је асиметричан и јасно се уочавају страна напредовања и повратна страна. Страна напредовања се још назива и истосмерна страна (поклапају смерови вектора брзине ротације алата и вектора брзине заваривања) [23]. Повратна страна метала шава је страна на којој су ова два смера вектора брзине супротна. Код завареног споја постоји још и лице метала шава које представља горњу површину метала шава (површину која је била у контакту са челом алата током заваривања) и корен метала шава који представља доњу површину. На повратној страни метала шава формира се ивица која се назива бљесак, што је неповољна појава. Бљесак правилним избором параметара заваривања може бити минимизиран али не и елиминисан. На крају

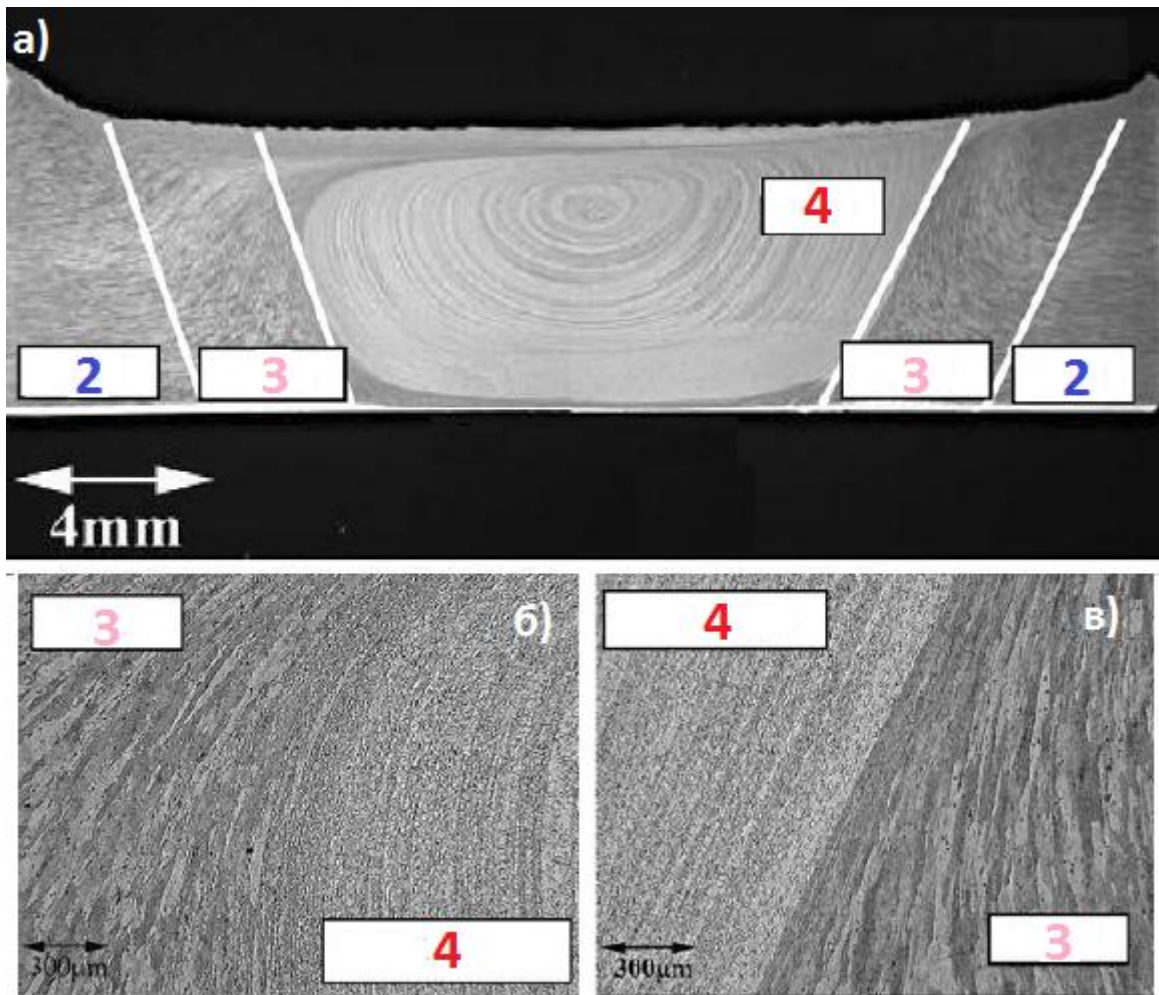
метала шави налази се рупа (енг. *keyhole*) која остаје при извлачењу алата из радних материјала (Слика 2.6).

Прва подела макроструктуре завареног споја поступком ЗТМ изведена је 1997. године у TWI-у и важила је само за алуминијумске легуре. Сачињавају је четири зоне, што је шематски приказано на Слици 2.11:

- 1 - зона основног материјала
- 2 - зона утицаја топлоте
- 3 - зона термо-механичког утицаја
- 4 - зона мешања, тзв. грумен.



Слика 2.11 Структура завареног споја поступком ЗТМ [23]



Слика 2.12 Макроскопски снимци пресека сучеоног споја од легуре алуминијума: а) структурне зоне (2- ЗУТ, 3-ЗТМУ, 4-грумен), б) граница ЗТМУ-грумен на повратној страни, и в) граница ЗТМУ-грумен на страни напредовања [22]

Основни материјал (ОМ) је део завареног споја који је удањен од метала шава. Није изложен деформацијама и термичком утицају, тако да се његова микроструктура и механичке особине не мењају током заваривања.

Зона утицаја топлоте (ЗУТ) је ближа металу шава. Тај део материјала је изложен температурном утицају током заваривања и долази до промене микроструктуре и механичких особина у односу на основни материјал. Али у овој зони не долази до деформација. Величина ЗУТ-а зависи од унете топлоте током

процеса, јер се алат у металу шава понаша као извор топлоте. Температуре у овој зони су ниже од температура у ЗТМУ, али ипак имају значајан утицај.

Зона термо-механичког утицаја (ЗТМУ) је зона у којој је материјал изложен пластичној деформацији од стране алата и топлотним утицајем изазваним трењем алата и радних материјала. Постоји и таква подела где се ЗТМУ дели на три зоне: грумен, област између грумена и ЗУТ-а и зона изнад грумена, тзв. рукавац. Област између грумена и ЗУТ-а је у мањој мери деформисана у односу на грумен и може, а и не мора показивати знаке рекристализације. То зависи искључиво од материјала који се заварују. Због несиметричног метала шава, страна напредовања и повратна страна испољавају значајне разлике. Прелаз од грумена ка ОМ је веома оштар на страни напредовања, а постепен на повратној страни.

Зона мешања (грумен) представља структурну зону у којој је радни материјал претрпео највеће пластичне деформације. Структурна зрна у зони грумена су грубо промешана и често су ред величине мања од величине зрна у зони основног материјала. Грумен је познат по финој, рекристалисаној ситнозрнастој структури. Код алуминијумских легура је јасно уочљив. Величина зрна у грумену креће се од  $1\div 10\ \mu\text{m}$  у зависности од врсте легуре и услова заваривања. Грумен се формира одмах испод чела алата. Његова ширина је незнатно већа од пречника трна алата, а запремина одговара запремини трна алата. Поменуте структурне зоне завареног споја дате су на макроскопским снимцима на *Слици 2.12*. [10,22].

## **2.6. Генерисање и пренос топлоте код заваривања трењем са мешањем**

### *Термички модел*

Генерисање топлоте физички се заснива на трансформацији механичке у топлотну енергију у зони контакта алата и радних материјала. Процес заваривања подразумева истовремени термички и механички процес. Чисти термички модел ЗТМ може дати значајна сазнања о овом поступку заваривања и може се користити као први део разматрања, а затим одвојено се разматра модел заосталих напона или

микроструктурни модел. Термички модели се у великој мери разликују од аналитичких *Rosenthal*-ових модела из 1946. године до 3D нумеричких модела *Chen*-ових и Ковачевићевих из 2003. године, али сви су базирани на једначини топлотне проводљивости:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) + q, \quad (2.1)$$

или у случају Ојлерове формулације са конвекцијом:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) + q - \rho c u \nabla T, \quad (2.2)$$

са одговарајућим граничним условима. У једначинама (2.1) и (2.2) користе се следеће

величине у датим јединицама: густина материјала  $\rho \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$ , топлотна капацитивност

$c \left[ \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \right]$ , температура  $T \left[ \text{K} \right]$ , проводљивост (кондуктивност)  $k \left[ \frac{\text{W}}{\text{mK}} \right]$ , запремински

унос топлоте  $q \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^3} \right]$  и вектор брзине заваривања  $u \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$ . Поступак решавања и

његова сложеност много зависи од претпоставки начињених приликом подешавања заваривања, граничних услова и врсте топлотног извора.

#### *Модели топлотних извора*

Приликом решавања једначине топлотне проводљивости за процес ЗТМ важан фактор је  $q$  (еквивалент површинском протоку), који одређује унос топлоте. Разлика се односи на то да ли је топлота генерисана са *Coulomb*-овим трењем, или је топлота генерисана због пластичних деформација материјала током заваривања. *Schmidt and Hattel* 2004. године користили су контактни услов између алата и радног материјала да би направили изразе за генерисање топлоте. Дат је израз за напон смицања (тангенцијални напон мекшег материјала- овде је то радни материјал):

$$\tau = \mu p, \quad (2.3)$$

где је  $p$  контактни притисак између алата и радног материјала (нормални напон) дат у јединици  $\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$ , а  $\mu$  коефицијент трења на контакту алата и радног материјала. Треба напоменути да и  $p$  и  $\mu$  могу бити променљиви током процеса заваривања. Ако је напон смицања радног материјала већи од контактнег напона смицања, две површи ће склизнути. Са друге стране, ако је контактни напон смицања већи од напона смицања радног материјала, залепиће се радни материјал за алат и ротирати заједно са њим, и настаје услов лепљење. Контактна променљива  $\delta$  је дефинисана као

$$\delta = \frac{v_{matrix}}{v_{tool}}, \quad (2.4)$$

где је  $v_{matrix}$  локална брзина радног материјала (брзина течења материјала), а  $v_{tool}$  брзина алата и  $0 \leq \delta \leq 1$ . За чисто клизање код кога материјал није ротиран, већ само еластично деформисан  $\delta = 0$ . За чисто лепљење где се материјал креће истом брзином као и алат  $\delta = 1$ . *Schmidt* је 2004. године тврдио, на основу експерименталних података, да је увек присутно делимично лепљење. На основу контактнег услова, локално генерисање топлоте се може написати као (*Schmidt* и *Hattel* 2005. године):

$$q(r) = \omega r (\delta \tau_{yield} + (1 - \delta) \tau_{friction}), \quad (2.5)$$

где, за  $\delta = 1$  целокупно генерисање топлоте настаје услед пластичних деформација у радном материјалу, а за  $\delta = 0$  генерисање топлоте настаје само услед трења, са напонам смицања услед трења  $\tau_{friction} = \mu p$ .  $\omega$  је брзина обртања алата, а  $r = r(x, y)$  је радијално растојање од осе обртања. За директну примену једначине (2.5) треба имати знање о променљиви  $\delta$  која није константна, као и о напонима смицања  $\tau_{yield}$  и  $\tau_{friction}$ . Велики број модела је приказано у литератури где је, уместо овога, тотални унос топлоте  $Q_{total}$  је прописан, а затим је коришћен за развој израза за локални унос топлоте као функција положаја. На пример може се проценити  $Q_{total}$  уз помоћ експеримената.



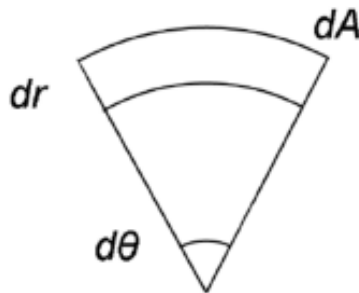
3D термо-механички модел је представљен у *Chao* и *Qi* 1998. године код кога је термички проблем решен пре израчунавања заосталих напона. Унос топлоте је генерисан клизањем између радног материјала и рамена алата. То је урађено у циљу да би се видело колики је удео уноса топлоте од стране трна алата. Овде је постављено да је пречник трна био  $d_{probe} = 0$ , што значи да се топлота генерисала једино од рамена алата. Зависност уноса топлоте од полупречника рамена алата по областима  $q(r)$  дата је изразом:

$$q(r) = \frac{3Q_{total}r}{2\pi(r_o^3 - r_i^3)}, \quad (2.6)$$

где је  $q(r)$  у  $\frac{W}{m^2}$ ,  $Q_{total}$  је укупни унос топлоте дат у  $W$ ,  $r_o$  спољашњи полупречник рамена алата,  $r_i$  унутрашњи полупречник рамена алата, у овом случају  $r_i = 0$ . Једначина (2.6) је изведена и приказана у мало другачијем облику него што је једначина (2.5). Да би се поједноставио проблем, само се посматра генерисање топлоте услед трења изазваног равним челом алата без трна. Генерисање топлоте малог дела чела алата на удаљености  $r$  од осе обртања алата (*Слика 2.13*) је:

$$dQ(r) = \omega r \tau dA = \omega \tau r^2 d\theta dr. \quad (2.7)$$

$\omega$  представља брзину ротације алата, а  $\tau$  је контактни напон смицања између алата и радног материјала. Сегмент површине  $dA$  даје прираштај обртног момента  $r\tau dA$ .



*Слика 2.13* Елементарна површина  $dA = r d\theta dr$  која се користи за израчунавање укупног уноса топлоте [9]

Укупан унос топлоте се може израчунати интегралом једначине (2.7), као:

$$Q_{total} = \int_0^{2\pi} \int_{r_i}^{r_o} \omega \tau r^2 dr d\theta = \frac{2}{3} \pi \tau \omega (r_o^3 - r_i^3). \quad (2.8)$$

У случају клизања, као у *Chao* и *Qi* из 1998. године, контактни напон смицања је дат *Coulombs*-овим законом, тј.  $\tau = \tau_{friction} = \mu p$ . Под претпоставком да укупна притисна сила  $P$  алата узрокује равномерну расподелу притиска  $p$ , и да је коефицијент трења  $\mu$  константан, контактни напон клизања је:

$$\tau = \mu p = \mu \frac{P}{A_{ramena}} = \frac{P}{\pi (r_o^2 - r_i^2)}. \quad (2.9)$$

Унос топлоте по површини је дат изразом:

$$\frac{Q}{A}(r) = \omega r \tau. \quad (2.10)$$

Ако изразимо  $\tau$  из једначине (2.8) и убацимо га у једначину (2.10) добијамо једначину (2.6). Генерисање топлоте по областима зависи линеарно од радијалне удаљености од центра (уздужне осе) алата и укупног уноса топлоте  $Q_{total}$ , који се може претпоставити или проценити из експеримента, нпр. приликом мерења обртног момента. Пример је дао *Dickerson* 2003. године, где је користио формулу  $Q_{total} = \omega T_{measured}$ , а  $T_{measured}$  је измерен обртни момент. Притисак  $p$  и коефицијент трења  $\mu$  могу бити претпостављени или се процењују и када заменимо  $\tau = \mu p$  у једначину (2.8), добијамо:

$$q = \frac{2}{3} \pi \omega r_o^3 \mu p, \quad (2.11)$$

када је  $r_i = 0$ . Ово се може написати у облику као што је *Frigaard* 2001. године дао:

$$q = \frac{4}{3} \pi^2 p N r_o^3, \quad (2.12)$$

где је  $N = \frac{\omega}{2\pi}$  број обртаја у секунди.

*Khandkar* и *Khan* су 2001. године истраживали 3D модел заваривања трењем са мешањем на преклопном споју. Генерисање топлоте настаје услед трења између

алата (чела и трна) и радног материјала и пластичне деформације материјала око трна алата. Укупно генерисање топлоте је у функцији притисне силе алата на радни материјал, коефицијента трења, брзине ротације алата и линеарно зависи од удаљености од центра (уздужне осе) алата. Такође, у модел је укључена и конвекција (пренос топлоте) да би се узео у обзир и транспорт материјала око трна алата. *Khandkar* је 2003. године моделовао генерисање топлоте по областима као:

$$q(r) = \omega r \tau, \quad (2.13)$$

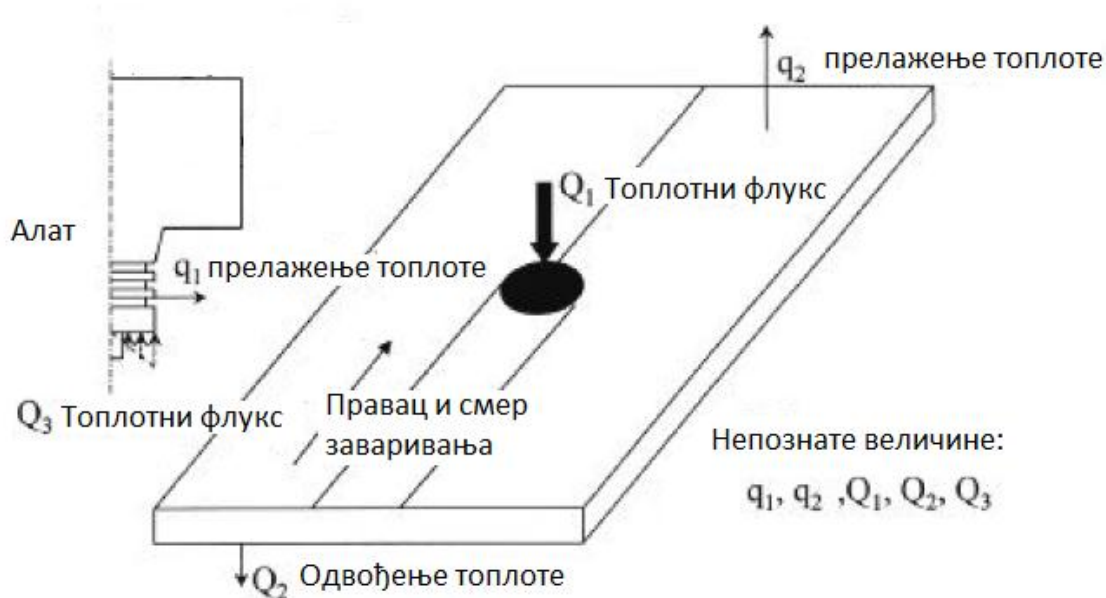
где је  $\tau$  добијено експерименталним мерењима обртног момента током заваривања. Константна вредност  $\tau = 14 \text{MPa}$  је коришћена за легуру Al 6061-T651 и зато нису коришћене претпоставке о вредности  $\delta$ . Дато генерисање топлоте је коришћено у 3D моделу и примењено је на три контактне зоне између алата и радног материјала, тј. чело алата, трна алата и сам врх трна алата.

*Schmidt* и *Hattel* су 2008. године написали да је напон смицања услед трења једнак напону смицања услед деформација. Ово је случај када је присутно лепљење, тј.  $\delta > 0$ . Генерисање топлоте из једначине (2.5) у том случају је:

$$q = \omega r \tau_{yield}. \quad (2.14)$$

Овај резултат је добијен интеграљењем запреминског генерисања топлоте због пластичних деформација радног материјала у слојевима смицања између алата и радног материјала. Ако материјал у контакту са алатом има брзину  $\delta \omega r$  и са претпоставком о константној брзини деформације у слоју смицања, добијамо да је интеграл од локалног пластичног генерисања топлоте  $q_{pl} = \delta \omega r \tau_y$ . Ово је први део једначине (2.5). Ако је присутно лепљење, тј.  $\delta > 0$ , онда је  $\tau_{friction} = \tau_{yield}$  и тада једначину (2.5) редукујемо у једначину (2.14). Углавном  $\tau_{yield}$  је у функцији од температуре и смањиће се на нулу када је  $T = T_{solidus}$ , где материјал прелази из чврстог у течно стање. То значи да када температура досеже солидус температуру радних материјала, генерисање топлоте нестаје и на тај начин се ограничава добијање максималне температуре. Модел тако обухвата неке од механичких утицаја ЗТМ без решавања експлицитно за њих појединачно.

Око 95% генерисане топлоте услед трења се преноси у радни материјал, а преосталих 5% се преноси у алат. На Слици 2.14 приказан је шематски приказ коришћених граничних услова у *Chao*-вом и *Qi*-овом моделу.



Слика 2.14 Шематски приказ граничних услова код процеса ЗТМ [17]

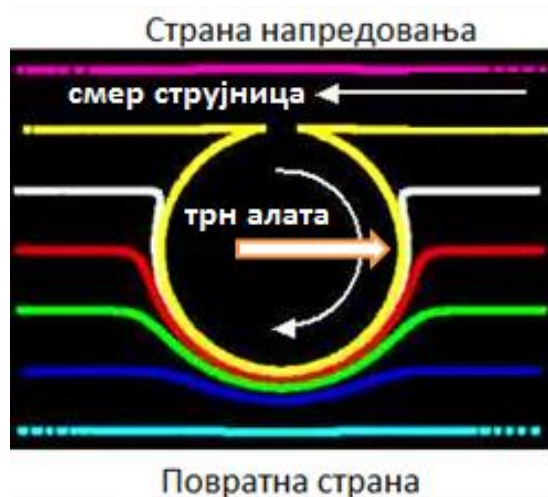
Постоји три начина моделовања извора топлоте и његове геометрије:

1. укупна топлота се генерише уз помоћ рамена (само чело без трна алата),
2. генерисање топлоте бочном површином трна алата и
3. генерисање топлоте на челу трна алата [7,17,24].

## 2.7. Течење материјала и грешке завареног споја

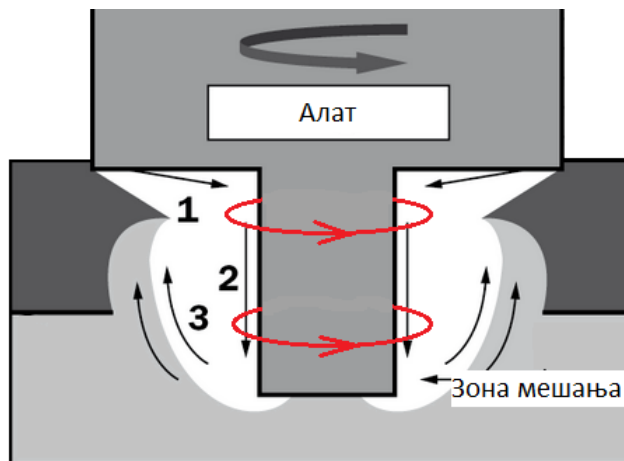
Код процеса ЗТМ постоји примарно и секундарно течење материјала. Примарно течење односи се на течење, тј. транспорт омекшалог материјала око трна алата. Потребна и довољна количина омекшалог материјала мора бити пренешена од стране ротирајућег трна са повратне ка страни напредовања метала шава, да би заварени

спој био без грешака. На *Слици 2.15* приказане су струјнице примарног течења материјала [25-27].

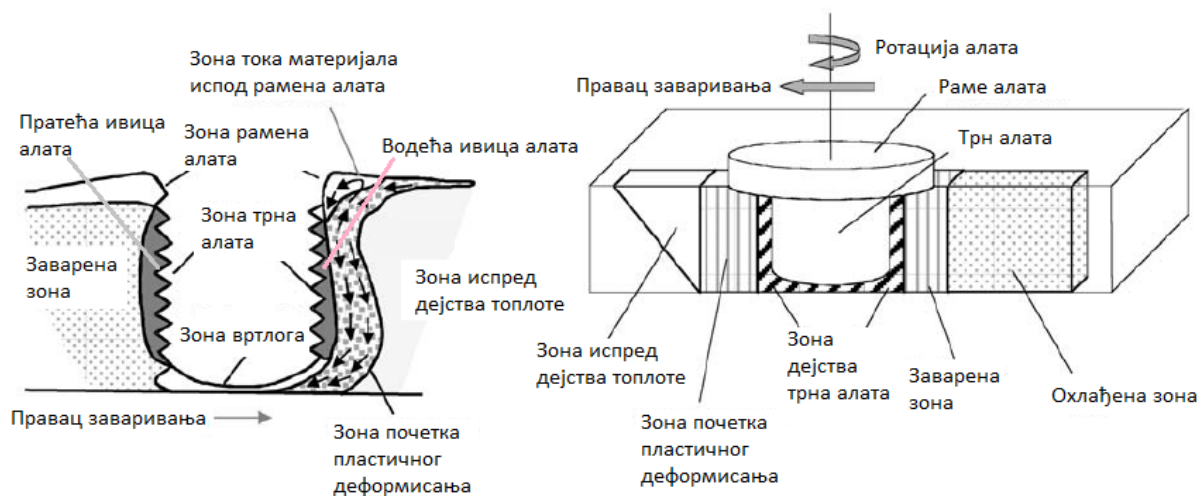


*Слика 2.15* Струјнице примарног течења материјала око трна алата [28]

Секундарно течење материјала подразумева транспорт размекшалог материјала у правцу вертикалне осе и настаје под дејством трна и чела алата. Навој трна алата има такву геометрију да гура размекшали материјал на доле, према корену метала шава. Материјал који се налазио на повратној страни близу лица метала шава транспортује се на лице на страни напредовања метала шава. Материјал који се налазио близу лица метала шава на страни напредовања транспортује се на доле. Примарно и секундарно течење материјала шематски је приказано на *Слици 2.16*, а на *Слици 2.17* приказане су процесне зоне које се јављају током заваривања.



Слика 2.16 Приказ примарног (црвене стрелице) и секундарног (црне стрелице 1,2,3) течења материјала [29]



Слика 2.17 Металуришке процесне зоне које се јављају током заваривања трењем са мешањем [30]

### 2.7.1. Грешке у завареним спојевима

Типичне грешке које се јављају унутар споја насталог поступком заваривања трењем са мешањем су [31,32]:

1. тунели,
2. непроварени корен споја (несавршено везивање) и

3. линије везивања (енг. *OJLwSPD- original joint line with severe plastic deformation*).

Све грешке се могу елиминисати правилним избором параметара заваривања и начином стезања.

Грешка типа тунела јавља се на страни напредовања завареног споја услед недовољног транспорта материјала од повратне ка страни напредовања. Јавља се непосредној околини трна алата. Недовољни транспорт материјала, самим тим и појава тунела најчешће је последица превелике брзине заваривања и смањене притисне силе алата. При неадекватним параметрима заваривања тунел се може отворити, односно постаје јасно видљив на лицу метала шава. Најчешће се тунел идентификује током испитивања макроструктуре на микроскопу (Слика 2.18). Овај тип грешке спада у запреминске, па се и радиографским испитивањем може уочити.

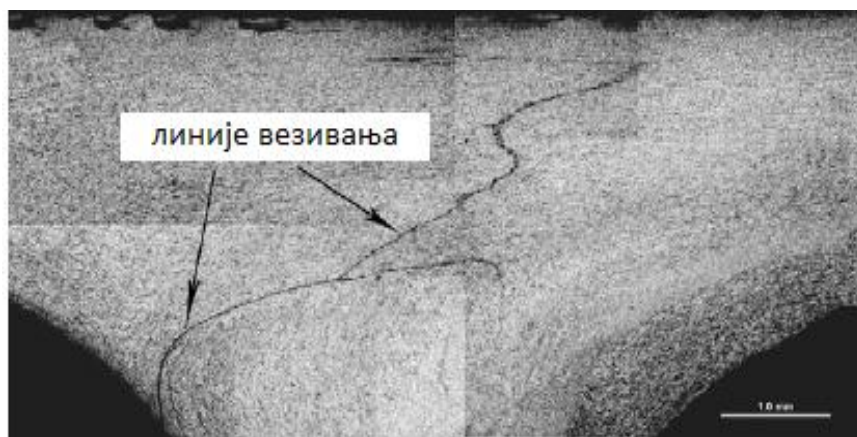


Слика 2.18 Микроскопски приказ грешке типа тунела и непровареног корена код Т-споја [31]

Непроварени корен јавља се услед недовољне пенетрације алата, на кореној страни споја у близини грумена. Ако је трн алата краћи него што би тебао да буде, радни материјал који се налази са корене стране споја се не меша довољно. Овај тип

грешке представља иницијалну прслину и тиме је смањена затезна чврстоћа споја. Уочава се при макроскопском испитивању структуре завареног споја.

Грешка типа линија везивања назива се још и укључци оксидног слоја по линији споја (Слика 2.19) [31]. Настаје услед транспорта оксидних честица са површине радних материјала у унутрашњост споја. Лако се уочава, изражена је танком кривудавом линијом, односно „оксидном линијом“. Смањење материјала од стране трна алата који ротира у великој мери подстиче примарно течење материјала, али јако ретко у вертикалном правцу (секундарно течење материјала). Ток материјала око трна алата на страни напредовања и повратној страни је асиметричан, и јако је тешко описати феномен течења материјала код ЗТМ. Присутност ове грешке на страни напредовања указује на то да је ток материјала на тој страни тежи. Линија везивања представља иницијалну прслину у споју и тиме су му смањене механичке карактеристике, а може се избећи већим уносом топлоте у процес, избором одговарајуће геометрије алата и уклањањем оксидног слоја са површине радних материјала.



Слика 2.19 Простирање грешке типа линије везивања у Т-споју [31]



## 2.8. Механичка испитивања заварених спојева од алуминијумских легура

Механичка испитивања заварених спојева су испитивања разарањем. Циљ овог испитивања је да се добију квантитативни показатељи који описују како се понаша заварени спој када је изложен механичком оптерећењу. Осим механичких испитивања, често је неопходно урадити и металографска испитивања у циљу идентификације структуре завареног споја.

За одређивање механичких својстава заварених спојева неопходно је направити епрувете у складу са одговарајућим стандардом. Узорци за испитивање се добијају одсецањем наставака са шавом који су намерно остављени на завареним комадима. Од преосталог дела плоче израђују се такође епрувете за друга испитивања. Механичка испитивања заварених спојева подразумевају: затезање, савијање, мерење тврдоће, жилавости, заосталих напона и динамичке чврстоће епрувета.

Својства метала шавова се разликују од особина основног материјала, односно особине четири зоне у завареном споју (основни материјал, зона утицаја топлоте, зона термо-механичког утицаја и грумен) се међусобно разликују. Заваривање трећем са мешањем је термо-механички процес где алат својим кретањем и геометријом узрокује повећање температуре у зони спајања материјала и деформацију микроструктуре метала шавова, а самим тим мењају му се механичке карактеристике и тврдоћа. Брзина обртања алата, брзина заваривања, притисна сила, угао нагиба, урањање и геометрија алата имају значајан утицај на својства завареног споја. Металутшке трансформације се разликују код сваке легуре алуминијума и зависе од легирајућег елемента, као и од стања легуре. Промене код легуре које таложно отврдњавају (термички ојачавају, термички обрадиве легуре, серија 2xxx, бxxx и 7xxx) сложеније су за разлику од металуршких промена код легура са растварајућим отврдњавањем (термички необрадиве легуре, термички не ојачавају, серија 3xxx, 4xxx и 5xxx) [5,33,34].

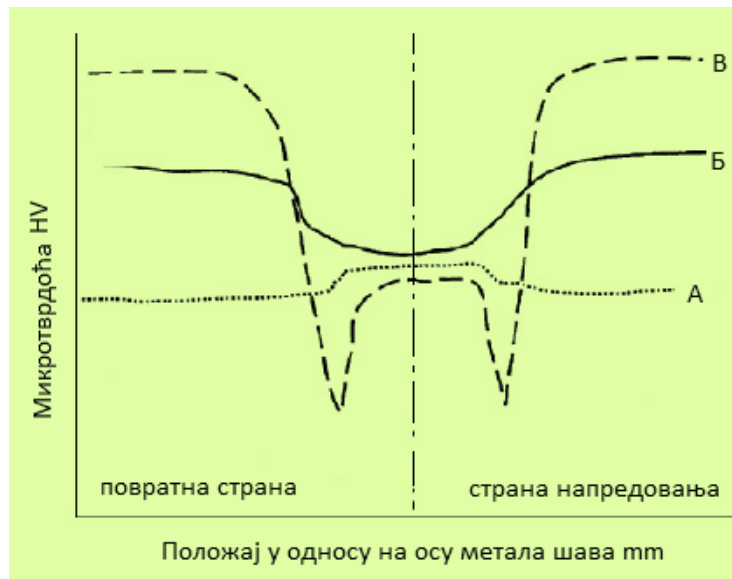
### 2.8.1. Испитивање тврдоће завареног споја

Циљ испитивања тврдоће јесте да се одреди тврдоћа основног материјала, зоне утицаја топлоте, зоне термо-механичког утицаја и зоне мешања. За испитивање тврдоће најчешће се примењује испитивање по методи Викерса, а може и по методи Бринела.

При одређивању тврдоће код термички необрадивих легура, серије 5xxx-O (жарено стање) уочава мало повећање тврдоће у зони утицаја топлоте, зони термо-механичког утицаја и грумену, у односу на основни материјал. У самом грумену јавља се највећа микротврдоћа због уситњавања зрна услед интезивног механичког мешања и повишене температуре. У зони термо-механичког утицаја радни материјал је изложен дејству механичког мешања, али и температуре, тако да је ту већа тврдоћа у односу на зону утицаја топлоте. Материјал у ЗУТ-у је изложен само утицају топлоте, тако да је његова тврдоћа незнатно већа у односу на основни материјал. Дијаграм расподеле микротврдоће за ову врсту легура је приказан на *Слици 2.20* линијом А.

Код термички необрадивих легура алуминијума које су деформационо ојачане, серије 5xxx-N, уочава се пад микротврдоће у грумену (*Слика 2.20*, крива Б). То се дешава као последица отпуштања материјала, које се јавља због топлоте настале трењем.

Термички обрадиве легуре које таложно ојачавају најмању вредност тврдоће имају у зони непосредно изван грумена. У области грумена таложно ојачавање обично изостаје. Ако дође до издвајања талоба у овој области, издвојене честице су веома fine. У зони непосредно изван грумена издваја се груб талог. Што се иде даље од грумена смањује се величина издвојеног талоба [16]. Овакав распоред талоба је поледица простирања топлоте кроз заварени спој. Због топлоте настале услед трења врши се термичка обрада, а то има велики утицај на микроструктуру споја. Расподела тврдоће код ових легура има карактеристичан облик „W“, као што је приказано на *Слици 2.20* кривом линијом В.



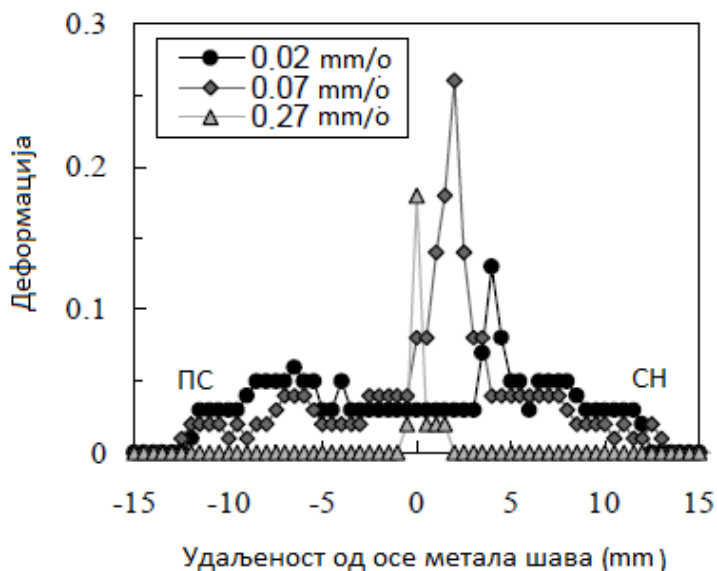
Слика 2.20 Шематски приказ дијаграма расподеле тврдоће у зависности од удаљења од осе метала шави нормалне на правац заваривања [16]

### 2.8.2. Испитивање затезањем. Замор материјала. Заостали напони

Ефикасност завареног споја подразумева однос затезне чврстоће споја и затезне чврстоће основног материјала. Изражава се у процентима и говори о квалитету и механичким особинама споја, а значајно зависи од типа алуминијумске легуре [31]. Спој добијен поступком ЗТМ далеко има већу ефикасност од споја добијеног конвенционаним поступцима заваривања, поготово кад се ради о легурама алуминијума високе чврстоће. Ефикасност споја од легуре алуминијума серије 5xxx може да буде и 100%, а за серије 2xxx, 6xxx и 7xxx ефикасност споја се креће од 75% до 90%, а лом настаје на повратној страни метала шави. Затезна чврстоћа алуминијумских легура се повећава са порастом брзине заваривања. Накнадном термичком обрадом заварених спојева повећава се затезна чврстоћа, али се при том смањује савојна чврстоћа спојева услед раста величина зрна структуре материјала у ЗТМУ.

На Слици 2.21 приказана је расподела деформација у сучеоном споју алуминијумске легуре 2017-T351 приликом затезања. Повећањем корака заваривања,

место лома споја се постепено приближава оси метала шава [35]. Такође се уочава да је највећи проценат издужења присутан у области грумена, јер та област има највећу способност пластичне деформације.

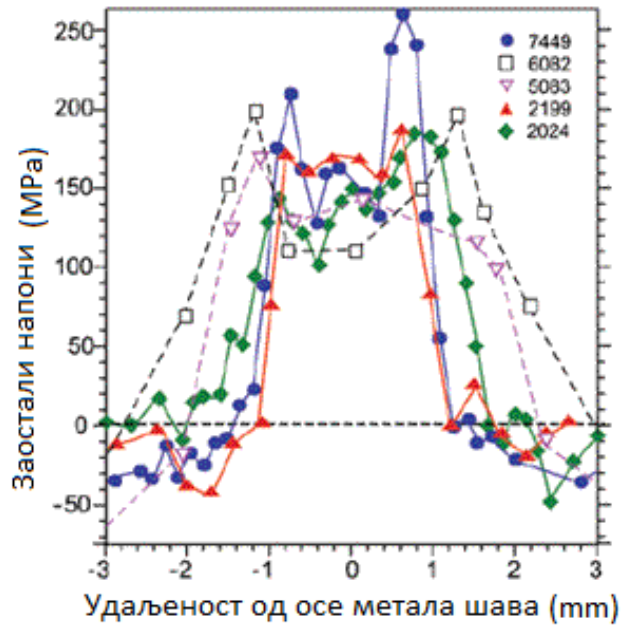


Слика 2.21 Простирање деформације у типичном сучеонм споју, СН- страна напредовања ПС- повратна страна [35]

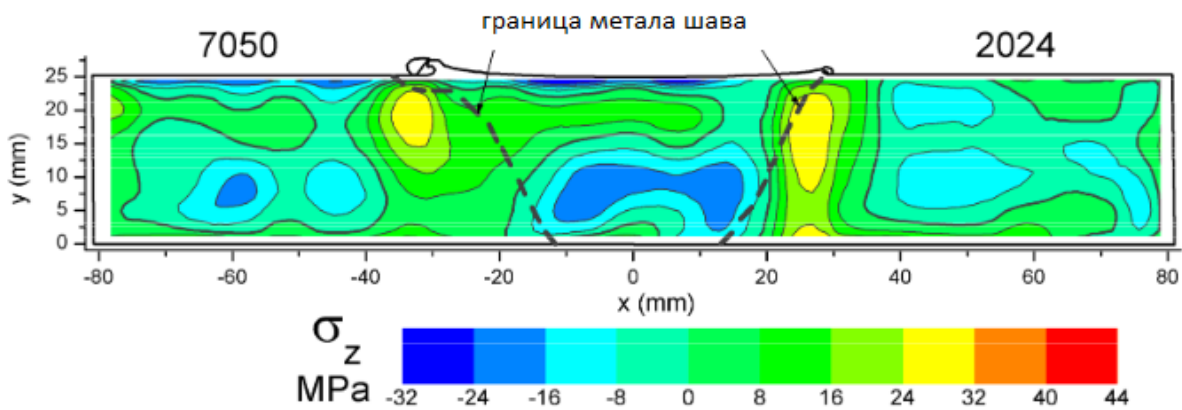
Квалитет површине завареног споја има велики утицај на испитивање на замор материјала. Цикличним испитивањем у подужном и попречном правцу утврђено је да је само 50% отпорност споја на замор од отпорности основног материјала. Мала надвишења која су присутна на страни напредовања, као и гребенасти трагови чела алата, представљају места на којима се развијају заморне прслине. Када се обраде површине са стране лица и корена метала шава, тј. скине се слој дебљине од  $0,1 \div 0,15$  mm, отпорност споја на замор је приближно једнака основном материјалу [16]. Заморне прслине ће после машинске обраде настати у области најмање тврдоће.

Заостали напони који се јављају у завареним спојевима добијеним поступком заваривања трењем са мешањем су далеко мањи од заосталих напона који се јављају у спојевима добијеним поступцима топљења материјала. Заостали напони имају доминантан утицај на настанак и раст прслине кроз заварени спој и треба тежити да

се ови напони сведу на минимум правилним избором параметара заваривања. На Слици 2.22-2.23. приказана је расподела уздужних заосталих напона код различитих легура алуминијума.



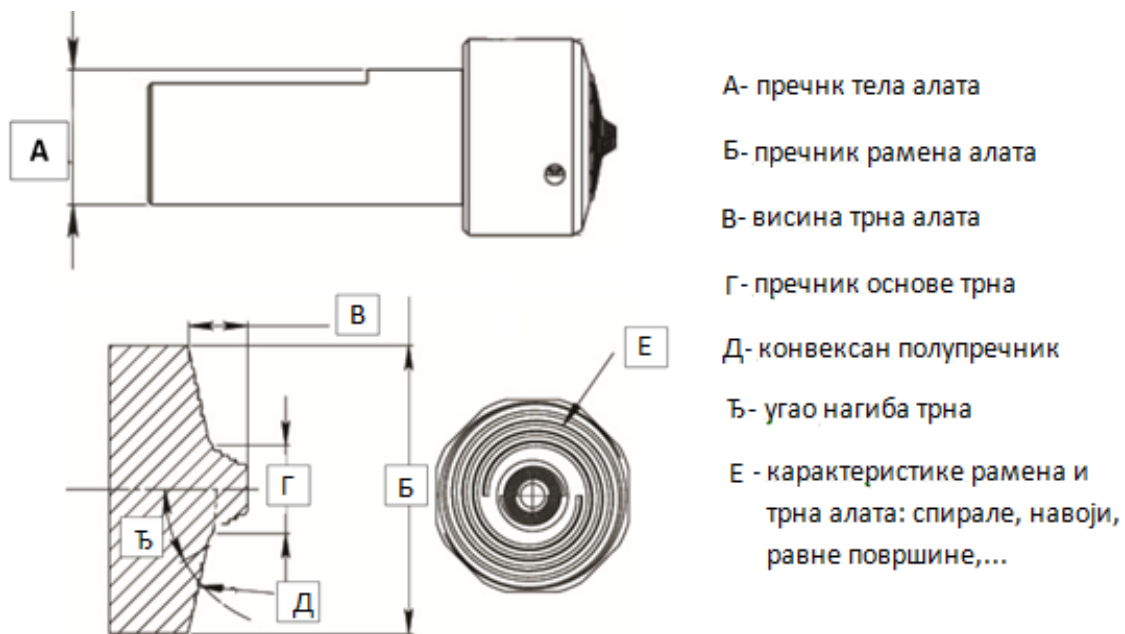
Слика 2.22 Уздужна расподела заосталих напона за легура алуминијума 7449, 2199, 6082, 2024 и 5083 [36]



Слика 2.23 Уздужни заостали напони мерени на узорку исеченом из завареног споја [37]

## 2.9. Алати за ЗТМ

Специјални алат који се користи за заваривање је цилиндричног облика и састоји се из тела алата и радног дела алата којег сачињавају два концентрична дела: раме и трна алата. Облици чела и трна алата могу бити различити. Чело алата може имати концентрично удубљење на својој површини, док је трн најчешће коничног облика, профилисан завојницом или жљебовима. Тело алата служи да се он причврсти у стезне чељусти машине. Висина трна је обично већа од половине дебљине материјала, али увек је мања од укупне дебљине материјала које заварујемо (неколико десетих делова милиметра висина трна је мања од дебљине материјала). На *Слици 2.24* дата је геометрија и део радионичког цртежа алата са називима основних димензија.



Слика 2.24 Димензије и геометрија алата [38]

ЗТМ је термо-механички процес код кога температура алата прелази солидус линију материјала који се заварују. Производња квалитетног завареног споја захтева одговарајући материјал алата. Треба избећи да алат промени димензије и облик,

односно да се похаба и поломи [22]. Алати морају имати следеће карактеристике материјала:

- ✓ повишену чврстоћу и на високим температурама,
- ✓ отпорност на хабање,
- ✓ одговарајућу жилавост лома,
- ✓ коефицијент термичког ширења и
- ✓ добру обрадљивост.

Постоји неколико врста материјала алата за заваривање који се користе у зависности од материјала који се заварује [39-40]:

- **алатни челици**- најчешће коришћени материјал за алате код ЗТМ поступка, доступан и једноставан за обраду, термичка отпорност на замор материјала, отпорност на хабање, посебно се користи за заваривање легура алуминијума, легура магнезијума и легура бакра,
- **легури никла и легури кобалта**- висока чврстоћа, добра жилавост, стабилност чврстоће, отпор на пузање, радна температура је типично од 600÷800 °С,
- **ватростални метали (W, Мо)**- висока температурна чврстоћа (најјаче легури између 1000÷1500 °С им је радна температура), цена им је висока, тешка обрадљивост, крти су,
- **легури волфрама**- добра чврстоћа, висока радна температура, доста су скупи,
- **композити**- карбидне честице ојачане металом (WC, WC-Co, TiC)- конкурентна отпорност на хабање, одговарајућа жилавост лома и
- челици са обложен поликристалним кубним бор нитридом (препознатљиви под називом **PCBN**)- одлична отпорност на хабање, ниска жилавост лома, доста је скуп алат. Термичка препрека између PCBN трна алата и волфрам-карбидне дршке алата користи се за смањење преноса топлоте настале услед трења на тело алата (*Слика 2.32*).

У Табели 2.3 је дат преглед материјала алата који се користе за одговарајуће радне материјале.

Табела 2.3 Најчешће коришћени материјали алата за радне материјале различитих дебљина [40]

Материјали који се заварују	Дебљина [mm]	Материјал алата
Легуре алуминијума	3÷50	Алатни челици, Со-WC композити
Легуре магнезијума	3÷10	Алатни челици, WC композит
Легуре бакра	3÷50	Ni-легуре, W-легуре, PCBN, алатни челици
Легуре титанијума	3÷10	W-легуре
Нерђајући челици	3÷10	PCBN, W-легуре
Ниско-легирани челици	3÷10	WC композити, PCBN
Легуре никла	3÷10	PCBN

Облици **рамена** и чела алата (Слика 2.25 а-б) могу да буду различити. Раме алата је обично цилиндричног облика, али се повремене користи и конусни облик. Генерално, облик рамена има безначајан утицај на квалитет заваривања.

Најчешће се користе три облика чела алата [16,41]: чело са равном површином, конкавно и конвексно чело.

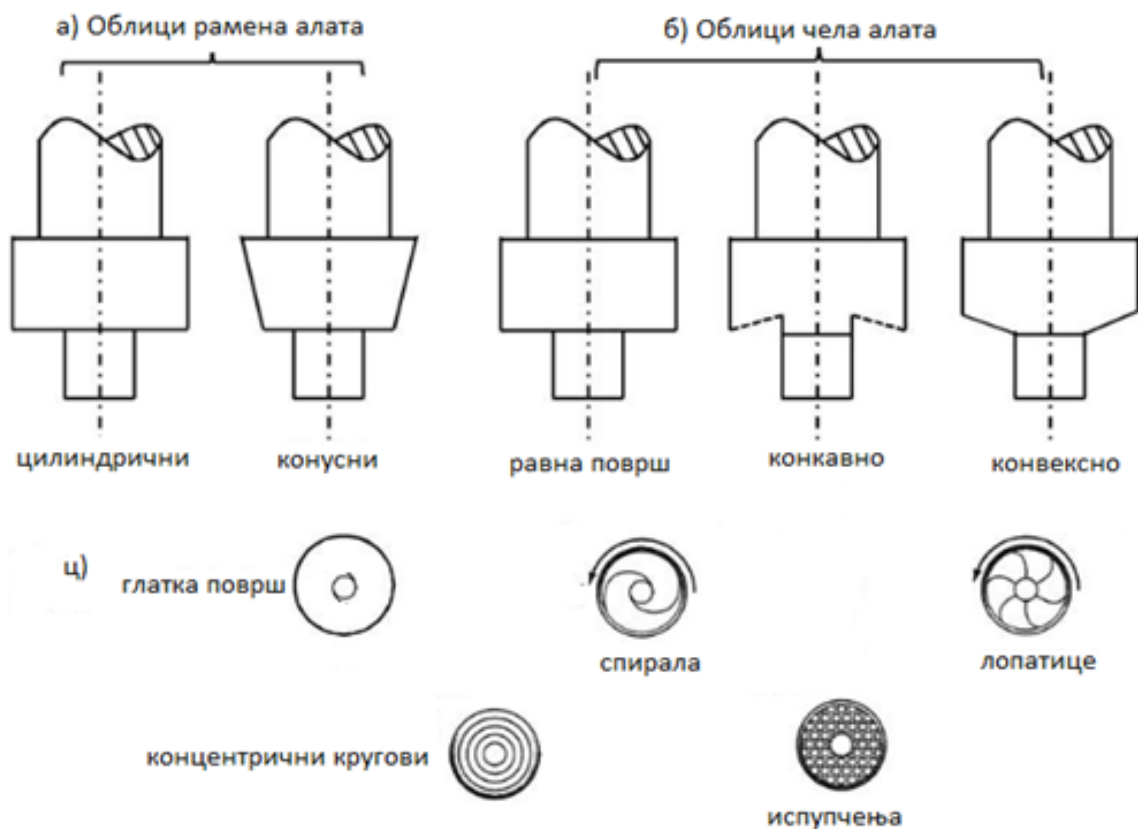
Чело са равном површином - облик је најједноставнији, даје леп визуелни изглед лица шава, без валовитости, али није ефикасно као профилисано чело.

Конкавно чело је доста популарно јер спречава истискивање материјала око рамена алата. Израда је једноставна и његова примена даје добре заварене спојеве. Угао нагиба је мали, обично износи од  $6\div 10^\circ$  у односу на равну површ рамена. Конкавна површ чела алата служи као резервоар за транспортовани материјал од стране трна алата. Праволинијским кретањем алата, због крајње ивице рамена алата



и услед притисне силе, материјал из резервоара се враћа у рупу испод чела алата. Ово доводи до доброг мешања материјала и финог грумена.

У првим покушајима у *TWI* конвексни облици лоше су се показали, јер су гурали радни материјал даље од трна алата. Међутим, примећено је да се глатка површина конвексног чела и пречник рамена од 5 mm успешно користе за заваривање плоча дебљине 0,4 mm алуминијумске легуре AZ31Mg (облик краја рамена нема значаја услед дебљине мање од 1 mm).

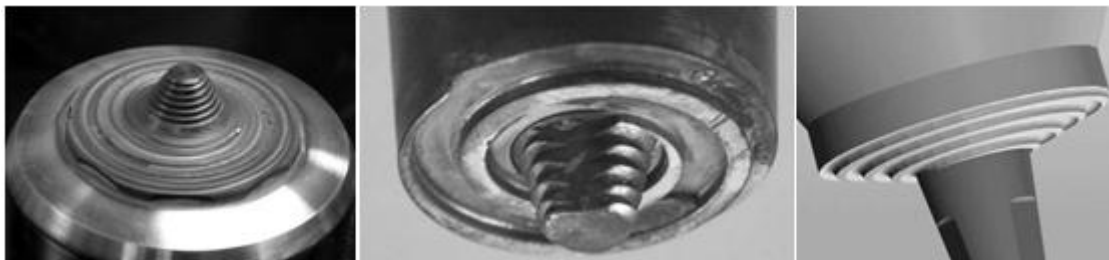


Слика 2.25 Облици: а) рамена алата, б) чела алата и ц) изглед површине чела алата

[41]

Површине чела алата могу да садрже неке карактеристичне облике који служе за повећање трења материјала, смицања и деформација, за повећање мешања материјала и добијање завареног споја што бољег квалитета. На *Слици 2.25 в)* дате су

карактеристике чела алата које се могу применити на равни, конкавни или конвексни облик чела алата. Најчешће се користи спирални канал код чела са равним обликом. Канал побољшава проток материјала од ивице рамена па све до трна алата и тако се елиминише потреба за нагибом алата [42]. На *Слици 2.26* приказане су фотографије појединих облика чела алата.



*Слика 2.26 Приказ: а) конвексног чела алата са заобљењем, б) равног чела алата са спиралним каналом в) конвексног чела алата са конусом [42]*

Током ЗТМ при великим брзинама заваривања, конкавна и глатка површина чела алата има тенденцију да транспортује радни материјал далеко од горње површине радног дела. До тог долази јер је материјал константно заробљен у резервоару, као што је мало пре описано. Међутим, конкавно раме са спиралним каналом (жлебом) може смањити подизање материјала при великим брзинама заваривања. Материјал који се смиче од радне површине непрекидно се увлачи у канале чиме се повећава деформација и трење на површини радних комада [41].

**Трн алата** производи загревање услед деформације и трења. Дизајниран је тако да смиче материјал предњим својим делом и гура га иза себе. Дубина смицања материјала и брзина заваривања зависе од трна алата. Однос између пречника рамена алата и трна износи најчешће 3.

Сам врх трна алата може бити раван или са куполом (*Слика 2.27*). Трн са равним завршетком је једноставнији за производњу и најчешће се користи. Главни недостатак равног завршетка трна је што је потребна велика притисна сила за урањање алата у радни материјал. Супротно томе, трн са куполом може смањити притисну силу, смањује хабање алата приликом урањања у материјал, повећава

радни век алата елиминисањем локалне концентрације напона и повећава квалитет корена споја. Ове предности се посебно уочавају када купола има полупречник 75 % од пречника трна алата.

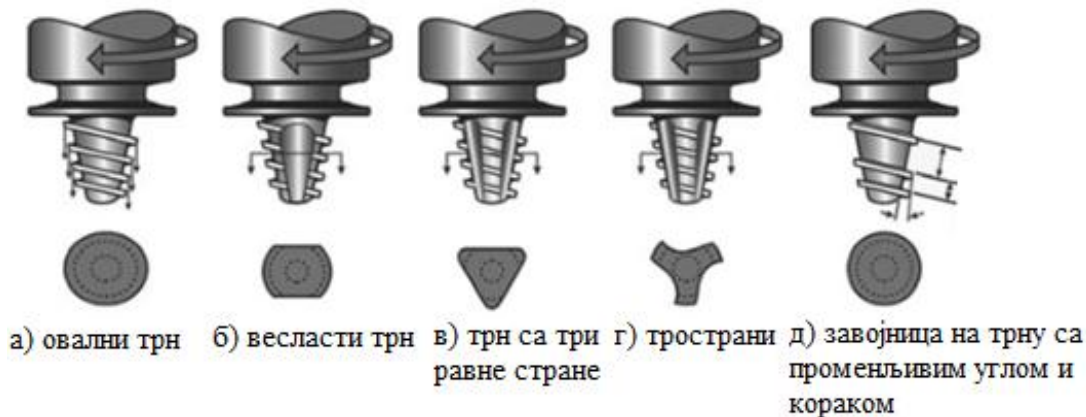
Трнови алата су обично цилиндричног облика, а ређе су и конусног облика. Цилиндрични трнови се користе за спајање алуминијумских плоча дебљине до 12 mm. За веће дебљине плоча да би се одржао интегритет шави, да би се остварило што боље мешање материјала и да би се смањила оптерећења процеса, мора се смањити брзина заваривања, повећати број обртаја алата и променити облик површине трна (навој, равне површи). Сужавањем трна алата виша топлота проузрокована трењем повећава пластичну деформацију због веће површине контакта трна алата и радних материјала. Конусни трн такође подстиче висок хидростатички притисак у зони шави, који је изузетно важан за што боље мешање материјала и целовитост грумена. Међутим, превисока температура и хидростатички притисак могу довести и до озбиљног хабања алата.



Слика 2.27 Фотографије: а) цилиндрични трн са равним врхом, б) цилиндрични трн са куполом на врху и в) трн конусног облика са равним врхом [22]

Спољашња површина трна алата може бити равна или са навојем, а при том различитих облика. Трнови са навојем се користе код легура високе чврстоће. Добро мешање материјала се постиже коришћењем трна са левим навојем који се ротира у смеру казаљке на сату. Материјал може да циркулише више пута око алата пре него што буде потиснут иза алата. Група аутора [43] је утврдила да мењањем саме површине трна, тачније додавањем равних површина, може се утицати на ток

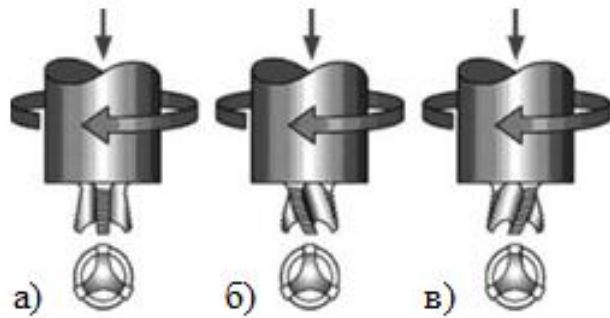
материјала око трна. Равне површине делују као весла и тиме се повећава локална деформација и турбулентност тока омекшаног материјала.



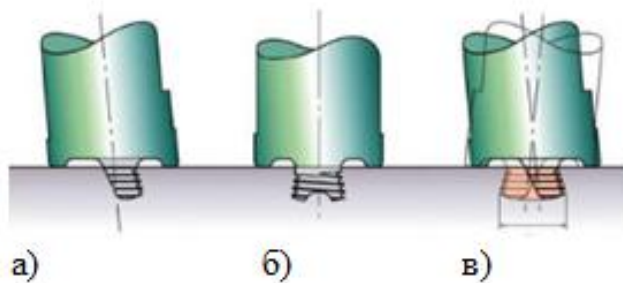
Слика 2.28 Приказ *Whorl* алата [44]

*Whorl* (спирални) и *MX-Triflute* (МХ-трожлебни) трнови алата развијени су од стране *TWI* и могу заварити алуминијумске легуре дебљине од 50÷60 mm. Типични изгледи површина трнова алата дати су на *Слици 2.28*. Овим алатима се производе спојеви са добрим механичким особинама и квалитетом површине при великим брзинама заваривања. Омогућавају лакши проток омекшаног материјала према корену шавова и повећана површ контакта трна алата и омекшаног материјала [41-45].

Преклопне спојеве је теже остварити него сучеоне из разлога што су потребни шири шавови за равномеран пренос оптерећења у структури, долази до стањивања горњег радног материјала и долази до заробљавања оксидног слоја између преклопљених површина. За превазилажење ових проблема користе се две релативно нове геометрије за трнове алата *Flared-Triflute* (ширећи трожлебни, *Слика 2.29*) и *A-skew* (А-закошени, *Слика 2.30*), настали у *TWI*. Алат *A-skew* има трн који је благо нагнут у односу на вретено машине. Ови алати су развијени због побољшања квалитета шавова и коришћењем њих се удвостручила брзина заваривања, 20% се смањила сила у аксијалном правцу и значајно проширила зона заваривања (више од 150% од пречника трна у поређењу са 110% конвенционалног пречника трна са навојем) чиме се остварује боље мешање материјала.



Слика 2.29 Flared-Triflute алат са а) неутралним, б) левим и в) десним навојем [41]



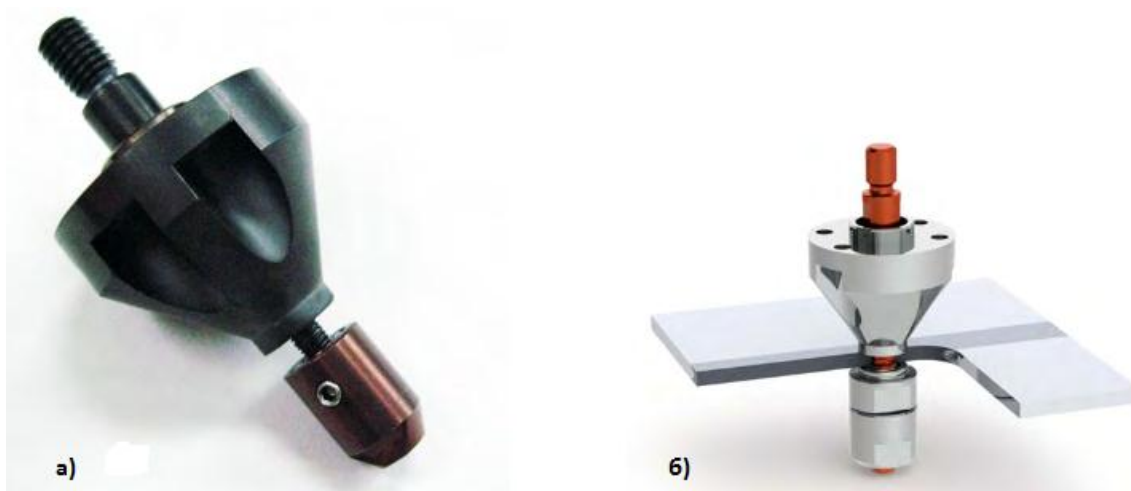
Слика 2.30 A-skew алат: а) поглед са стране, б) поглед с'преда и в) област обухваћена трном алата током заваривања [41]



Слика 2.31 PCBN трн алата [41]

*Bobbin* алат (енг. *Bobbin tool*, у преводу на српски језик „калемљени“ алат), дат на Слици 2.32, је посебна врста алата за ЗТМ. Назив се односи на облик ових алата,

који се састоји од два рамена повезаних трном алата. Трн алата пролази кроз материјал који се заварује. Горње раме и трн алата су слични као и код стандардних алата за ЗТМ, а доње раме је у контакту са супротном површином радних материјала [21].



Слика 2.32 а) Фотографија *Bobbin* алата и б) приказ модела *Bobbin* алата током заваривања [21]

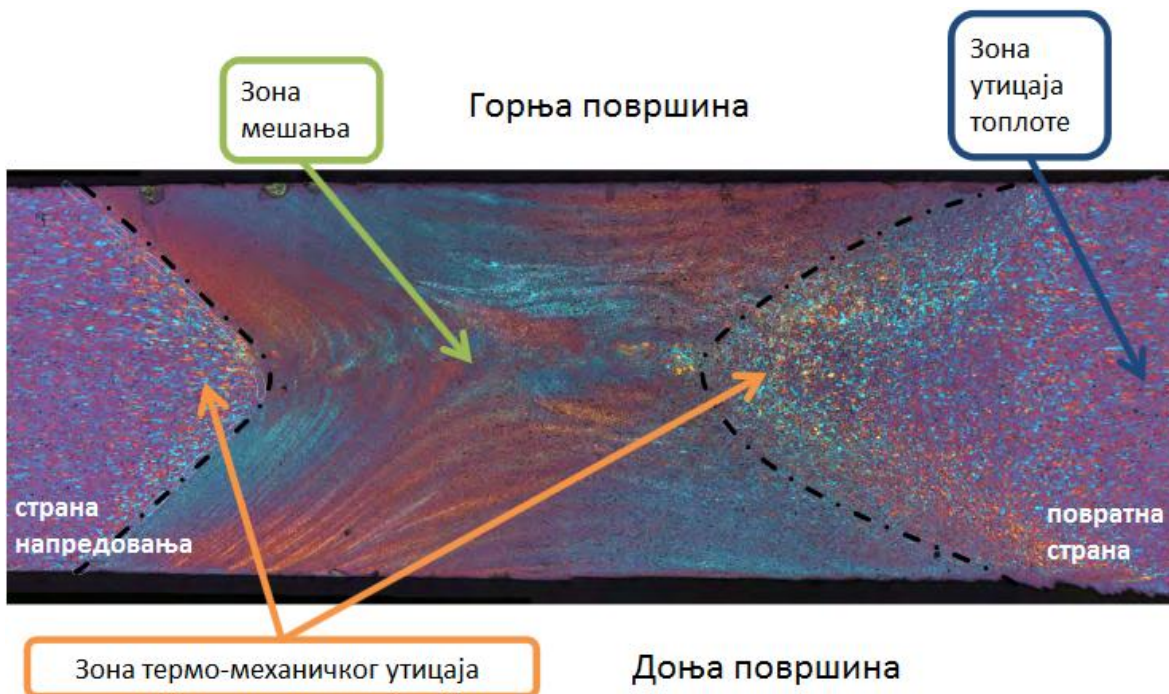
*Bobbin* алат користи технику која омогућава двострано заваривање. Потоји више типова конструкција овог типа алата, а најчешће се користе два: фиксни код кога је растојање између два рамена непроменљиво и самореагујући код кога трн може да се увлачи и на тај начин се прилагођава растојање између два рамена.

Улаз алата у радне материјале је другачији са *Bobbin* алатом. Један начин је да се избуши отвор у плочама које се заварују, убаци се трн алата и намонтира доње раме алата. Онда крене ротација алата и полако транслаторно кретање. Други начин је да се састављени алат који ротира доведе до радних комада који су чврсто стегнути са бочне стране. Транслаторно кретање алата ће пратити линију спајања радних материјала. Корак заваривања је сличан као и код ЗТМ са стандардним алатом.



Слика 2.33 Место излаза Bobbin алата [21]

Фаза излаза алата из радних материјала је такође другачија него код ЗТМ са стандардним алатом. Алат може да се заустави на жељену позицију, демонтира се, односно скине се доње раме и трн се извади као код стандардног извођења. Ово се веома ретко ради у пракси јер је компликовано. Други начин излаза алата је много једноставнији, алат се креће дуж линије споја и напушта заварен спој, остављајући за собом траг, као што је приказано на *Слици 2.33*, који се касније машински обради. *Слика 2.34* даје макроскопски приказ структурних зона при коришћењу Bobbin алата.



Слика 2.34 Макроструктурне зоне при коришћењу Bobbin алата [21]

Предности употребе овог алата јесу те што се не користи подложна плоча, елиминација грешака у кореном делу шави које настају услед недовољне пенетрације алата у материјал радних плоча и није потребна сила притиска алата на радне материјале [6,44].

## 2.10. Машине за заваривање трењем са мешањем

Прва машина за заваривање трењем са мешањем била је модификована глодалица у Институту за заваривање *TWI* у Великој Британији. То је било 1991. године када је нова техника заваривања откривена и патентирана [46].

Данас, *TWI* користи широк спектар машина и додатне опреме за истраживање и развој заваривања трења са мешањем. Успешно се заварују материјали дебљине од 0,3÷75 mm. Неке од компјутерско управљаних *ESAB*-ових машина (*ESAB-Laxa*, Шведска) су [47-51]:

- *SuperStir*– има вакуумско стезање радног материјала за сто машине. Прва је произведена 1996. године. Распон дебљина лима је од 1÷25 mm. Радни простор машине је 5x8x1 m. Максимална притисна сила је 60 kN (понекада се означава и у тонама, што износи 6 t), док је максимална брзина обртања 5000 o/min.
- *PowerStir*– једна од највећих ЗТМ машина у свету са више од 130 KW снаге обртања вретена. Максимална притисна сила је 15 t, а радни простор је 6x3 m. Машина може да изврши 3D заваривање. Испод горњег вретена има и доње тако да може да се изврши заваривање са две стране истовремено и постиже се дебљина вара и до 100 mm у једном пролазу.
- *Precision Spindle*– јединствена карактеристика ове машине је велика брзина обртања вретена. Из тог разлога добра је за заваривање материјала са већим температурама омекшавања као што су: челик, нерђајући челик, легуре титанијума и легуре никла. Притисна сила је до 10 t, а радни простор стола машине је 2x0,6 m.



- *RoboStir*– због флексибилности робота могуће је у разним положајима вршити заваривање и пратити комплексне 3D линије споја. Радни сто машине је пречника 5 m и може се физички преместити за заваривање већих компоненти.

На *Слици 2.35* је приказана машинска ЗТМ опрема *ESAB SuperStir* постављена у бродоградилушту „*Marine Aluminium*“ у Норвешкој за заваривање дугих шавова бродских панела. Панели могу бити дужине 6x16 m и висине и до 155 mm [23].



*Слика 2.35 ESAB SuperStir у бродоградилушту „Marine Aluminium“, велики бродови као типични примери на којима се заварују панели поступком ЗТМ [6]*

Заваривање трењем мешањем може се изводити и на алатној глодалици. Важно је само да конструкција машине обезбеди могућност адекватног и поузданог стезања радних материјала који се заварују, доволну притисну силу на радне материјале, регулацију броја обртаја и контролу кретања алата дуж линије спајања плоча које се заварују [9].

## 2.11. Предности и недостаци поступка

ЗТМ је термо-механички процес спајања материјала у чврстој фази. Топљење радног материјала није присутно током процеса заваривања (температуре процеса су око 80% од температуре топљења радних материјала) чиме је избегнута појава прслина и порозности, а кривљење, витоперење и заостали напони завареног споја су минимални. Прегледом литературе закључено је да процес има више предности него недостатака [52-60]. Основне предности поступка ЗТМ су :

- ✓ добре механичке карактеристике завареног споја, чак и код оних легура које се не заварују конвенционалним поступцима заваривања,
- ✓ безбедан је за здравље, нема токсичних гасова и прскања растопљеног материјала,
- ✓ економичан је, нема трошкова око електрода (додатног материјала) и заштитног гаса, а процес се може извести коришћењем модификованих машина алатки, нпр. алатних глодалица,
- ✓ једноставна аутоматизација процеса заваривања,
- ✓ изванредна поновљивост процеса,
- ✓ могућност заваривања у разним положајима (хоризонтално, вертикално, кружно, изнад, испод, итд.) јер нема растопљеног материјала,
- ✓ могућност заваривања разнородних материјала,
- ✓ минималан утицај на животну средину,
- ✓ минималне деформације и заостали напони,
- ✓ нису потребни сертификовани заваривачи,
- ✓ елиминише потребу за припрему ивица радних материјала пре заваривања (чишћење, брушење) и
- ✓ легуре алуминијума дебљине од 0,5÷50 mm се заварују у једном пролазу, док материјали дебљине од 3÷12 mm од ниско угљеничних челика и легура челика са 12 % хрома могу бити заварене у једном пролазу.

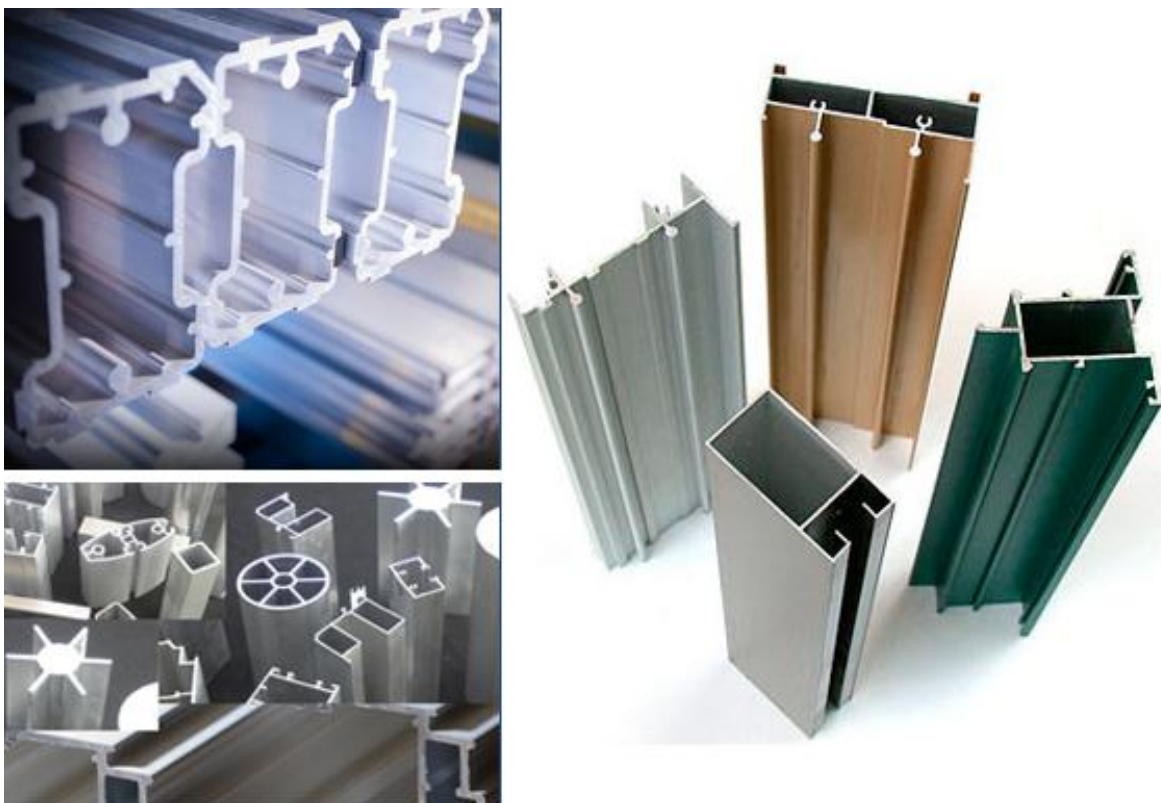
Недостаци поступка су следећи:

- ✓ присуство рупе у металу шава на месту излаза алата из радних материјала,
- ✓ обавезно присуство специјалног стезног помоћног прибора (радни материјали морају бити круто стегнути),
- ✓ велика улагања у специјализовану машинску опрему, алате и помоћне приборе,
- ✓ неопходна подложна плоча за ослањање радних материјала, осим када имамо алат и са друге стране радних материјала,
- ✓ нижа флексибилност процеса при заваривању радних материјала код којих се мења дебљина (захтев за различитом дужином трна алата) и
- ✓ нижа постојаност алата при заваривању материјала високе чврстоће.

### 3. Т-СПОЈЕВИ

#### 3.1. Начини добијања и примена Т-спојева од легуре алуминијума

Различите профиле од легуре алуминијума могуће је добити екструдирањем (Слика 3.1), као и заваривањем ТИГ, МИГ и ЗТМ поступком. На Слици 3.2 дат је пример заваривања сучеоних и Т-спојева добијених поступком заваривања трењем са мешањем.



Слика 3.1 Алуминијумски профили добијени екструдирањем [61-63]



*Слика 3.2 Заваривање палубе брода [64]*

T-спојеви од легура алуминијума користе се у многим гранама индустрије: аутомобилској индустрији, авио-индустрији, бродоградњи, грађевинарству, прехранбеној индустрији, итд. Алуминијум има око три пута мању специфичну тежину у односу на челик, а самим тим и мању масу, мањи су трошкови транспорта, манипулације и монтаже. Алуминијум има добру отпорност на корозију и губи само  $2\div 4 \text{ g/m}^2$  услед њеног дејства за разлику од челика који годишње губи око  $80 \text{ g/m}^2$ . Алуминијум је на ниским температурама много отпорнији на крти лом (ударна жилавост му је већа). Главна улога T-спојева је да повећају крутост конструкција (оребрене плоче). На пример, у грађевинарству T-спојеви се користе за лаке металне конструкције, конструкције средњих кровова, фасадне конструкције, итд. У бродоградњи се користе за конструкције изложене морској води као што су палубе бродова и панели.

Алуминијум је еколошки одржив материјал, има трајну вредност јер се од  $95\div 99\%$  алуминијумског отпада рециклира у развијеним земљама [65-73].

## 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РАД

### 4.1. Опис експерименталног рада

Прво је извршено прилагођавање постојеће машинске опреме захтевима процеса ЗТМ. Геометрија и избор материјала алата за заваривање, помоћног стезног прибора и подложне плоче извршени су на основу теоријских сазнања и стечених практичних искустава.

Рад на експерименталном делу истраживања обухватао је активности везане за овладавање технологијом заваривања трењем са мешањем, добијања квалитетног завареног споја без грешака и његову карактеризацију. Спроведене активности имале су за циљ упознавање са карактеристикама и феноменима процеса, избор оптималних параметара заваривања и анализу варираних процесних параметара на карактеристике завареног Т-споја.

Експериментални рад је подељен у две фазе да би се боље сагледао утицај параметара заваривања и одабир материјала стезног помоћног прибора. Радни материјал у даљем тексту односи се на основни материјал, односно радне плоче.

Прва фаза експерименталног рада је подразумевала заваривање плоча од алуминијумске легуре серије 5xxx AlMg2,5 (ознака по стандарду EN AW 5052-H32) и добијање Т-споја. Т-спој је остварен на три различита начина:

1. заваривањем три плоче при два пролаза алата,
2. заваривањем две плоче при једном пролазу алата и
3. заваривањем три плоче при једном пролазу алата.

Материјал стезног помоћног прибора који је коришћен у првој фази заваривања је угљенични челик S355, означен по EN 10024 стандарду. Након заваривања плоча, извршено је визуелно испитивање спојева, мерење микротврдоће кроз попречни пресек споја нормалан на правац заваривања плоча и испитивање макроструктуре

споја, а након сагледавања и анализе добијених резултата приступило се другој фази експеримента.

У другој фази експерименталног рада Т-спој је остварен заваривањем плоча од алуминијумске легуре серије 5xxx AlMg3 (ознака по стандарду EN AW 5754-H111). У овој фази Т-спој је добијен на четири различита начина:

1. заваривањем две плоче при једном пролазу алата,
2. заваривањем две плоче са два пролаза алата,
3. заваривањем три плоче при једном пролазу алата и
4. заваривањем три плоче са два пролаза алата.

Добијени заварени спојеви су подвргнути визуелном испитивању, измерена је микротврдоћа кроз попречни пресек спојева нормалан на правац заваривања плоча и извршено је макроскопско испитивање структуре споја.

Током друге фазе експерименталног рада материјали елемената специјалног помоћног прибора су били од нерђајућег челика класа 1.4301 и 1.4541 (према стандарду EN 10028-7/2008 [74]).

Експериментална заваривања спроведена су у фабрици ГОША-ФОМ, а алат за заваривање, подложна плоча и стезни помоћни прибор су такође ту израђени. Израда, припрема и испитивања узорака спроведени су у лабораторијама Војнотехничког института у Београду и лабораторији ИСИМ у Темишвару.

## **4.2. Материјали**

### ***4.2.1. Основни материјал***

Радне плоче које је требало заварити биле су од алуминијума серије 5xxx. Ознака 5xxx односи се на легуре алуминијума са магнезијумом (хидроналијуми). Ове легуре се добро полирају и глачају. Од свих термички необрадивих алуминијумских легура карактерише их највећа чврстоћа.

Користе се најчешће за израду резервоара за хемијску индустрију, посуде под притиском, носеће конструкције, за израду вагона и у бродоградњи.

Ове легуре поседују склоност према врућим прелинама, тако да је потребно легирање са манганом који снижава ову појаву. На појаву прелина утичу и нечистоће, као што су Si, Fe и Cu [75].

T-спој је у првој фази експерименталног рада добијен заваривањем два, односно три радна материјала од легуре алуминијума 5052-H32. Ова алуминијумска легура има врло добру отпорност на корозију и зато се нарочито користи у бродоградњи. Такође, користи се и за израду подова фабрика, подова и вертикалних панела у друмским саобраћајним средствима (аутомобили, аутобуси, војна и комунална возила), у железничкој индустрији, за унутрашња и спољашња шеталишта, степениште, мостове, торњеве, украсне панеле за архитектонску и грађевинску употребу, приколице, итд. Има средње високу чврстоћу, као и заморну чврстоћу. Хемијски састав легуре, вредности механичких карактеристика и тврдоће основног материјала и физичка својства легуре дати су *Табелама 4.1, 4.2 и 4.3* респективно.

*Табела 4.1 Хемијски састав легуре 5052-H32 по стандарду EN 573-3:2009 [76-78]*

Садржај легирајућег елемента у %							
Cu	Mn	Mg	Si	Fe	Zn	Ti	Cr
0-0,1	0-0,1	2,2-2,8	0-0,25	0-0,4	0-0,1	0,01	0,15-0,35

*Табела 4.2 Механичке карактеристике и тврдоћа легуре 5052-H32, дебљине од 3-6 mm [79]<sup>1</sup>*

Карактеристика	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A [%]	Тврдоћа HV5
Величина	130	210-260	12	67

<sup>1</sup> према сертификату N°47831 произвођача ALCOA, карактеристике су дате према стандарду EN 485-2, а испитивање затезних карактеристика је извршено према стандарду EN 10002-1



Табела 4.3 Физичка својства легуре 5052-Н32 [79]

Својство	Вредност
Густина $\left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$	$2,68 \cdot 10^3$
Температура топљења $[\text{°C}]$	605 – 650
Коефицијент топлотног ширења $\left[ \frac{1}{\text{°C}} \right]$	$23,8 \cdot 10^{-6}$
Модул еластичности $[\text{GPa}]$	70,5
Топлотна проводљивост $\left[ \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{°C}} \right]$	138
Поасонов коефицијент	0,33

Друга фаза експерименталног рада подразумевала је заваривање две, односно три радне плоче од легуре алуминијума 5754-Н111. Ова легура има одличну отпорност на корозију, посебно у средини где је морска вода и индустријски загађене атмосфере. Има високу чврстоћу и користи се за изградњу подова. Најчешће се примењује за израду подова у бродоградњи и прехранбеној индустрији, производњи оплате возила, рибарске опреме и заварених структура у хемијској и нуклеарној индустрији. Хемијски састав, механичке карактеристике и физичка својства легуре 5754-Н111 дати су Табелама 4.4, 4.5 и 4.6 респективно.

Табела 4.4 Хемијски састав легуре 5754-Н111 по стандарду EN 573-3:2009 [76-78]

Садржај легирајућег елемента у %								
Mg	Mn+Cr	Mn	Si	Fe	Zn	Ti	Cr	Cu
2,6-3,6	0,1-0,6	0-0,5	0-0,4	0-0,4	0-0,2	0,015	0-0,3	0-0,1

Табела 4.5 Механичке карактеристике и тврдоћа легуре 5754-Н111

Карактеристика	R <sub>p0,2</sub> [МПа]	R <sub>m</sub> [МПа]	A [%]	Тврдоћа HV
Величина <sup>2</sup>	80	190-240	18	52
Величина <sup>3</sup>	100	215	25	55

<sup>2</sup> дебљина плоча од 3÷6 [mm], према сертификату N°47831 произвођача ALCOA, карактеристике су дате према стандарду EN 485-2, а испитивање затезних карактеристика према EN 10002-1 стандарду [79]

<sup>3</sup> дебљина плоча од 0,2÷6 [mm] [80]

Табела 4.6 Физичка својства легуре EN AW 5754-Н111 [79]

Својство	Вредност
Густина $\left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$	2,68·10 <sup>3</sup>
Температура топљења [°C]	595 ÷ 645
Коефицијент топлотног ширења $\left[ \frac{1}{\text{°C}} \right]$	23,7·10 <sup>-6</sup>
Модул еластичности [GPa]	70,5
Топлотна проводљивост $\left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{C}} \right]$	132
Поасонов коефицијент	0,33

#### 4.2.2. Материјал алата и стезног помоћног прибора

Специјални алат који је коришћен за заваривање поступком ЗТМ израђен је од алатног челика Н13, који је након машинске израде термички обрађен на тврдоћу од 40-52 HRC. Овај челик се може наћи под називом УТОРМО2. Ознака по стандарду BS EN ISO 4957:2000 и DIN-у је Х40CrMoV5-1. Хемијски састав, механичке особине и физичка својства материјала алата дати су Табелама 4.7, 4.8 и 4.9 респективно [80-85].

Табела 4.7 Хемијски састав челика H13, садржај легирајућих елемената у %

Садржај легирајућег елемента у %							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
0,4	1	0,38	≤0.03	≤0.02	5,25	1,4	1

H13 је један од најпопуларнијих и вишенаменских алатних челика и користи се за рад на повишеним температурама. Има веома добру комбинацију жилавости, топлотне отпорности и отпорности на хабање. Одлично подноси динамичка и ударна оптерећења. Тврдоћа му се креће у распону од 190÷235 НВ.

Табела 4.8 Механичке карактеристике и тврдоћа челика H13

Карактеристика	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	τ [GPa]	A [%]	Тврдоћа HRC
Величина	1650	1990	81	25	55

Табела 4.9 Физичка својства алатног челика H13 (X40CrMoV5-1)

Својство	Вредност
Густина $\left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$	7,86·10 <sup>3</sup>
Модул еластичности [GPa]	210
Топлотна проводљивост $\left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}} \right]$	25
Поасонов коефицијент	0,33

У експерименту коришћена су два материјала подложних плоча, односно елемената стезног помоћног прибора. Током прве фазе експерименталног рада материјал елемената стезног помоћног прибора био је угљенични челик класе S355

по EN10025-2004 стандарду. Његове основне механичке карактеристике су  $R_{p0,2}=355$  МПа и  $R_m=470\div 630$  МПа, према ASTM A572 GR50 [86].

Током друге фазе експерименталног рада две главне стезне плоче биле су од нерђајућег челика класе 1.4301. Његове основне механичке карактеристике су  $R_{p0,2}=280\div 300$  МПа и  $R_m=580\div 600$  МПа према стандарду EN 10028-7/2008 [74]. Четири елемента стезног прибора такође су била од нерђајућег челика али класе 1.4541. Његове основне механичке карактеристике су  $R_{p0,2}=250\div 270$  Па и  $R_m=570\div 590$  МПа према стандарду EN 10088-7/2008 [74]. Нерђајући челик познат по томе да мање топлоте проводи од угљеничног челика одабран је за израду подложних плоча, као и целог стезног помоћног прибора коришћеног у другој фази експерименталног рада (Слика 4.6). То је урађено са намером да се током заваривања одвођење генерисане топлоте из зоне заваривања сведе на најмању меру, односно да би губици топлоте били што мањи, а термичка ефикасност процеса била већа.

### **4.3. Опрема за заваривање**

#### **4.3.1. Машина за заваривање**

Конструкција машине мора да обезбеди могућност адекватног и поузданог стезања плоча које се заварују, довољну притисну силу на плоче, регулацију броја обртаја и контроле кретања алата дуж линије спајања плоча које се заварују, итд. Машина која је коришћена за експериментална заваривања је компјутерско нумерички управљана алатна глодалица, тип Првомајска АГ 400-МИНА са снагом електромотора за погонско кретање електромотора главног вретена од 12 kW, излазним бројем обртаја од 2500 o/min, максималним посмаком 4500 mm/min и радним простором  $x=600$  mm,  $y=400$  mm и  $z=300$  mm. Заваривање је извршено у фабрици ГОША ФОМ у Смедеревској Паланци, а на Слици 4.1 је дата фотографија машине.



*Слика 4.1 Машина на којој је извршено заваривање, тип Првомајска АГ 400-МИНА*

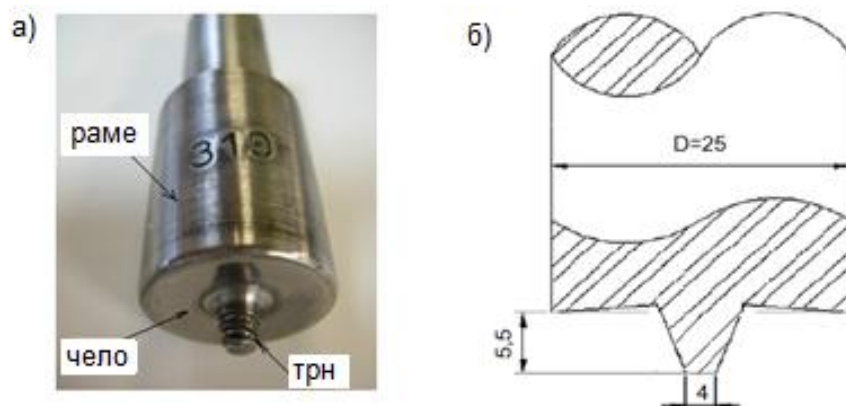
Прилагођавање глодалице захтевима процеса заваривања трењем са мешањем није било потребно. Једино је морало да се уради конструисање и производња неопходног специјалног стезног помоћног прибора (Слика 4.2). За заваривање појединих проби мењан је угао нагиба алата (вариране су четири вредности од  $0^\circ$ ,  $0.5^\circ$ ,  $1^\circ$  и  $1.5^\circ$ ). Током процеса заваривања није мерена притисна сила, односно сила у вертикалном правцу дуж  $z$ -осе.



*Слика 4.2 Фотографија позиције алата, стезног помоћног прибора и радних плоча током процеса заваривања*

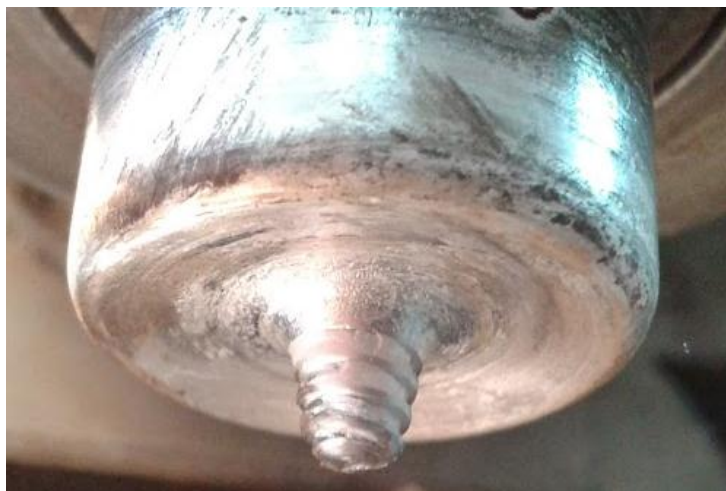
#### **4.3.2. Алат и стезни помоћни прибор**

У тачки рада 4.2.2 дате су основне карактеристике материјала алата коришћеног за заваривање. На *Слици 4.3* дати су изглед алата са основним елементима пре процеса заваривања и део радионичког цртежа алата са основним димензијама.



Слика 4.3 а) Фотографија алата са основним елементима и б) део радионичког цртежа алата са основним димензијама датим у [mm]

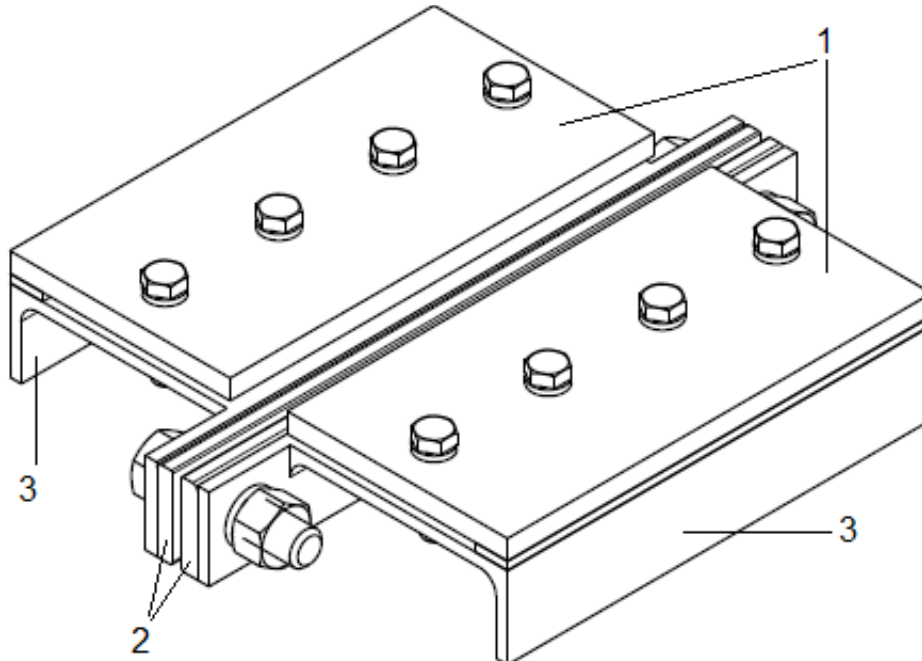
Рапе алата је цилиндричног облика. Трн алата је конусног облика са углом конуса од  $20^\circ$ . Трна на себи има урезану десну облу завојницу. Угао нагиба завојнице је  $5^\circ$ . Завојница подстиче боље мешање и секундарно течење размекшалог материјала радних плоча. Чело алата је конкавног облика, са резервоаром, глатке површине. На Слици 4.4 дат је изглед алата на завршетку заваривања свих проба [87].



Слика 4.4 Фотографија алата на завршетку процеса заваривања

Експериментално заваривање је подељено у две фазе и све пробе су заварене истим алатом. Међутим, разликовала се конструкција и материјал стезног помоћног

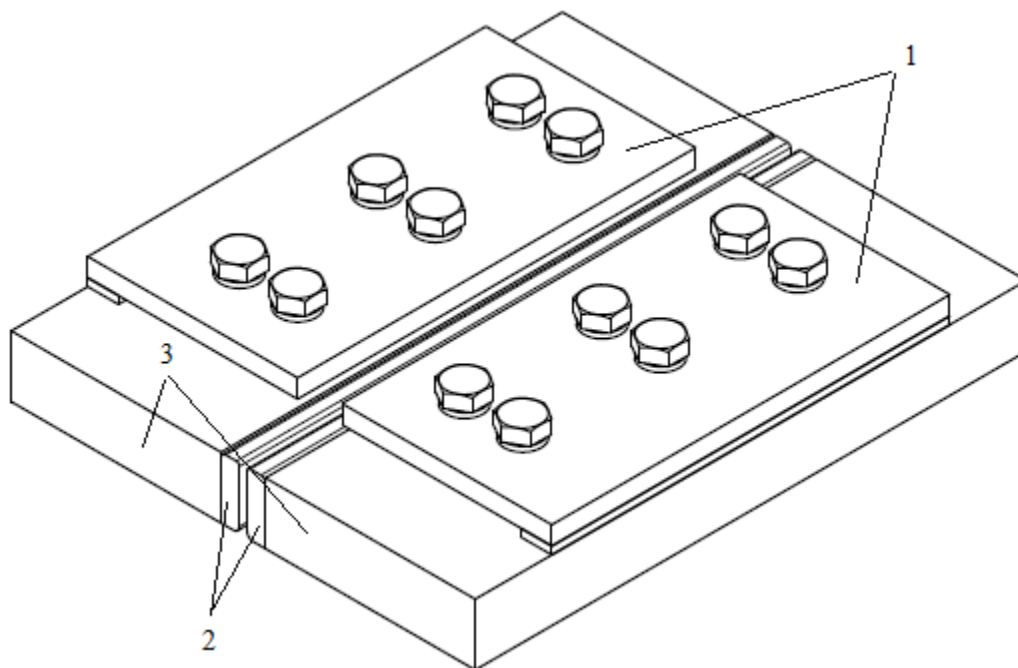
прибора у првој и другој фази. Током прве фазе експерименталног рада материјал елемената стезног помоћног прибора, односно главних стезних плоча, подметача, плоча са радијусима и носача био је угљенични челик класе S355. Конструкција стезног помоћног прибора коришћеног у првој фази експерименталног рада, односно при заваривању плоча од легуре алуминијума 5052-Н32 у Т-спој дата је на *Слици 4.5*.



*Слика 4.5 Конструкција стезног помоћног прибора коришћеног при заваривању Т-спојева од алуминијумске легуре 5052-Н32, 1-главне стезне плоче, 2-плоче са радијусима, 3- носачи*

Током друге фазе експерименталног рада две главне стезне плоче била су од нерђајућег челика класе 1.4301 дебљине 12 mm. Остала четири елемента стезног прибора такође су била од нерђајућег челика класе 1.4541 и то, две плоче са радијусима дебљине 12 mm и два носача дебљине 40 mm. Конструкција стезног помоћног прибора коришћеног у другој фази експерименталног рада, односно при заваривању плоча од легуре алуминијума 5754-Н111 у Т-спој дата је на *Слици 4.6*.

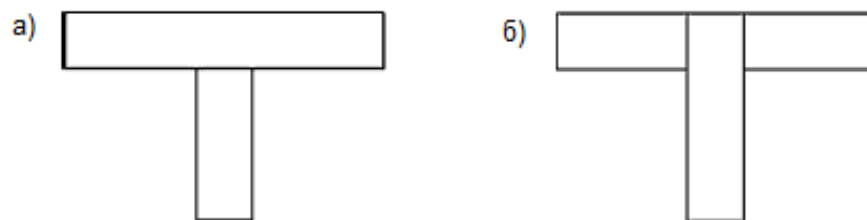




*Слика 4.6 Конструкција стезног помоћног прибора коришћеног при заваривању Т-спојева од алуминијумске легуре 5754-Н111, 1-главне стезне плоче, 2-плоче са радијусима, 3- носачи*

#### **4.4. Заваривање**

Пре почетка заваривања радне плоче су међусобно тако постављене да формирају „Т“ облик и наслоњене су на подложне плоче. Тако постављене, круто су стегнуте за помични радни сто глодалице. Шема међусобног положаја плоча пре заваривања приказана је на *Слици 4.7*. У зависности од фазе експерименталног рада, заваривани су плочасти узорци димензија 30x175x5 mm у првој, односно 32x200x5 mm и 65x200x5 mm у другој фази. При томе је дужина оствареног завареног споја код сваке појединачне пробе износила око 155 mm, односно 170 mm, респективно по фазама.



Слика 4.7 Шематски приказ међусобног положаја плоча: а) две и б) три плоче

Укупно је заварено 16 проба, 7 у првој и 9 проба у другој фази експерименталног рада. Варирани параметри заваривања кретали су се у наведеном опсегу у зависности од фазе експерименталног рада, и то:

*прва фаза експерименталног рада:*

$$\text{брзина заваривања } v_{zav} = 24 \div 73 \frac{\text{mm}}{\text{min}},$$

$$\text{брзина обртања алата } v_{rot} = 600 \div 950 \frac{\text{obr}}{\text{min}},$$

дубина урањања алата у радни материјал  $a = 5,3 \div 5,9 \text{mm}$  и

угао нагиба алата  $\alpha = 0 \div 1,5^\circ$ ,

корак заваривања, односно однос брзине обртања алата и брзине заваривања је

$$\text{износио } \frac{v_{rot}}{v_{zav}} = 8,20 \div 39,58 \frac{\text{obr}}{\text{mm}}.$$

*друга фаза експерименталног рада:*

$$\text{брзина заваривања } v_{zav} = 27 \div 60 \frac{\text{mm}}{\text{min}},$$

дубина урањања алата у радни материјал  $a = 5,6 \div 5,8 \text{mm}$ ,

угао нагиба алата  $\alpha = 1^\circ$  и брзина обртања алата  $v_{rot} = 950 \frac{\text{obr}}{\text{min}}$  нису варирани и

$$\text{корак заваривања кретао се } \frac{v_{rot}}{v_{zav}} = 15,83 \div 35,19 \frac{\text{obr}}{\text{mm}}.$$

Технолошки процес заваривања подразумевао је:

1. избор алата, специјалног стезног помоћног прибора и машине за заваривање,

2. постављање алата у главно вретено и подешавање угла нагиба алата,
3. постављање стезног прибора на сто машине, позиционирање и стезање подложних и радних плоча у стезни прибор,
4. задавање брзине обртања алата,
5. преднамештање алата на машини (дужинска корекција алата),
6. уз задату брзину продирања, подизање радног стола до контакта са алатом,
7. продирање алата у радну/радне плоче до тренутка додира горње површине радне/радних плоча са челом алата, уз задату брзину продирања,
8. подизање радног стола машине, односно задавање жељене дубине урањања алата у материјал радних плоча,
9. задржавање алата који ротира у тој позицији пола минута,
10. задавање брзине заваривања (транслаторно кретање стола машине),
11. прекид транслаторног кретања,
12. вертикално спуштање стола машине (извлачење алата из завареног споја),
13. заустављање обртног кретања алата и
14. вађење завареног споја из стезног прибора.

#### **4.4.1. Заваривање легуре 5052-Н32**

У првој фази експерименталног рада заваривани су плочасти узорци димензија 30x175x5 mm од алуминијумске легуре 5052-Н32 на три различита начина, односно заваривање је рађено у три серије. Материјал елемената стезног помоћног прибора био је угљенични челик класе S355. Вариран радијус подложних плоча износио је  $r = 2 \div 3 \text{ mm}$ .

Прва серија заваривања је подразумевала добијање Т-споја заваривањем три плоче при два пролаза алата. Параметри заваривања при сваком пролазу алата дати су Табелом 4.10. Код проба 1 и 2, оса алата се поклапала са линијама спајања радних плоча, док је код пробе 3 оса алата била померена за по 1,5mm од уздужне осе споја (осе која се поклапа са правцем заваривања) ка линијама спајања плоча.

Табела 4.10 Параметри прве серије заваривања легуре 5052-Н32

Редни број пробе		$v_{rot} \left[ \frac{o}{min} \right]$	$v_{zav} \left[ \frac{mm}{min} \right]$	$\alpha$ [°]	Дубина урањања алата $a$ [mm]	Полупречник угаоног шави $r$ [mm]
1	1.1 <sup>1</sup>	600	73	1,5	5,3	3
	1.2	750				
2	1.3 <sup>1</sup>	950	73	0,5	5,4	3
	1.4		66		5,45	
3	1.5 <sup>1</sup>	950	27	1	5,5	2
	1.6		24			

<sup>1</sup> први пролаз алата био је на страни напредовања метала шави

Друга серија се одосила на добијање Т-споја заваривањем три плоче једним пролазом алата са задатим параметрима (Табела 4.11), док су у трећој серији добијени спојеви заваривањем две плоче једним пролазом алата (Табела 4.12).

Табела 4.11 Параметри друге серије заваривања легуре 5052-Н32

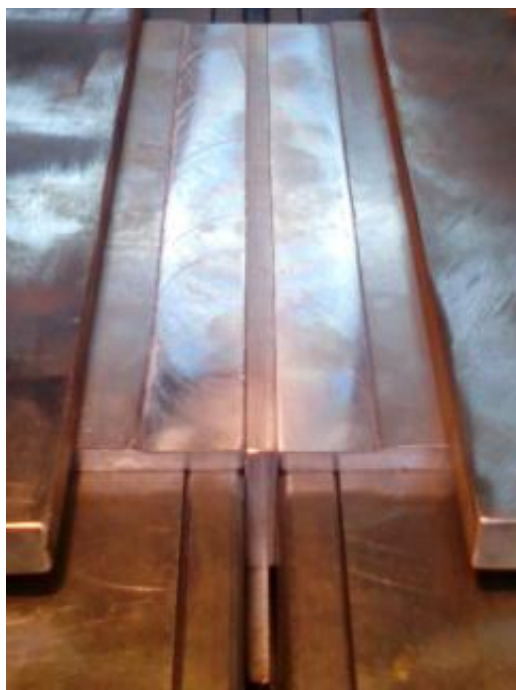
Редни број пробе		$v_{rot} \left[ \frac{o}{min} \right]$	$v_{zav} \left[ \frac{mm}{min} \right]$	$\alpha$ [°]	Дубина урањања алата $a$ [mm]	Полупречник угаоног шави $r$ [mm]
4	1.7	950	24	1	5,8	2

Табела 4.12 Параметри треће серије заваривања легуре 5052-Н32

Редни број пробе		$v_{rot} \left[ \frac{o}{min} \right]$	$v_{zav} \left[ \frac{mm}{min} \right]$	$\alpha$ [°]	Дубина урањања алата $a$ [mm]	Полупречник угаоног шави $r$ [mm]
5	2.1	950	66	0	5,8	3
6	2.2	950	30	0,5	5,9	2
7	2.3	950	27	1	5,8	2

#### 4.4.2. Заваривање легуре 5754-H111

У другој фази експеримента заваривани су плочасти узорци димензија 32x200x5 mm и 65x200x5 mm од алуминијумске легуре 5754-H111 у четири различите серије. Дебљина радних плоча прво је износила 6 mm. Стањење тих плоча извршено је на димензију од 5 mm због димензија трна алата (Слика 4.8).



Слика 4.8 Приказ стегнутих истањених радних плоча на димензију од 5 mm

Материјал елемената стезног помоћног прибора био је нерђајући челик класа 1.4301 и 1.4541. Дужина шаву у све три серије заваривања је износила око 170 mm. Коришћени параметри за заваривање сваке од четири серије плочастих материјала од алуминијумске легуре 5754-H111 респективно су дати у Табелама 4.13-4.16.

Прва серија заваривања је подразумевала добијање Т-споја заваривањем две плоче једним пролазом алата. Варирани полупречници подложних плоча су износили 2 mm и 4 mm. Проба 3.2 је карактеристичне по томе што је између радних плоча стављена бакарна трака дебљине 0,1mm и дужине 40mm .

Табела 4.13 Параметри прве серије заваривања легуре 5754-Н111

Редни број пробе	$v_{rot} \left[ \frac{o}{min} \right]$	$v_{zav} \left[ \frac{mm}{min} \right]$	$\alpha$ [°]	Дубина урањања алата $a$ [mm]	Полупречник угаоног шава $r$ [mm]
3.1	950	27	1	5,8	2
3.2	950	27	1	5,8	4

У другој серији заваривања добијени су Т-спојеви од две плоче, са два пролаза алата. Проба 3.3 је карактеристичне по томе што је између радних плоча стављена бакарна трака дебљине 0,1mm и дужине 40mm. Код проба 3.3 и 3.4 заваривање је извршено тако да је оса алата била померена за по 1,5mm лево и десно од уздужне осе споја.

Табела 4.14 Параметри друге серије заваривања легуре 5754-Н111

Редни број пробе	$v_{rot} \left[ \frac{o}{min} \right]$	$v_{zav} \left[ \frac{mm}{min} \right]$	$\alpha$ [°]	Дубина урањања алата $a$ [mm]	Полупречник угаоног шава $r$ [mm]	
3.3	I пролаз <sup>4</sup>	950	27	1	5,7	4
	II пролаз					
3.4	I пролаз <sup>5</sup>	959	27	1	5,6	4
	II пролаз					

<sup>4</sup> први пролаз алата је био на страни напредовања метала шава

<sup>5</sup> први пролаз алата је био на повратној страни метала шава

Трећа серија се односила на добијање Т-спојева заваривањем три плоче при једном пролазу алата. Оса алата се поклапала са уздужном осом споја. У четвртој серији су се заваривале три плоче при два пролаза алата.

Табела 4.15 Параметри треће серије заваривања легуре 5754-Н111

Редни број пробе	$v_{rot} \left[ \frac{o}{min} \right]$	$v_{zav} \left[ \frac{mm}{min} \right]$	$\alpha$ [°]	Дубина урањања алата $a$ [mm]	Полупречник угаоног шава $r$ [mm]
4.3	950	60	1	5,6	4
4.4	959	45	1	5,65	4

Табела 4.16 Параметри четврте серије заваривања легуре 5754-Н111

Редни број пробе	$v_{rot} \left[ \frac{o}{min} \right]$	$v_{zav} \left[ \frac{mm}{min} \right]$	$\alpha$ [°]	Дубина урањања алата $a$ [mm]	Полупречник угаоног шава $r$ [mm]	
4.1	I <sup>6</sup>	950	27	1	5,8	4
	II					
4.2	I <sup>7</sup>	950	27	1	5,6	4
	II					
4.5	I <sup>8</sup>	950	30	1	5,7	4
	II					

<sup>6</sup> први пролаз алата је био на страни напредовања метала шава

<sup>7</sup> први пролаз алата је био на повратној страни метала шава

<sup>8</sup> први пролаз алата је био на страни напредовања метала шава

При заваривању пробе 4.1 оса алата се поклапала при сваком проласку са линијама спајања радних плоча, док је при заваривању проба 4.2 и 4.5 оса алата била померена за по 1mm од линије спајања радних плоча ка уздужној оси споја.

#### 4.5. Испитивања заварених спојева

Испитивањем без разарања и испитивањем са разарањем изведена су испитивања заварених спојева. Испитивање без разарања односило се на визуелни контролу завареног споја, а испитивање са разарањем обухватало је испитивање

микротврдоће и макроструктурна испитивања. Сва испитивања су спроведена у складу са важећим стандардима. Испитивању са разарањем подвргнути су они спојеви код којих није уочено присуство грешака у споју испитивањем без разарања. Сви заварени спојеви визуелно су контролисани, а два споја из прве фазе експерименталног рада и три споја из друге фазе подвргнути су макроскопским испитивањем (утврђене су структурне зоне споја) и одређена им је расподела микротврдоће. Карактеризација добијених заварених спојева спроведена је у 3 корака према методологији испитивања датој у *Табели 4.17*.

*Табела 4.17 Методологија испитивања заварених спојева*

Испитивања без разарања	Корак 1	Визуелни преглед
Испитивања са разарањем	Корак 2	Расподела тврдоће
	Корак 3	Развој макроструктуре

#### **4.5.1. Испитивања без разарања**

Заварени спојеви су након израде прво подвргнути визуелном прегледу у циљу откривања видљивих грешака. Испитивање је спроведено према стандарду SRPS EN-970 [88].

#### **4.5.2. Одређивање микротврдоће**

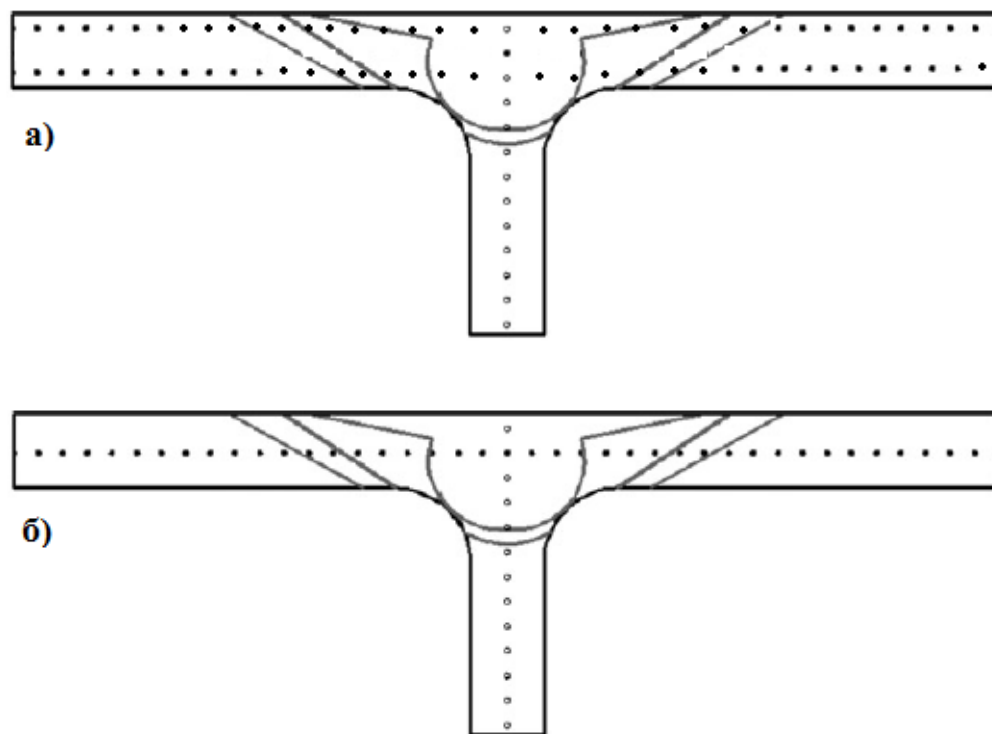
Расподела микротврдоће одређивана је на узорцима за макроструктурну анализу према одредбама стандарда SRPS С.А4.040 [89] SRPS С.Т3.051 [90]. Коришћењем узорака на којима је развијена макроструктура омогућено је прецизно позиционирање и контрола места мерења (основни материјал, зона утицаја топлоте, зона термо-механичког утицаја и грумен). Методом Vickers HV1 мерена је микротврдоћа на оптичком стерео микроскопу са софтвером за аквизицију слике и обраду података. Расподела микротврдоће мерена је кроз попречни пресек завареног споја нормалан на правац заваривања, у хоризонталном и вертикалном правцу.



Растојање између отисака износило је по  $0,5[\text{mm}]$  код заварених спојева добијених у првој фази, и по  $1[\text{mm}]$  код спојева добијених у другој фази експерименталног рада.

Микротврдоћа кроз спој од легуре 5052-Н32 у хоризонталном правцу мерена је у две зоне, тако да у свакој зони буду обухваћени ОМ, ЗУТ, ЗТМУ и грумен (Слика 4.9 а). Прва зона налази се близу лица метала шава, тачније на растојању од  $1[\text{mm}]$  од лица ка кореној страни метала шава. Друга зона се налази близу корене стране метала шава, односно на растојању од  $1[\text{mm}]$  од корена ка лицу метала шава. Тврдоћа у вертикалном правцу мерена је од лица ка кореној страни метала шава, тачно по оси симетрије Т-споја.

Мерење микротврдоће кроз спој од легуре 5754-Н111 извршено је у хоризонталном и вертикалном правцу на половини дебљине плоча (Слика 4.9 б).



Слика 4.9 Шематски приказ места мерења микротврдоће у хоризонталном и вертикалном правцу а) код легуре 5052-Н32 и б) код легуре 5754-Н111

#### 4.5.3. Макроструктурна испитивања

Макроструктурна анализа попречног пресека завареног споја нормалног на правац заваривања спроведени су на узорцима који садрже све карактеристичне делове споја (ОМ, ЗУТ, ЗТМУ и грумен). Анализа је урађена по стандардима SRPS EN ISO 17639:2014, SRPS EN ISO 25239-5 и процедури PS-LIEA-03-02. Макроструктурна анализа урађена је применом светлосне микроскопије на стерео металографском микроскопу *Leitz* са интегрисаном камером *Leica DFC 295*, рачунарским системом и софтвером за аквизицију података и обраду слике (у лабораторији ВТИ-а у Београду) и на оптичком микроскопу *Carl Zeiss Jena* у лабораторији ИСИМ у Темишвару. Испитивања су спроведена у циљу утврђивања постојања структурних зона споја и анализе утицаја параметара заваривања и стезног прибора на њихов положај и облик.

Припрема узорака за макроструктурно испитивање састојала се од машинске обраде, брушења и нагризања површина узорака одговарајућим реагенсом. Узорак је прво исечен из Т-споја, а затим се машински поравњавају све његове површине. Површина попречног пресека нормална на правац заваривања бруси се брусним папирима различите финоће. Да би се боље виделе структурне зоне споја, извршено је нагризање те површине потапањем у *Tuckers* реагенс (45ml HCl + 15ml HNO<sub>3</sub> + 15ml HF + 25ml H<sub>2</sub>O) до 10 секунди, а потом се нагризана површина испирала водом и алкохолом и сушила се у струји топлог ваздуха.

## 5. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНОГ ИСТРАЖИВАЊА

### 5.1. Визуелна контрола

Визуелна контрола лица и корене стране метала шави урађена је код свих заварених спојева. Такође, током извођења експеримента пређене су све фазе заваривања. Процес заваривања праћен је појавом тунела, присуством грешке типа непровареног корена метала шави, појавом шпона при пенетрацији алата, истискивање размекшалога материјала под дејством рамена алата, лепљењем завареног споја за подложне плоче, раздвајања плоча, итд. Након правилног стезања радних плоча (Слика 5.1) следи фаза продирања (урањања) трна алата у материјал истих (Слика 5.2).



Слика 5.1 Стегнуте плоче на радни сто машине, проба 4.1



*Слика 5.2 Продирање трна алата у материјал радних плоча, проба 3.1*

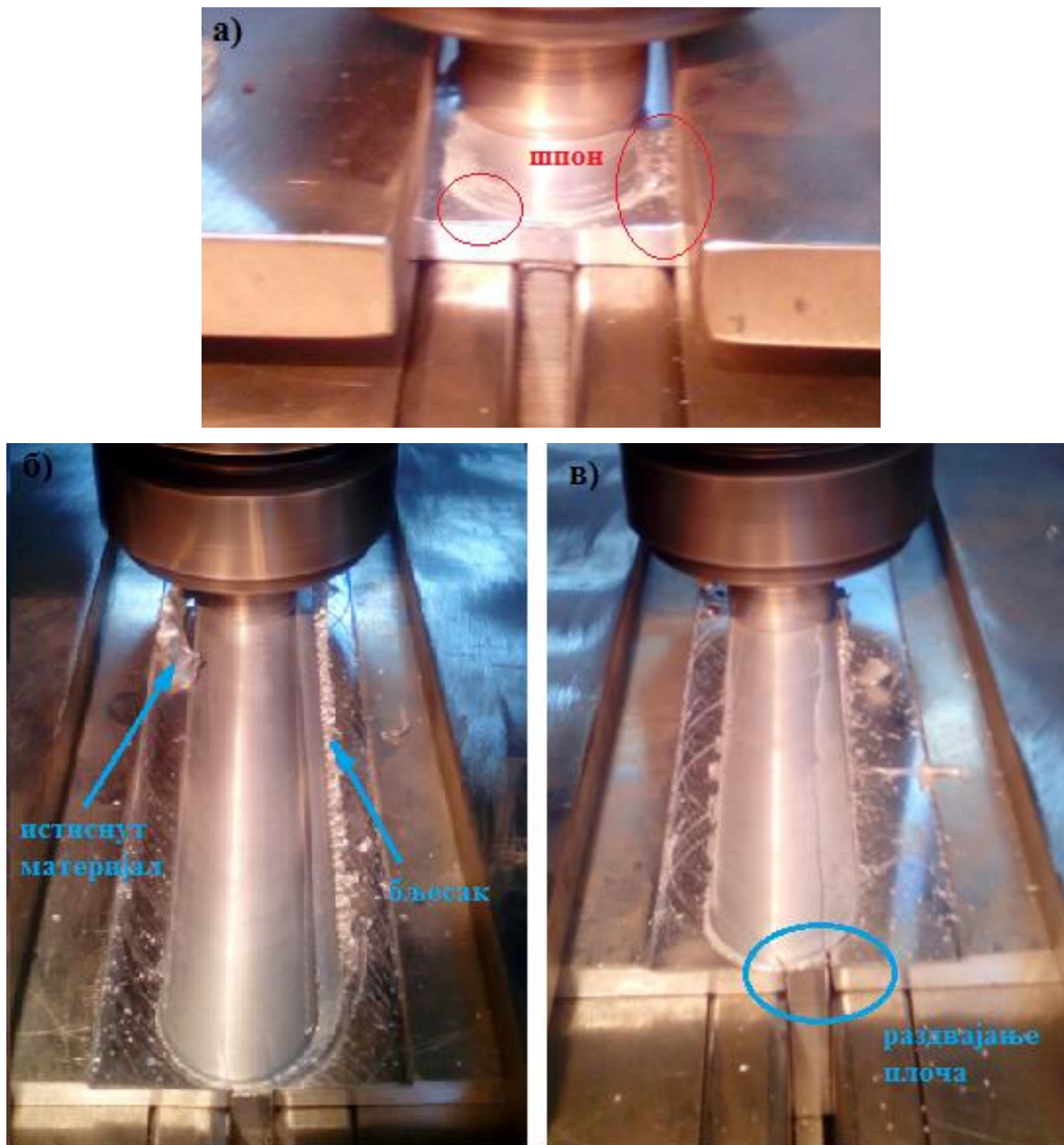
*Слика 5.3* приказује прекинуту прву фазу заваривања да би се видео отисак трна алата и почетак секундарног течења омекшалог материјала (поглед одозго и бочно).



*Слика 5.3 Изглед отиска трна алата и почетак секундарног течења материјала*

Фаза заваривања, како је већ споменуто, праћена је при заваривању сваке пробе, а на *Слици 5.4* дате су фотографије ове фазе код појединих проба. На *Слици 5.4 а)* види се почетак друге фазе заваривања и примећује се ситан шпон разбацан по лицу споја услед пенетрације алата (заокружен црвеним елипсама), а на *Слици 5.4 б)* дата је глатка површина лица, са малим бљеском материјала на повратној страни метала шаву. Бљесак је појава која се правилним избором алата може минимизирати, али не и елиминисати. Такође, уочава се истискивање омекшалог материјала због дејства чела алата. Код неколико проби био је присутан проблем раздвајања плоча при заваривању три плоче, код легуре 5052-Н32 и код легуре 5754-Н111, као што се види

на Сlici 5.4 в). Поче се раздвајају услед великих сила при заваривању и недовољног стежања.



Слика 5.4 а) Изглед шпона при пенетрацији алата код пробе 3.1, б) Глатка површина лица метала шави, изражен бљесак материјала на повратној страни споја при првом пролазу алата и истиснут материјал при другом пролазу алата код пробе 4.2, в) Раздвајање плоча при првом пролазу алата при заваривању пробе 4.1

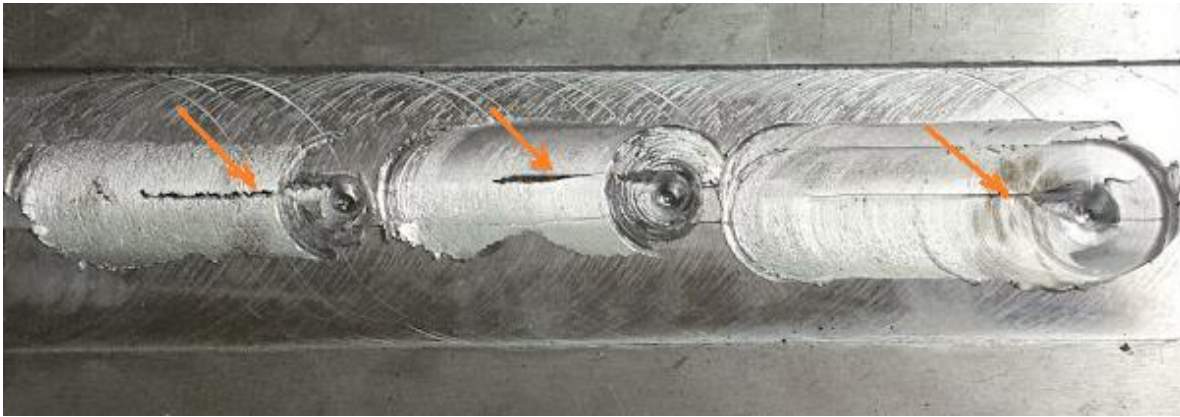
Наведени процесни проблеми јављали су се као последица неодговарајућих параметара заваривања, односно брзине обртања алата, брзине заваривања, угла нагиба алата, притисне силе, неадекватне геометрије и дубине пенетрације алата и недовољног стезања плоча.

Излазне рупе при првом и другом пролазу алата код заваривања 3 плоче приказане су на *Слици 5.5*.

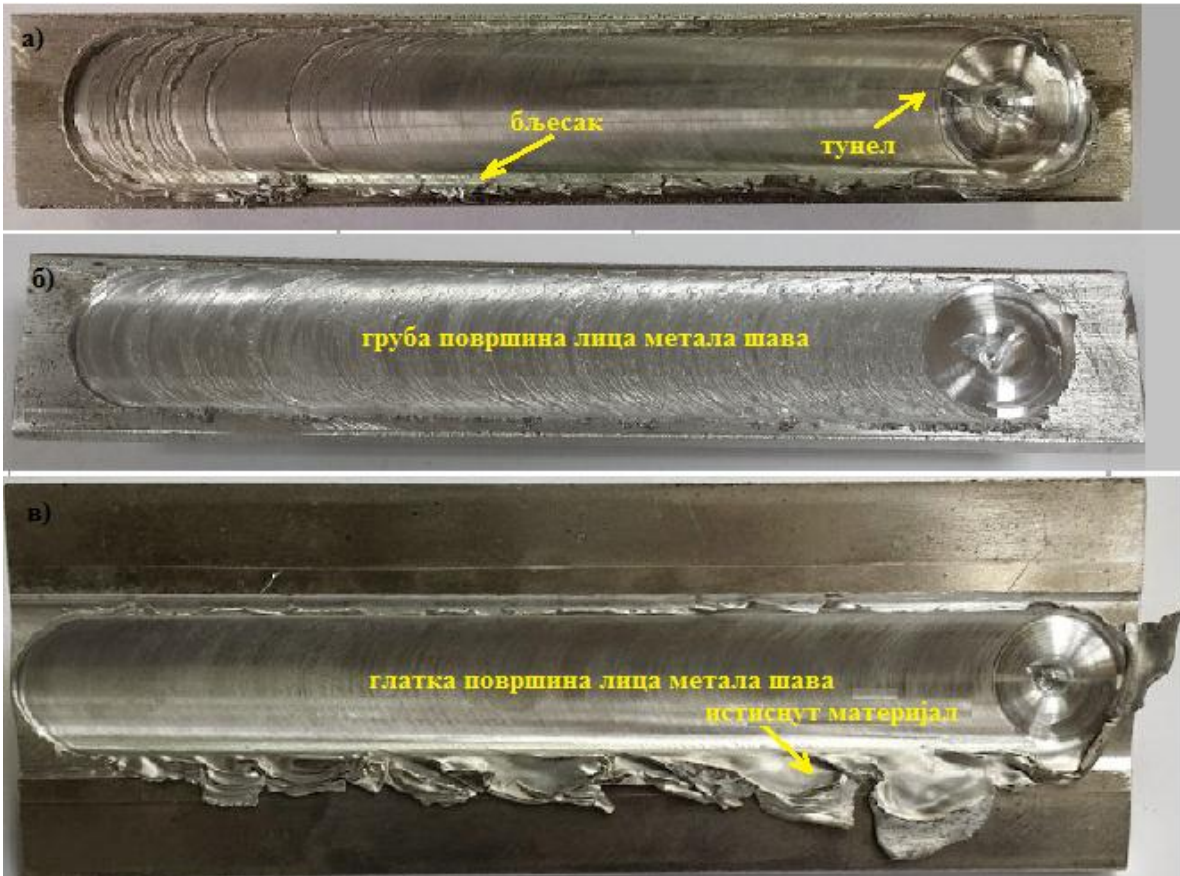


*Слика 5.5 Изглед излазних рупа код пробе 3.4*

Присуство отвореног тунела на страни напредовања (*Слика 5.6*) последица је неодговарајуће комбинације параметара заваривања. Изглед, односно храпавост површине лица споја и количина истиснутог материјала око рамена алата такође веома зависе од примењених параметара заваривања (*Слика 5.7*).



Слика 5.6 Отворени тунели (стрелицом означени) и хрпава површина лица споја, код проба 4.3, 4.4, 4.5, посматрано са леве ка десној страни



Слика 5.7 Визуелна контрола лица завареног споја: а) проба 6, б) проба 7 и в) проба

Визуелном контролом корене стране метала шави Т-спојева није примећена грешка типа непроварени корен. Изглед корене стране споја дат је на *Слици 5.8*, Т-спој је добијен заваривањем две плоче, а полупречници подложних плоча су били  $r = 4\text{mm}$ . Посматрањем корене стране споја јасно се препознаје зона заваривања испод чела алата.



*Слика 5.8 Корена страна метала шави пробе 3.3*

Код појединих спојева добијених заваривањем 3 плоче, примећено је искривљење једне, или обе горње плоче. При заваривању три плоче димензија  $32 \times 200 \times 5\text{ mm}$  примећено је искривљење горње десне плоче на горе, у односу на хоризонтални положај горњих плоча (*Слика 5.9 а*). Треба нагласити да су силе заваривања велике и усед њиховог дејства и неадекватног стезања радних плоча долази до њиховог кривљења. Витоперење горњих радних плоча (*Слика 5.9 б*) је било присутно код појединих проба у другој фази експерименталног рада, при заваривању горњих плоча димензија  $65 \times 200 \times 5\text{ mm}$ . Искривљење, односно витоперење је у овом случају последица неадекватног стезања плоча, великих сила приликом заваривања и високе температуре процеса.



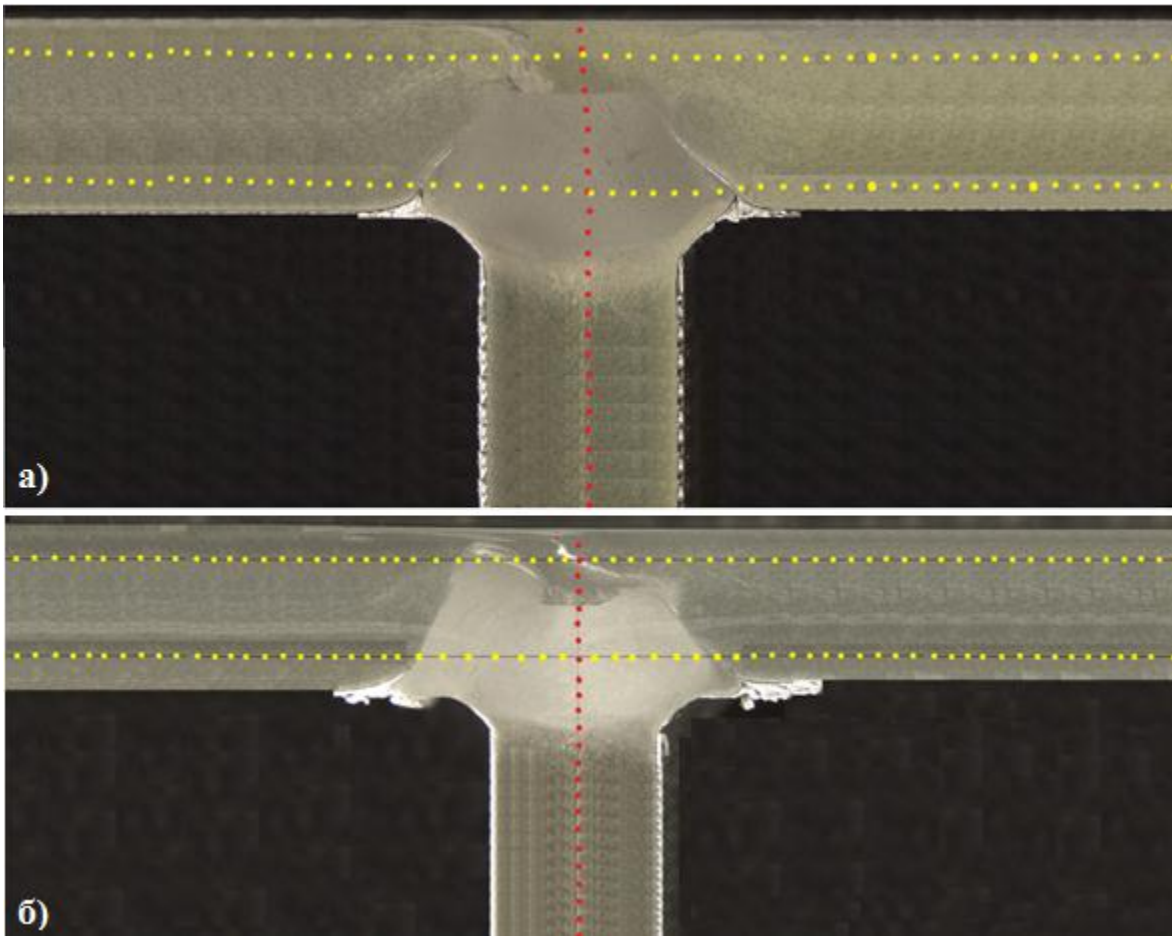


Слика 5.9 Примери искривљења споја код: а) легуре 5052-Н32, проба 3 и б) легуре 5753-Н111, проба 4.1

## 5.2. Микротврдоћа

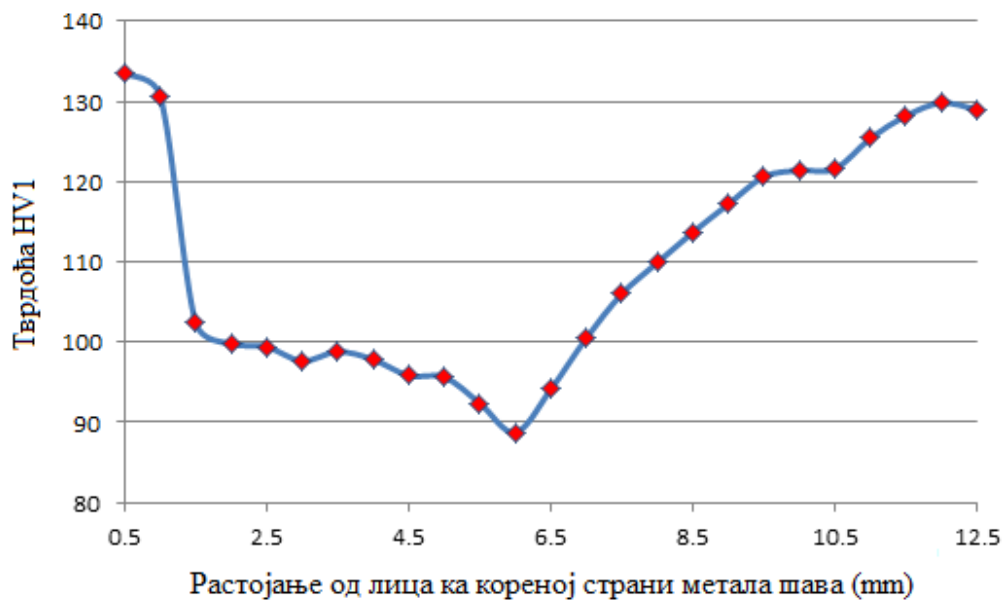
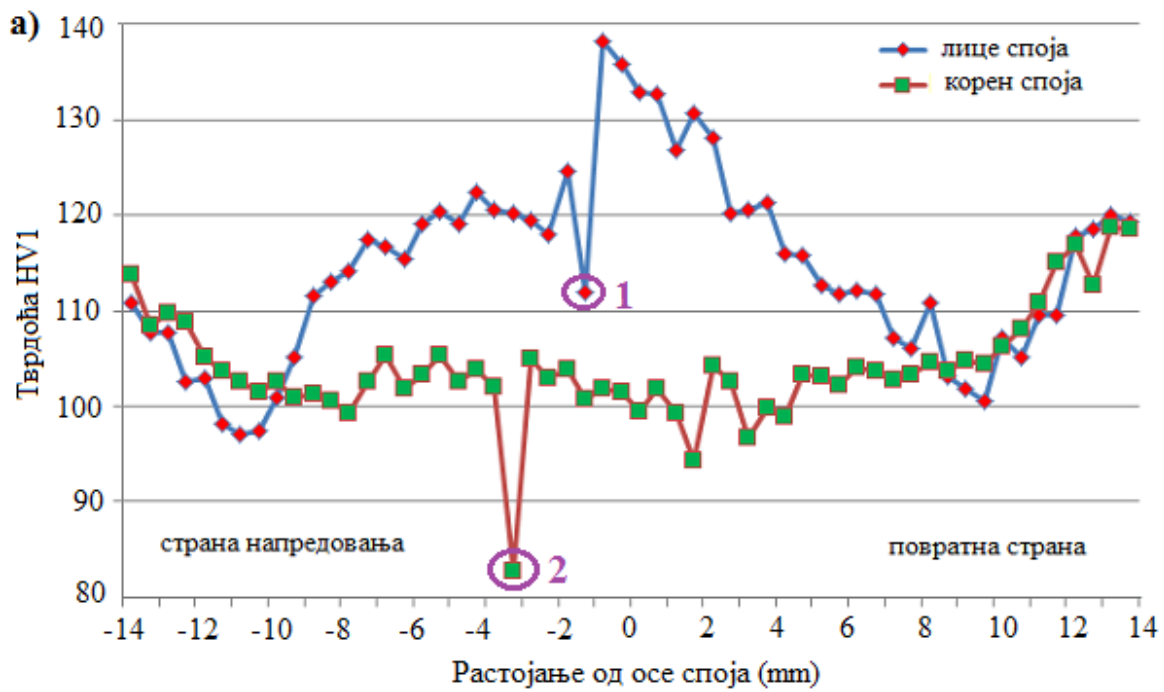
### 5.2.1. Расподела микротврдоће кроз спој легуре 5052-Н32

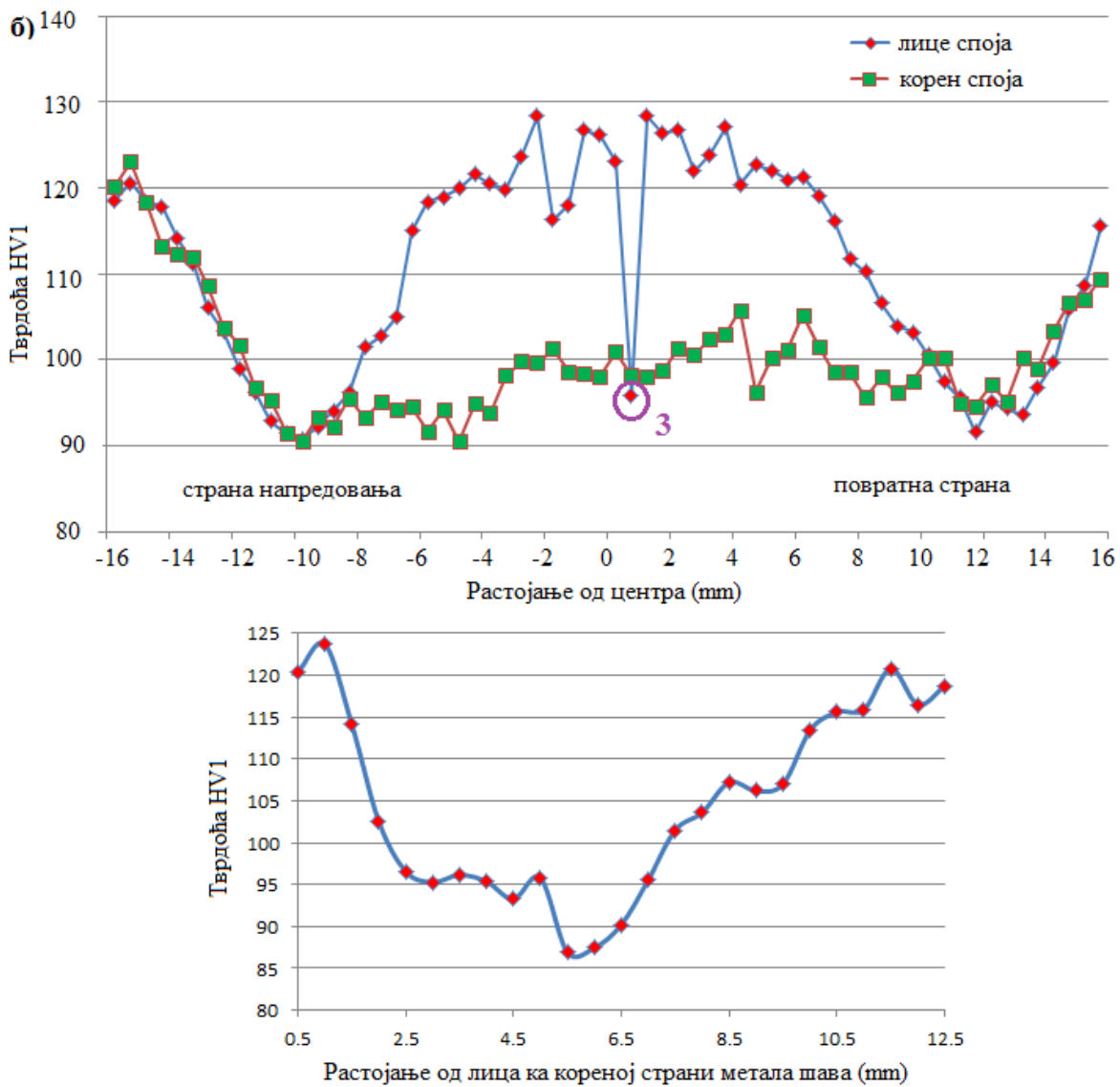
Испитивања микротврдоће заварених спојева од легуре 5052-Н32 урађено је на спојевима код којих при визуелном испитивању нису уочене грешке. Микротврдоћа је испитивана кроз попречни пресек споја нормалан на правац заваривања плоча у два правца: хоризонталном (близу лица и корене стране метала шави) и вертикалном (од лица ка кореној страни метала шави дуж попречне осе симетрије споја). Код пробе 6 назирала се грешка типа тунела на лицу споја, али није могло са сигурношћу да се потврди њено присуство. Места мерења микротврдоће пробе 6 и пробе 3 приказана су на макроскопским снимцима, *Слика 5.10 а)-б)*.



*Слика 5.10. Места мерења микротврдоће а) пробе 6 и б) пробе 3*

Расподела микротврдоће мерене у хоризонталном и вертикалном правцу код пробе 6 приказана је на Слици 5.11 а), док је на Слици 5.11 б) приказана расподела тврдоће код пробе 3.





Слика 5.11 Расподела микротврдоће код проба: а) б и б) 3

Расподела микротврдоће кроз попречни пресек споја мерене у хоризонталном правцу генерално је симетрична у односу на осу која је померена за око 1 mm од централне осе споја ка повратној страни метала шва.

Микротврдоћа у области грумена достиже вредност тврдоће основног материјала, што је и очекивано услед рекристализације и уситњавања зрна структуре.

Нагли падови микротврдоће присутни код отисака у области грумена примећени су код обе пробе. На Слици 5.11 отисци код којих је примећен значајан

пад микротврдоће су обележени тачкама 1, 2 и 3. Ово је последица грешке завареног споја типа линија спајања, што се боље види на макроскопским снимцима (*Слика 5.20-5.21*).

Највећи пад тврдоће забележен је у ЗУТ-у ближе зони термо-механичког утицаја. Ова промена тврдоће настала је услед увећања зрна структуре при порасту температуре процеса. Најнижа вредност микротврдоће код обе легуре је на страни напредовања споја [91].

Постоји извесна разлика код дијаграма расподеле микротврдоће близу лица и близу корене стране метала шави. У области грумена и ЗТМУ, ниво тврдоће у близини лица споја је изразито већи у односу на корену страну споја, што је последица недовољног мешања материјала услед недовољне температуре процеса. Материјал елемената стезног помоћног прибора, односно подложних плоча коришћених у првој фази експерименталног рада био је угљенични челик класе S355, што је довело до одвођења дела топлоте из зоне заваривања, неопходне за успешно одвијање процеса.

У области грумена вредности микротврдоће измерене у вертикалном правцу одговарају вредностима тврдоћа мерених у хоризонталном правцу близу корене стране споја, што је и очекивано јер је ту била смањена температура процеса услед одвођења топлоте од стране подложних плоча. Прве две вредности микротврдоће мерене у вертикалном правцу (на 1 и 1,5 mm од лица споја) одговарају вредностима микротврдоћа мереним у хоризонталном правцу близу лица споја у области грумена, јер је ту највећа и константна температура процеса. После седмог милиметра од лица споја полако престају зона термо-механичког утицаја, а затим и зона утицаја топлоте, вредност микротврдоће постепено расте да би већ на удаљености од 12 mm од лица споја достигла вредност микротврдоће основног материјала.

### **5.2.2. *Расподела микротврдоће кроз спој легуре 5754-H32***

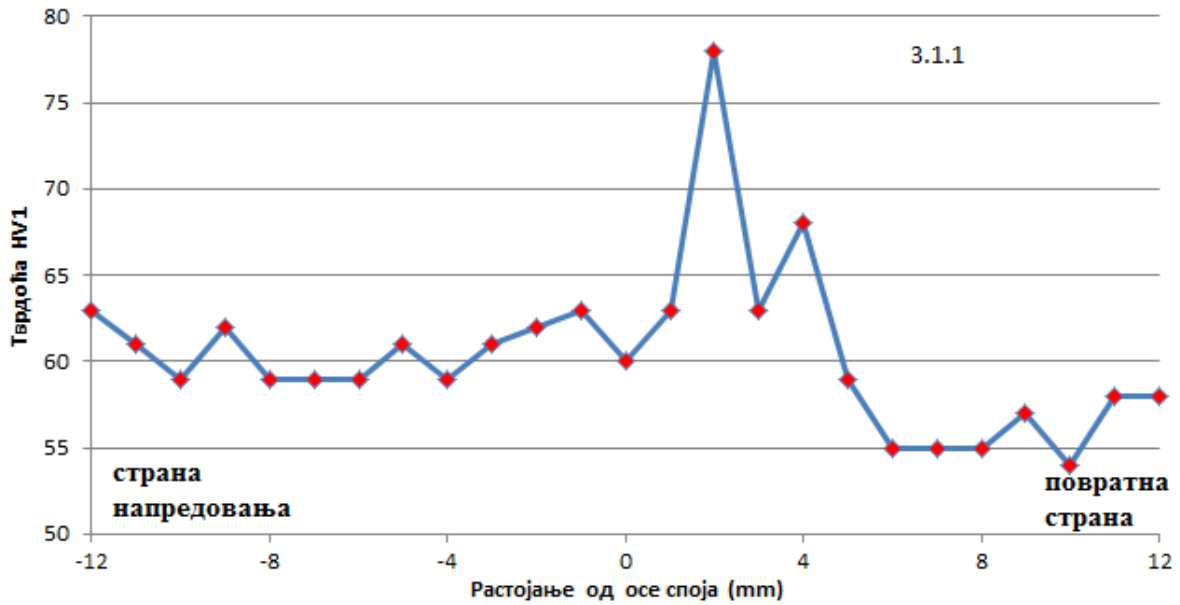
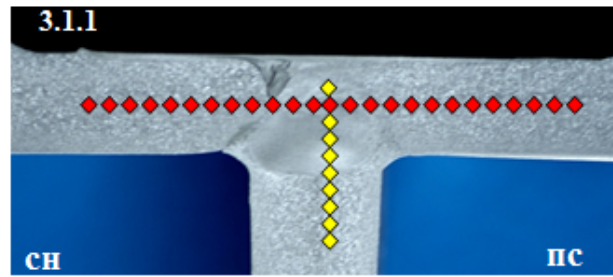
Расподела микротврдоћа у хоризонталном и вертикалном правцу кроз пресек споја појединих проба дати су на *Слици 5.12-5.15*. Из сваке пробе исечена су два

узорка, први на почетку, а други на крају завареног споја (мало пре излазне рупе). Опис места, односно на којој дужини споја је извршено исецања узорака из појединих проби код којих је мерена микротврдоћа дато је у *Табели 5.1*. Све заварене пробе су биле дужине 200 mm, а дужина метала шава је износила 170 mm.

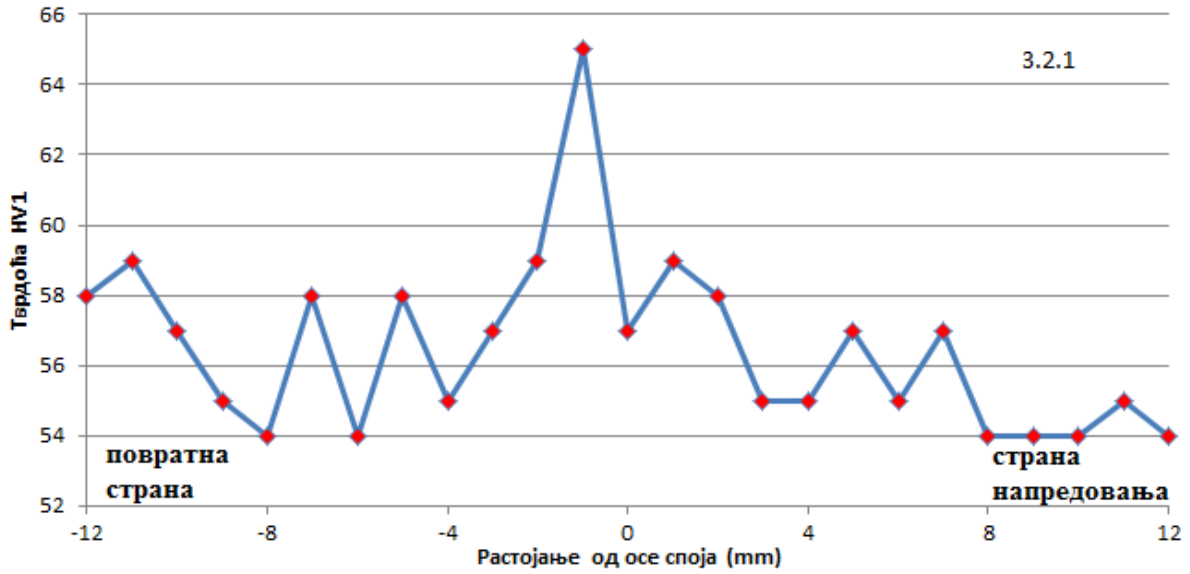
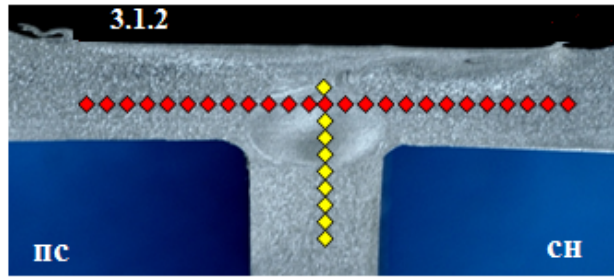
*Табела 5.1 Означавање узорака исечених из појединих проба*

Проба	Узорак	Опис места исецања узорака из заварене пробе (споја)
3.1	3.1.1	На 4 cm од почетка метала шава
	3.1.2	На 4 cm од краја метала шава
4.1	4.1.1	На 4 cm од почетка метала шава
	4.1.2	На 4 cm од краја метала шава
4.2	4.2.1	На 4 cm од почетка метала шава
	4.2.2	На 4 cm од краја метала шава

a)



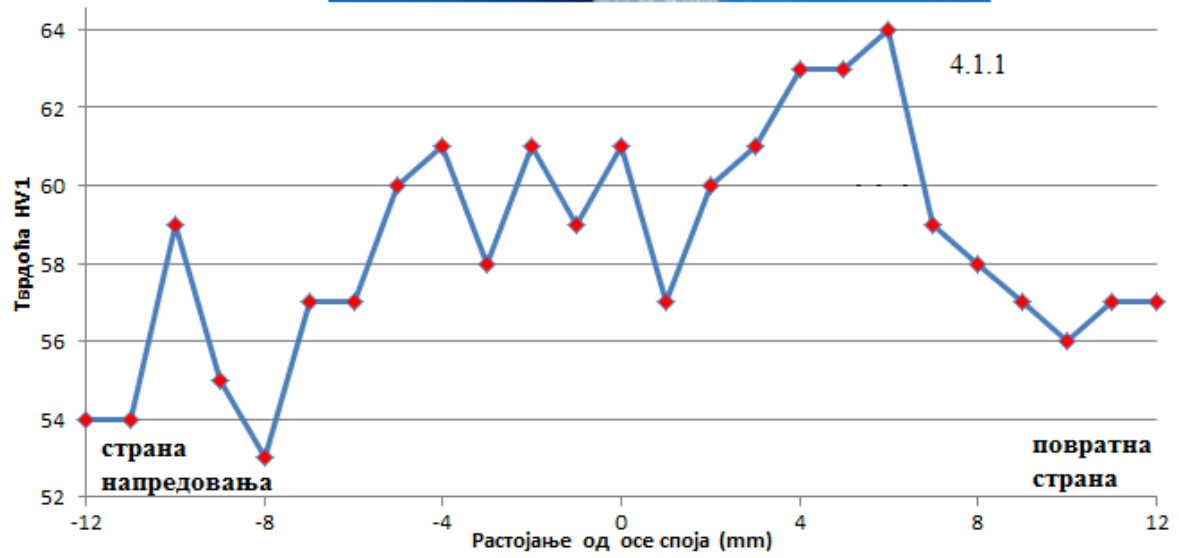
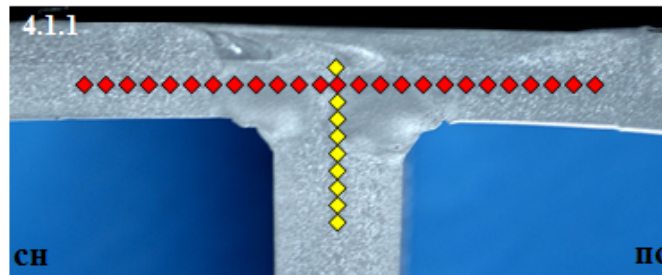
б)



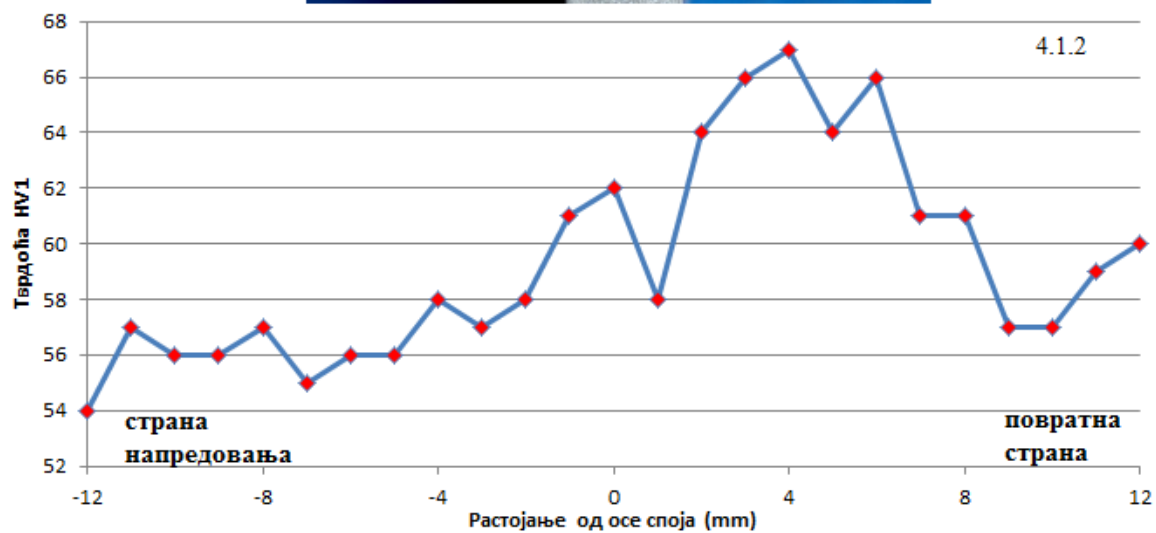
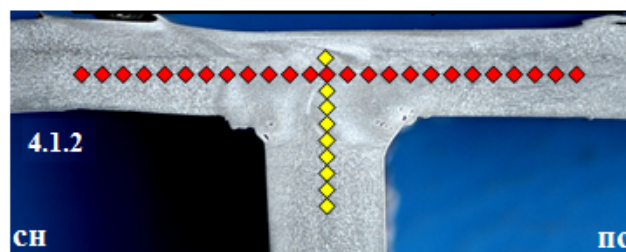
Слика 5.12 Расподела и места мерења микротврдоће кроз пресек spoja 3.1 а) узорак 3.1.1 и б) узорак 3.1.2



a)

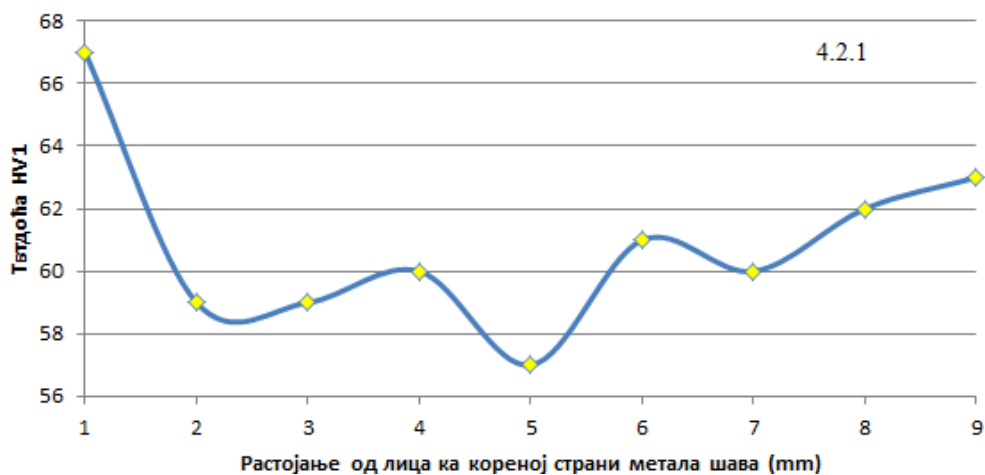
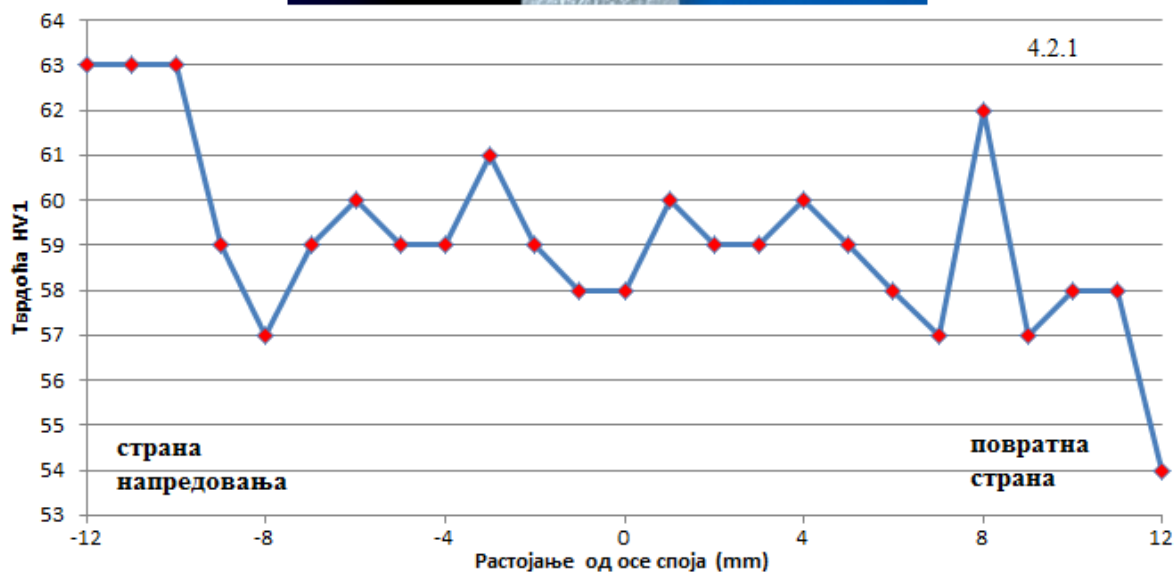
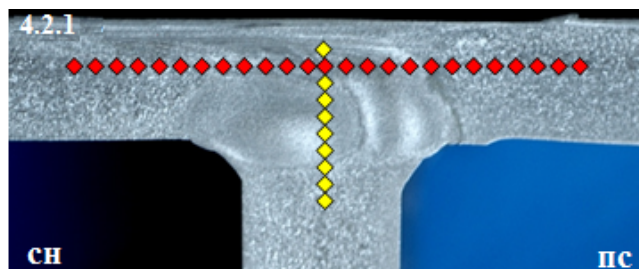


б)

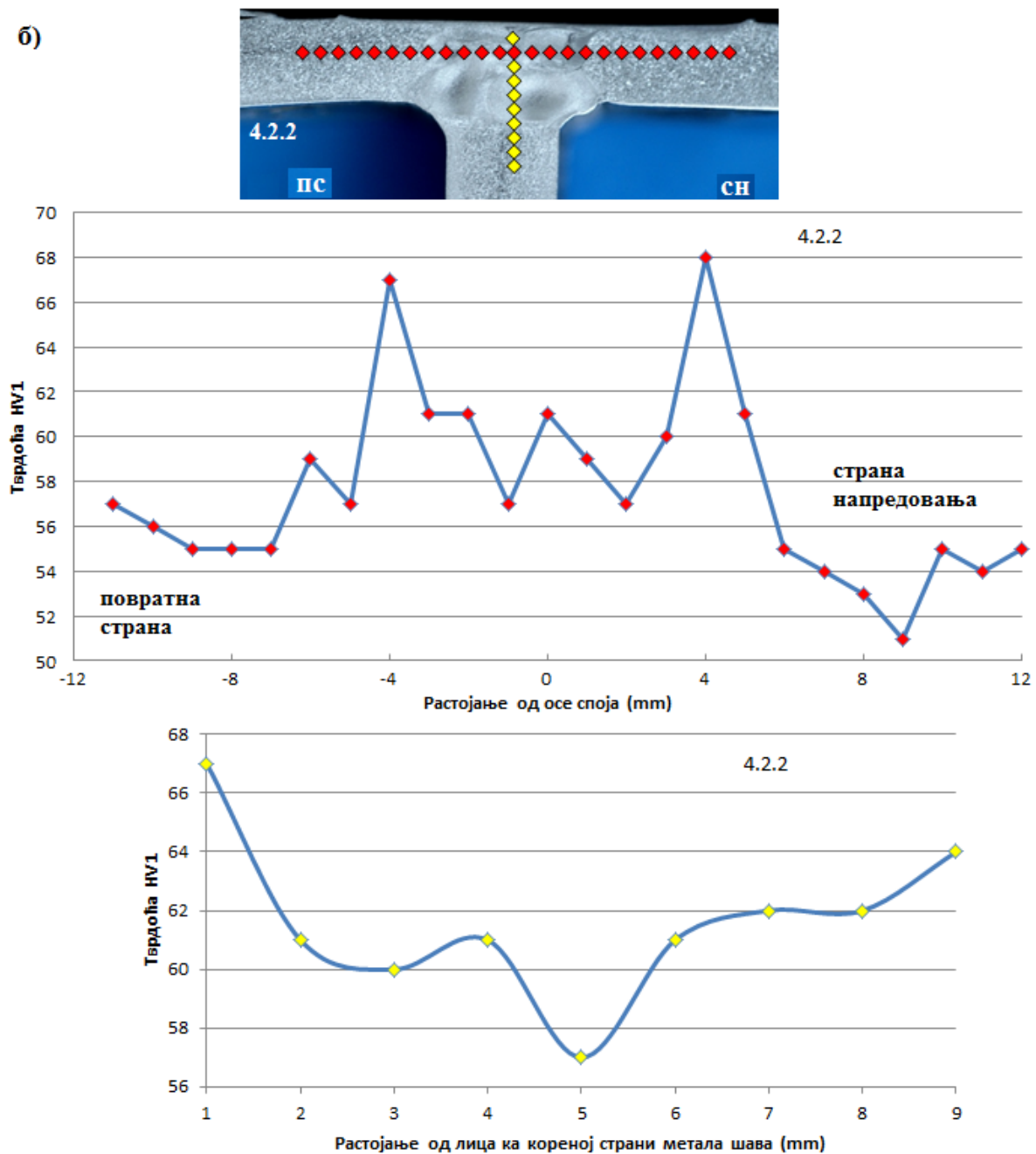


Слика 5.13 Расподела и места мерења микротврдоће кроз пресек споја 4.1 а) узорак 4.1.1 и б) узорак 4.1.2

а)



б)



Слика 5.14 Расподела и места мерења микротврдоће кроз пресек споја 4.2 а) узорак 4.2.1 и б) узорак 4.2.2

Дијаграми расподела микротврдоћа мерених у хоризонталном правцу кроз пресек споја генерално нису симетрични у односу на центар споја, што је уочљиво баш код пробе 4.1. Дијаграм расподеле у хоризонталном правцу би био симетричан

када би се посматрао у односу на осу која је померена за 4 mm од центра ка повратној страни метала шава. То је највероватније последица тога што је при заваривању пробе 4.1 први пролаз алата био на страни напредовања, а други на повратној страни метала шава. Тиме је и највећа вредност измерених микротврдоћа присутна у области грумена, што је и очекивано, али не кроз центар споја него померено ка повратној страни управо из разлога што је други пролаз алата био на тој страни метала шава.

Симетричност дијаграма расподела микротврдоћа мерених у хоризонталном правцу највећа је код пробе 3.1, али оса симетрије је померена 1 mm од центра ка повратној страни споја. Ова проба је заварена једним пролазом алата.

Код пробе 4.2, где је при заваривању први пролаз алата био на повратној, а други на страни напредовања метала шава дијаграм расподеле микротврдоћа мерених у хоризонталном правцу на први поглед симетрично баш у односу на центар споја. Међутим, дијаграм расподеле микротврдоћа кроз пресек споја код узорка 4.2.2 изгледа симетрично у односу на центар споја, али само посматрано од осе центра споја до удаљености од 8 mm ка страни напредовања и ка повратној страни метала шава. Код узорка 4.2.1 већ на удаљености од 4 mm од центра споја ка страни напредовања и ка повратној страни метала шава долази до већих разлика у измереним вредностима микротврдоћа.

Највеће вредности измерених микротврдоћа уочених на дијаграмима (*Слика 5.12-5.14*) су у области грумена, док су најниже вредности у области ЗТМУ.

Несиметричност дијаграма расподела микротврдоћа мерених у хоризонталном правцу у односу на централну осу споја је изгледа карактеристична за Т-спојеве. Такође, примећено је да је симетричност дијаграма присутна ако је Т-спој добијен једним пролазом алата на удаљености од 1 mm, односно 4 mm од централне осе ка повратној страни споја ако Т-спој добијен са два пролаза алата (први пролаз на страни напредовања, други на повратној страни метала шава). Дакле, симетричност дијаграма је присутна и померена је од центра ка повратној страни метала шава. Управо зато се код пробе 4.2 симетрична расподела микротврдоћа баш појавила у односу на централну осу споја јер је тај Т-спој добијен заваривањем са два пролаза

алата, где је први пролаз био на повратној страни, али други, који више одређује положај грумена, на страни напредовања.

Први отисак измерен у вертикалном правцу код свих испитиваних узорака налази се на удаљености од 1 mm од лица споја. Укупно је измерено девет микротврдоћа у вертикалном правцу, а према томе девета микротврдоћа је измерена на удаљености од 10 mm од лица споја.

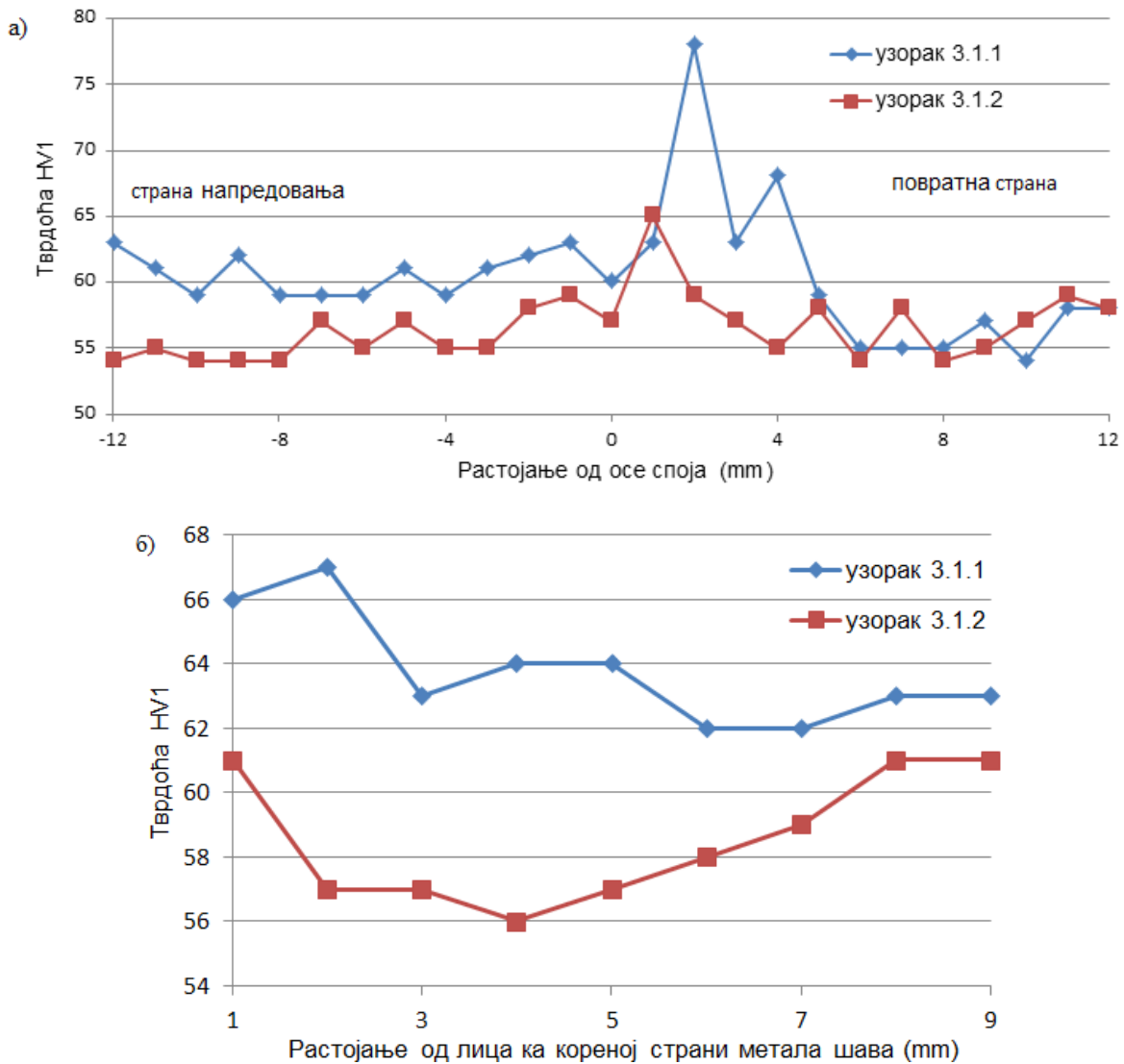
У области грумена вредности микротврдоће измерене у вертикалном правцу одговарају вредностима микротврдоћа мерених у хоризонталном правцу и то код оба узорка узета из једног Т-споја. Примећује се да је вредност микротврдоће у области грумена увек већа близу лица, него корена метала шава. То је последица веће температуре процеса услед директног дејства чела рамена алата на радне плоче.

Највеће вредности микротврдоћа измерених у вертикалном правцу код свих узорака су присутне у области грумена, али на различитој удаљености од лица метала шава. Узорци 3.1.1, 4.1.1, 4.1.2, 4.2.1 и 4.2.2 имају највећу вредност микротврдоће на удаљености од 1 mm, док узорак 3.1.2 на 2 mm од лица метала шава.

Најниже вредности микротврдоћа измерених у вертикалном правцу код свих узорака су присутне у зони термо-механичког утицаја и зоне утицаја топлоте. После седмог милиметра од лица споја полако престају ове две структурне зоне, све је мањи утицај топлоте на вредност микротврдоће и вредности микротврдоћа постепено расту.

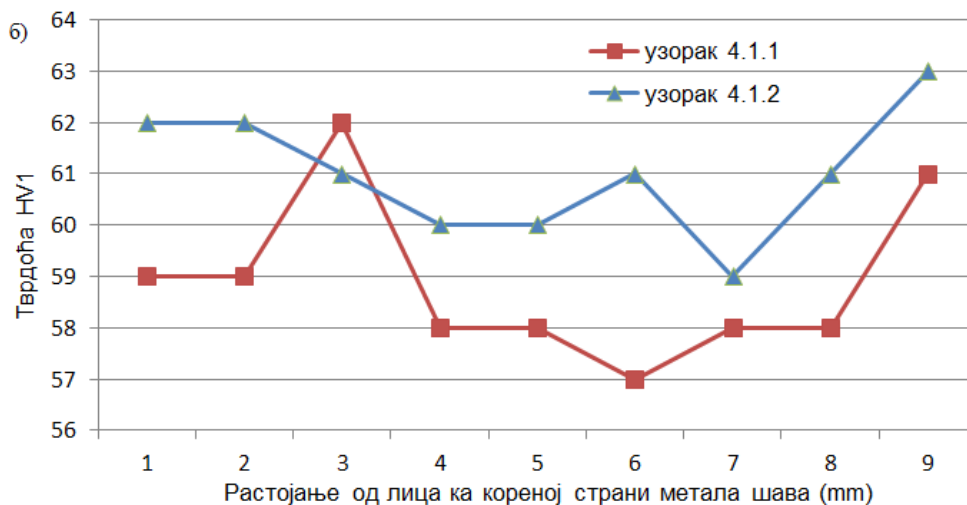
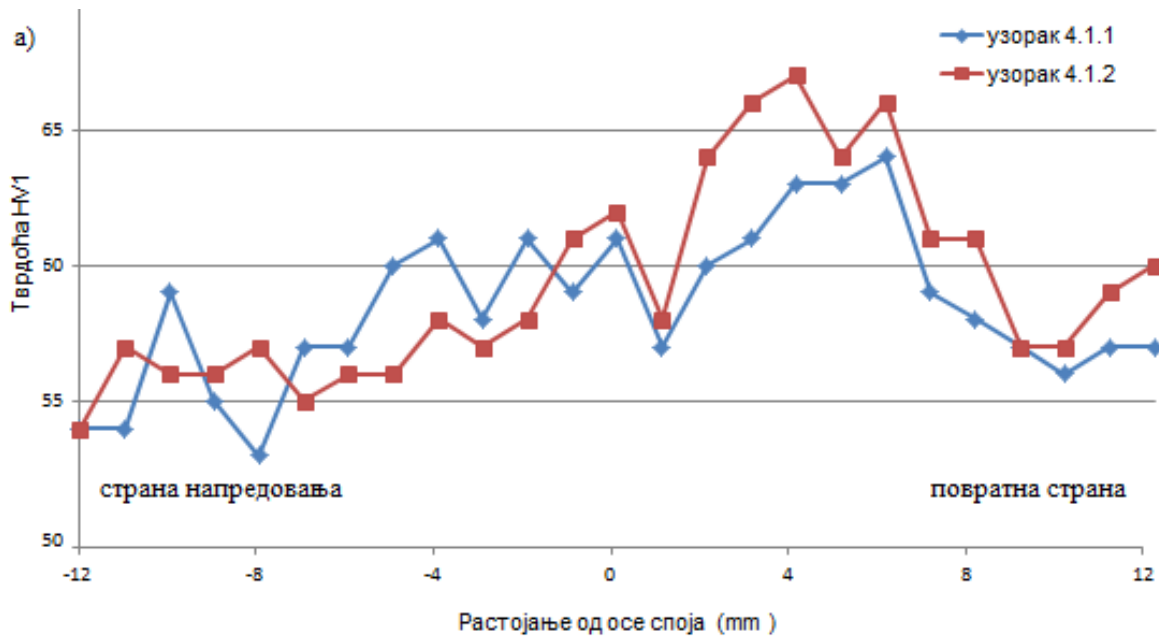
Примећено је да постоји извесна разлика у вредностима измерених микротврдоћа зависно од места узимања узорака из пробе. Облици дијаграма расподеле тврдоће узорака узетих из исте пробе су приближно слични. Међутим, вредности измерених микротврдоћа на истим местима код оба узорка се разликују.

Да би се боље сагледале вредности измерених микротврдоћа на сваком Т-споју дати су упоредни дијаграми. Као што је већ напоменуто, микротврдоће су мерене код два узорка узета из сваког Т-споја, на одређеној дужини што је објашњено Табелом 5.1. На Сликама 5.15-5.17 дати су упоредни дијаграми микротврдоћа сваке заварене пробе измерених у хоризонталном и вертикалном правцу.



Слика 5.15 Упоредни дијаграми расподела микротврдоћа пробе 3.1 мерених у: а) хоризонталном и б) вертикалном правцу: а), б) проба 4.1 и в) проба 4.2

Измерене микротврдоће у оба правца пробе 3.1 су веће код узорка узетог ближе почетка споја. Разлог томе је већа температура која је била присутна на почетку заваривања. Дијаграми расподела микротврдоћа мерених у хоризонталном правцу имају приближно исти облик, док се у вертикалном правцу разликују. Мали пад температуре процеса доводи до такве промене тврдоће.

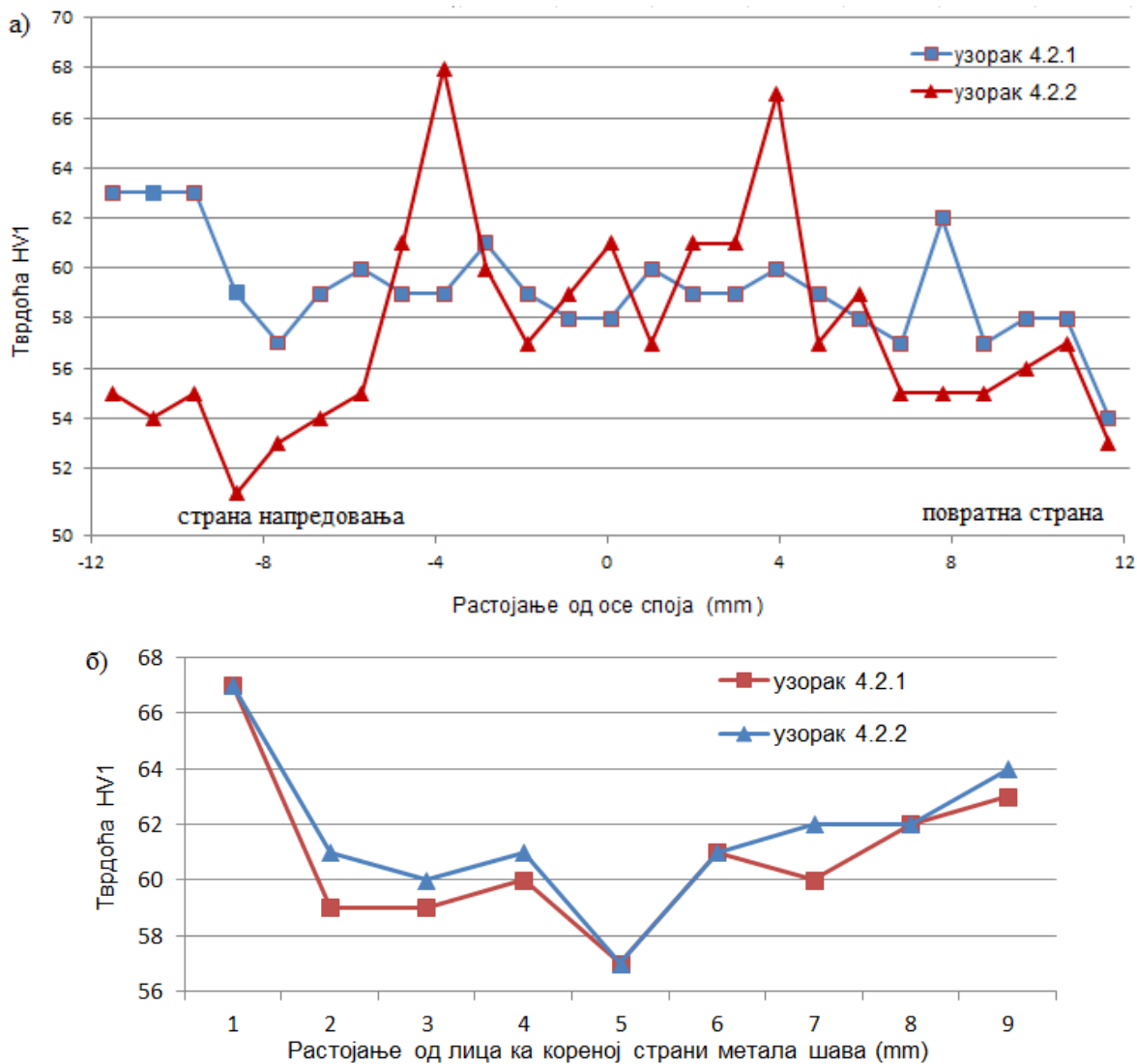


Слика 5.16 Упоредни дијаграми расподела микротврдоћа пробе 4.1 мерених у: а) хоризонталном и б) вертикалном правцу

Узорци узети из пробе 4.1 имају приближно исте облике дијаграма расподела микротврдоћа измерених у оба правца. Незнатно је мало одступање микротврдоћа код оба узорка измерених у хоризонталном правцу. Важно је да тврдоћа приближно буде једнака близу почетка и краја споја јер онда то значи да је приближно иста и на целој дужини споја. Интересантан је скок микротврдоће од 3 HV1 узорка 4.1.1



измерен на 3 mm од лица споја, што је и очекивано јер се та микротврдоћа налази у области грумена.



Слика 5.17 Упоредни дијаграми расподела микротврдоћа пробе 4.2 мерених у: а) хоризонталном и б) вертикалном правцу

Дијаграми расподела микротврдоћа измерених код узорака пробе 4.2 су јако интересантни. Велика подударност дијаграма расподела микротврдоћа мерених у вертикалном правцу је присутна. То говори да је током целог процеса заваривања била присутна константна топлота неопходна за неометано одвијање процеса. Јако је

битно да би се установи једнака тврдоћа у свим узоркованим пресецима споја. Ако је тврдоћа приближно једнака близу почетка и краја споја, онда значи и да је приближно иста и на целој дужини споја. Дијаграми расподела микротврдоћа измерених у хоризонталном правцу се обликом доста разликују. Међутим, уочавају се и следеће сличности. Највеће вредности микротврдоћа су присутне у широком опсегу од 8 mm, а тај опсег одговара области грумена. Такође, облик дијаграма оба узорка у опсегу од  $-4\div 4$  mm је симетричан у односу на централну осу споја.

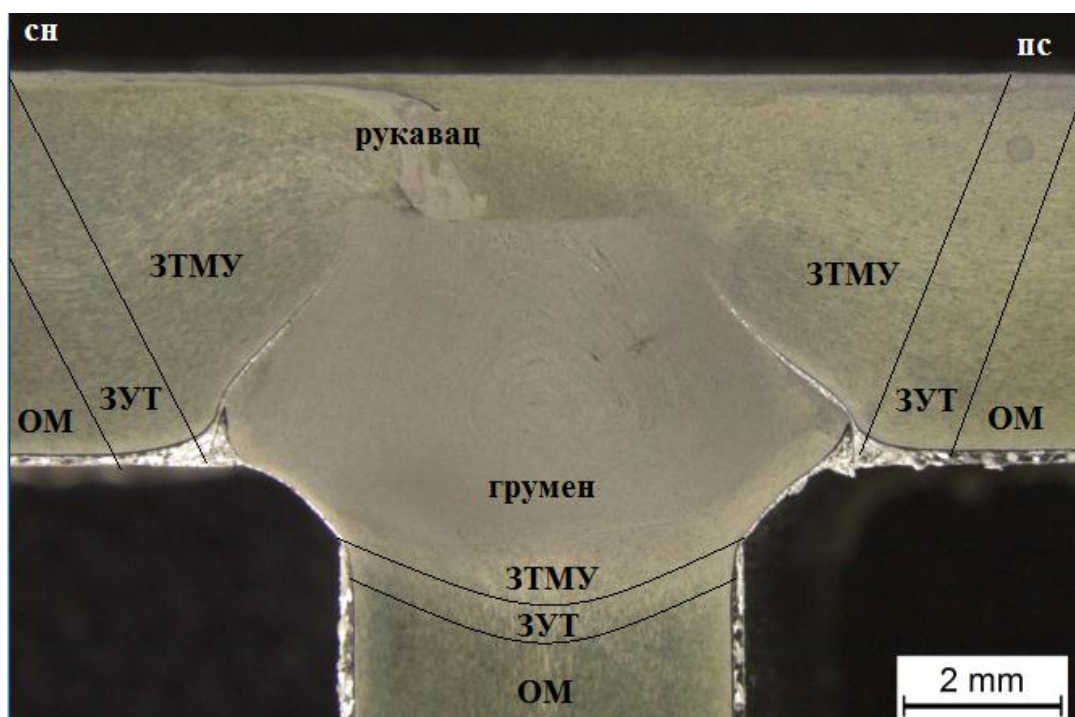
При заваривању проба 4.1 и 4.2 сви параметри заваривања су били исти, осим дубине урањања алата у материјал и места пролаза алата. Код пробе 4.1 први пролаз је био на страни напредовања метала шава и алат је пролазио тачно по линији спајања плоча, а дубина урањања је  $a = 5,8\text{mm}$ . Код пробе 4.2 први пролаз је био на повратној страни, други на страни напредовања метала шава, али алат је пролазио на удаљености од 1 mm од линије спајања радних плоча ка уздужној оси споја и дубина урањања је износила  $a = 5,6\text{mm}$ . С обзиром да су ове две пробе заварене са два пролаза алата, зона грумена је већа него када се заваривање врши једним пролазом алата (проба 3.1), а тиме се шири опсег највећих тврдоћа у споју. Опсег највећих вредности микротврдоћа пробе 4.2 износи чак 8 mm, пробе 4.1 је 5 mm, док код пробе 3.1 износи свега 2 mm.

### **5.3. Карактеризација структуре**

У оквиру металографских испитивања урађена је макроструктурна анализа заварених спојева и њихових области. Карактеристична макроструктура попречног пресека споја нормалног на правац заваривања и положај његових области (грумен, рукавац, зона термо-механичког утицаја-ЗТМУ, зона утицаја топлоте-ЗУТ и основни материјал-ОМ) разматрани су.

### 5.3.1. Макроструктура спојева од легуре 5052-Н32

Макроструктура спојева добијених у првој фази експерименталног рада разматрана је само на два споја (проба 6 и проба 3) јер су се на свим осталим спојевима уочавале грешке при визуелној контроли лица метала шави. Типични макроскопски изгледи попречних пресека Т-спојева добијених заваривањем две плоче са једним пролазом алата (Слика 5.18) и заваривањем три плоче са два пролаза алата (Слика 5.19) приказани су у овом раду.

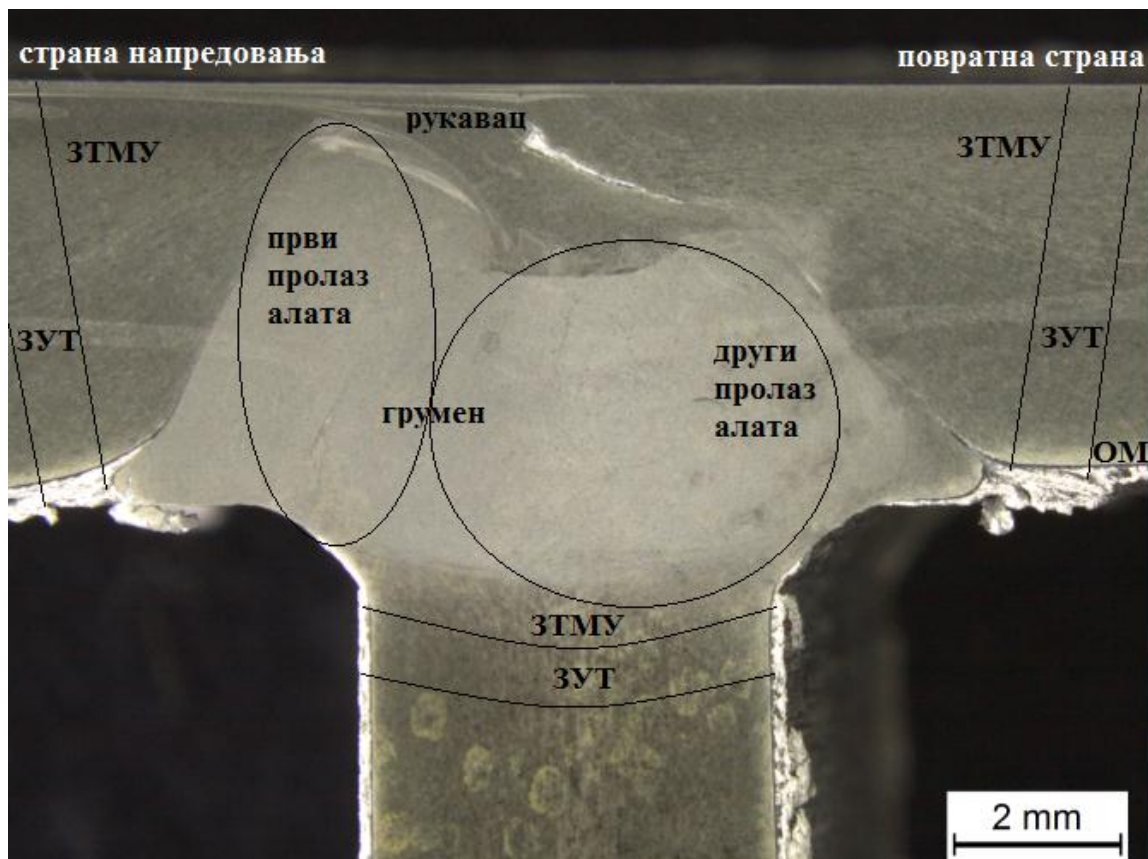


Слика 5.18 Макроскопски снимак карактеристичних структурних зона заварене пробе 6, сн-страна напредовања, пс- повратна страна

Не постоји тачна граница између ЗУТ-а и ЗТМУ, али зато се положај и облик грумена и рукавца јасно уочавају. Грумен има препознатљиву прстенасту структуру (концентрични кругови). У зони грумена је фина, рекристалисана, ситнозрнаста структура јер су структурна зрна грубо промешана. Структура зрна у ЗУТ-у је слична као и код основног материјала, заправо зрна су мало крупнија услед утицаја топлоте.

Јасно изражене линије течења материјала указују на карактер и смер тока материјала при одвијању процеса заваривања. Положај, простирање и израженост линија течења зависи од параметара заваривања. Очекивано, рукавац је јасно изражен на страни напредовања метала шави.

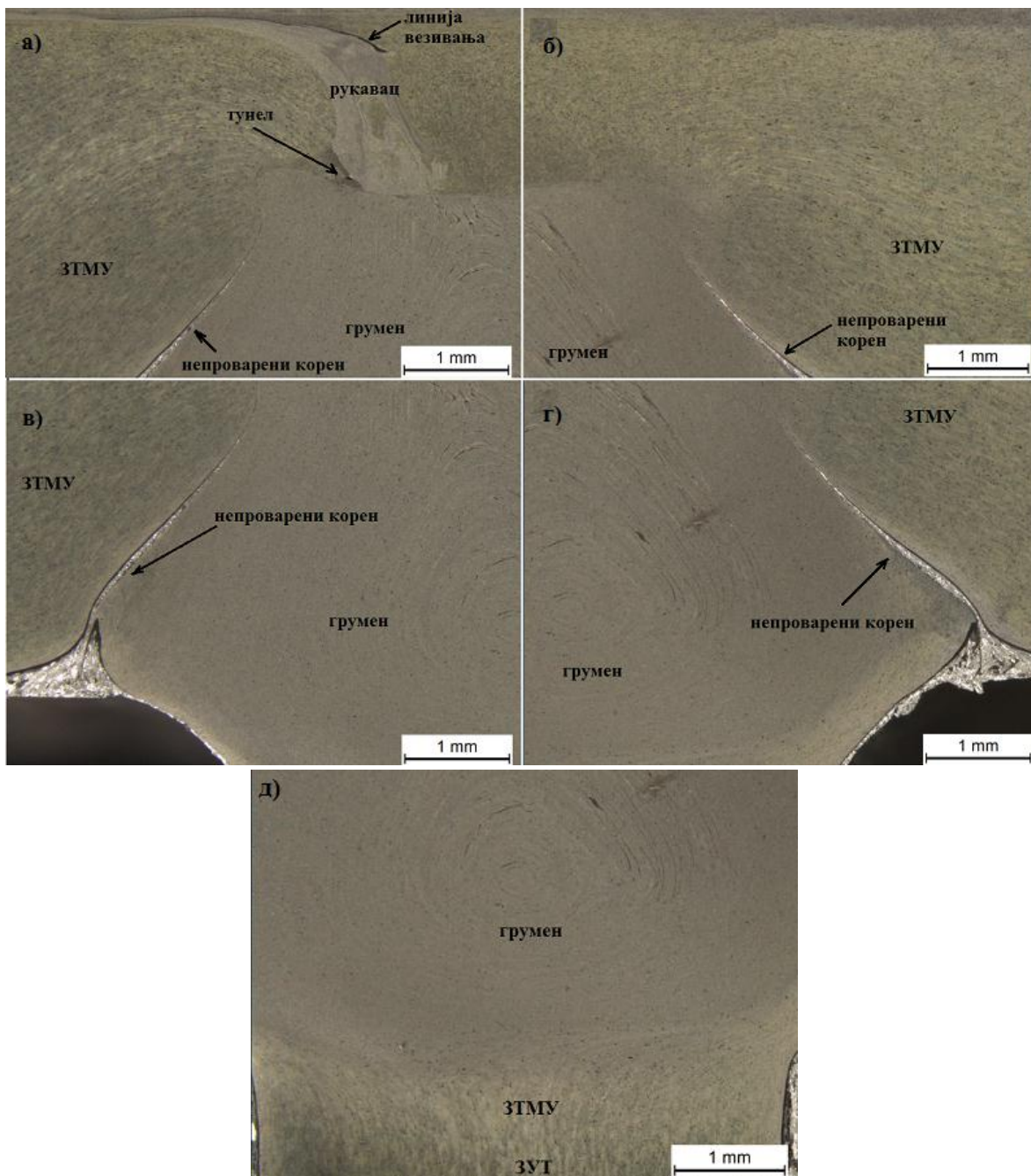
При заваривању две плоче једним пролазом алата грумен је симетричан.



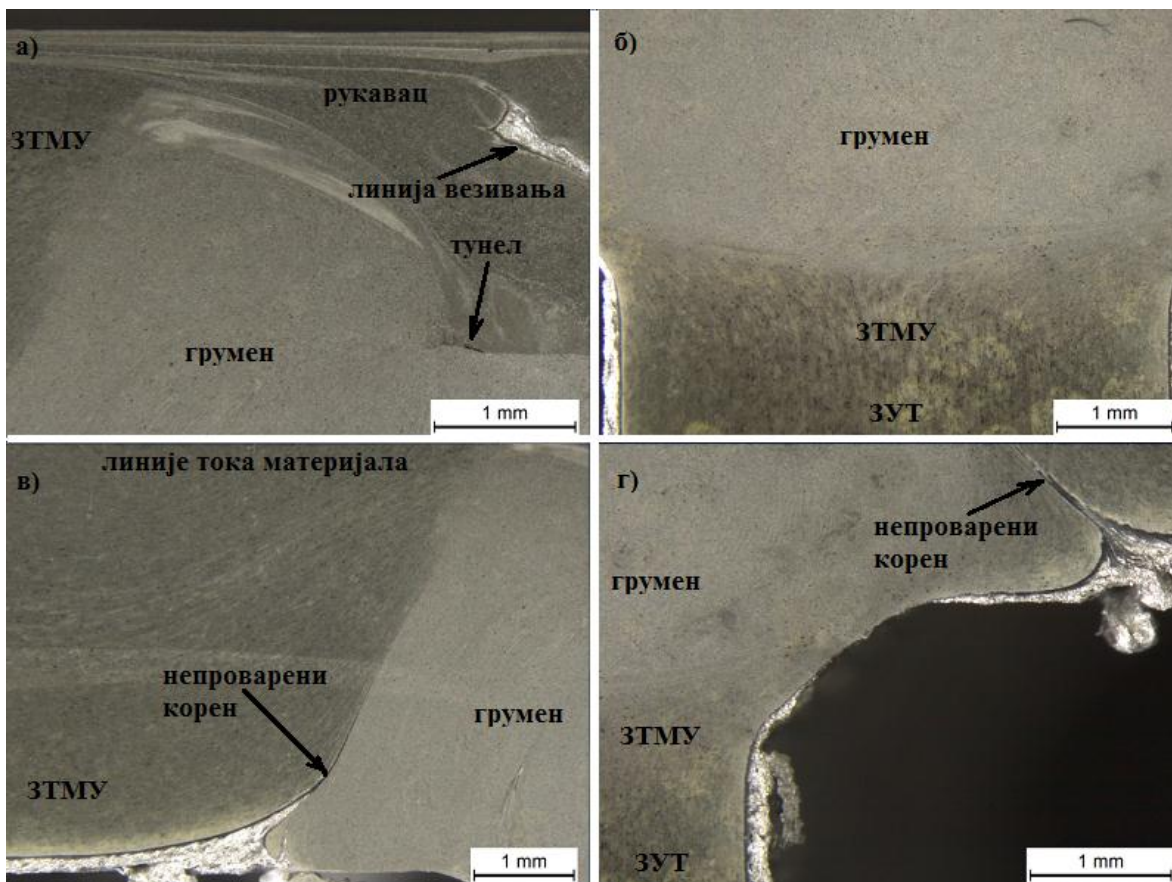
Слика 5.19 Макроскопски снимак карактеристичних структурних зона заварене пробе 3

Проба 3 је добијена заваривањем три плоче са два пролаза алата и из тог разлога је облик грумена асиметричан. Први пролаз алата је био на страни напредовања, а други на повратној страни метала шави.

Макроскопски снимци карактеристичних структурних зона и грешке завареног споја проба 6 и 3 дати су на *Сликама 5.20 и 5.21*.



Слика 5.20 Макроскопски снимци појединих структурних зона заварене пробе б: а) рукавац, граница грумен-ЗТМУ на страни напредовања, грешке типа тунела и линија везивања, б) граница грумен-ЗТМУ на повратној страни, грешка типа непроварени корен, в) граница грумен-ЗТМУ на страни напредовања, грешка типа непроварени корен, г) граница грумен-ЗТМУ на повратној страни, грешка типа непроварени корен и д) корен метала шави, граница грумен-ЗТМУ



Слика 5.21 Макроскопски снимци појединих структурних зона заварене пробе 3: а) рукавац, граница грумен-ЗТМУ на страни напредовања, грешке типа тунела и линија везивања, б) корен метала шави, граница грумен-ЗТМУ-ЗУТ, в) граница грумен-ЗТМУ на страни напредовања, грешка типа непроварени корени и уочене линије тока размекшилог материјала, г) граница грумен-ЗТМУ-ЗУТ на повратној страни, грешка типа непроварени корен

Грешка завареног споја типа тунела уочена је на страни напредовања метала шави код обе пробе, што је приказано на *Сликама 5.20 а)* и *5.21 а)*. Ова грешка спада у недозвољене грешке јер изазива смањење величине попречног пресека. Настаје услед недовољног транспорта (преноса) омекшалога материјала око трна алата са повратне ка страни напредовања, а то услед неодговарајуће (превелике) брзине заваривања [92-94].

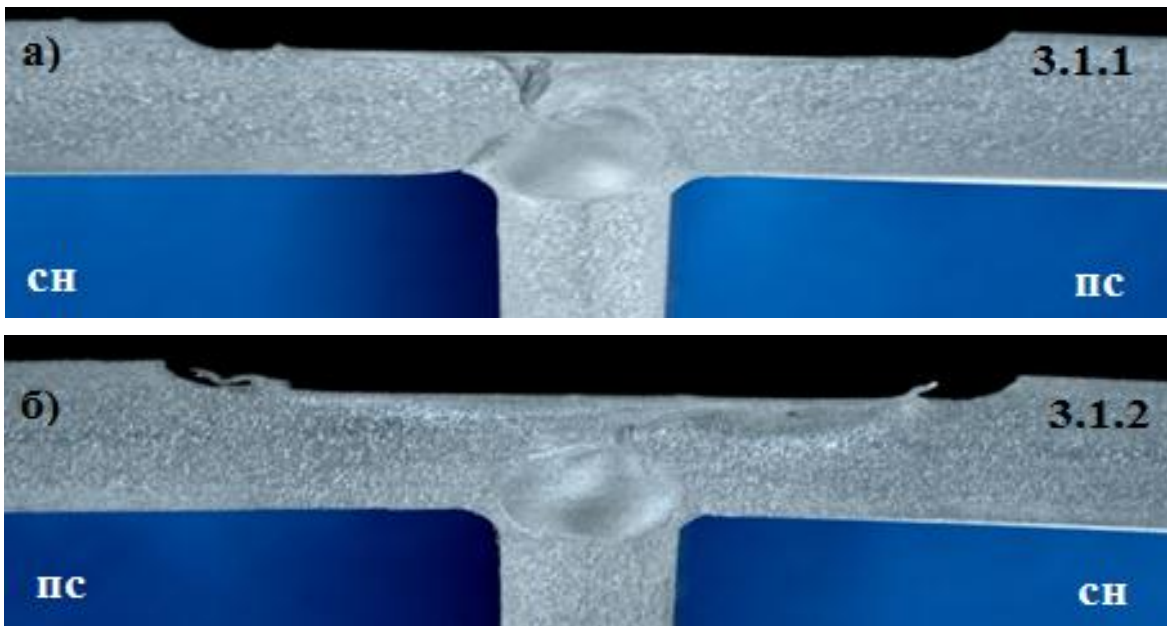
На кореној страни метала шава, у непосредној околини грумена, (*Слика 5.20 а-г* и *5.21 в-г*), уочавају се грешке типа непровареног корена (несавршено везивање). Овај тип грешке јавља се услед недовољне пенетрације алата у материјал и недовољне температуре процеса. Изузетно је неповољна јер чини иницијалну прслину у грумену, што доводи до смањења затезне чврстоће споја [95].

Грешка типа линија везивања присутна је код обе пробе на страни напредовања. Механизам настанка ове грешке укратко се могу описати на следећи начин: танак оксидни слој који се налази на површинама две или више плоча које се спајају није потпуно разбијен током процеса заваривања. Смицање материјала од стране трна алата који ротира у великој мери подстиче примарно течење материјала, али јако ретко у вертикалном правцу (секундарно течење материјала). Присутност ове грешке на страни напредовања указује на то да је ток материјала на тој страни тежи [96-100]. Линија везивања представља иницијалну прслину у споју и тиме су смањене механичке карактеристике споја. Ова грешка је могла бити избегнута већим уносом топлоте у процес и променом геометрије алата.

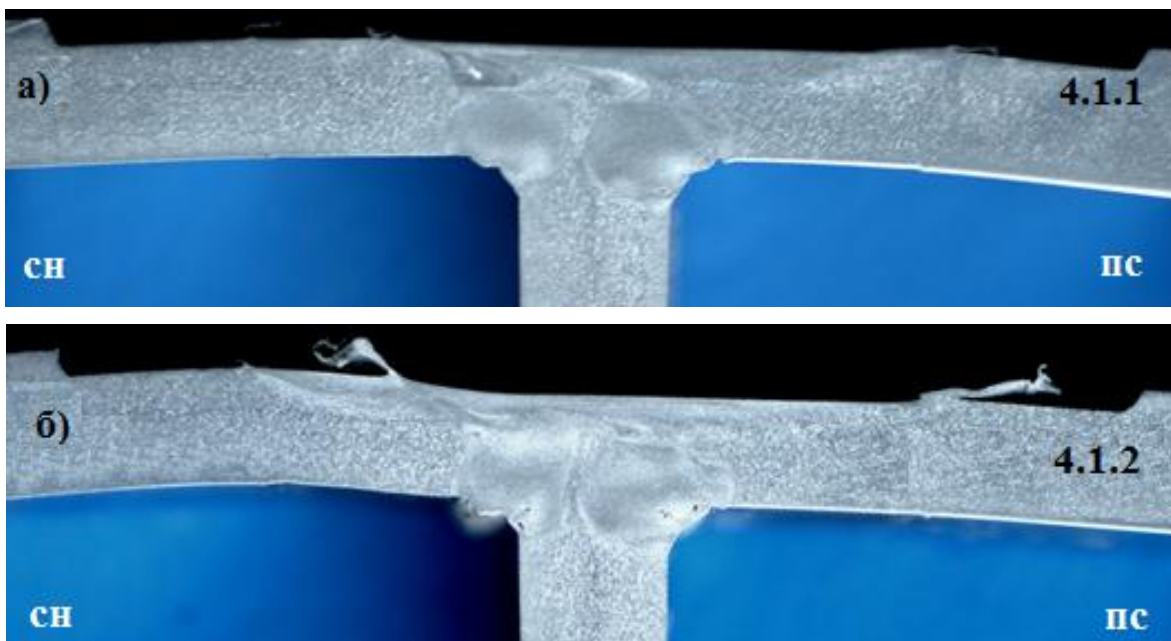
Избори параметара заваривања и начини заваривања радних плоча од легуре 5052-Н32 (две или три плоче, два или три пролаза алата) није имао утицај на спречавање настанка грешака завареног споја. Три типа грешака присутних код пробе 6 и пробе 3 на приближно истим местима указују на то да није било довољно топлоте за процес заваривања. Материјал елемената стезног помоћног прибора је одвео део топлоте из процеса.

### **5.3.2. Макроструктура спојева од легуре 5754-Н111**

Испитивани спојеви легуре 5754-Н111 имају занемарљиво мале грешке за разлику од спојева легуре 5052-Н32. Разлог томе је тај што је материјал елемената стезног помоћног прибора у другој фази експерименталног рада био нерђајући челик. Макроскопски изгледи попречних пресека заварених проби 3.1, 4.1 и 4.2 дати су на *Сликама 5.22-5.24*.

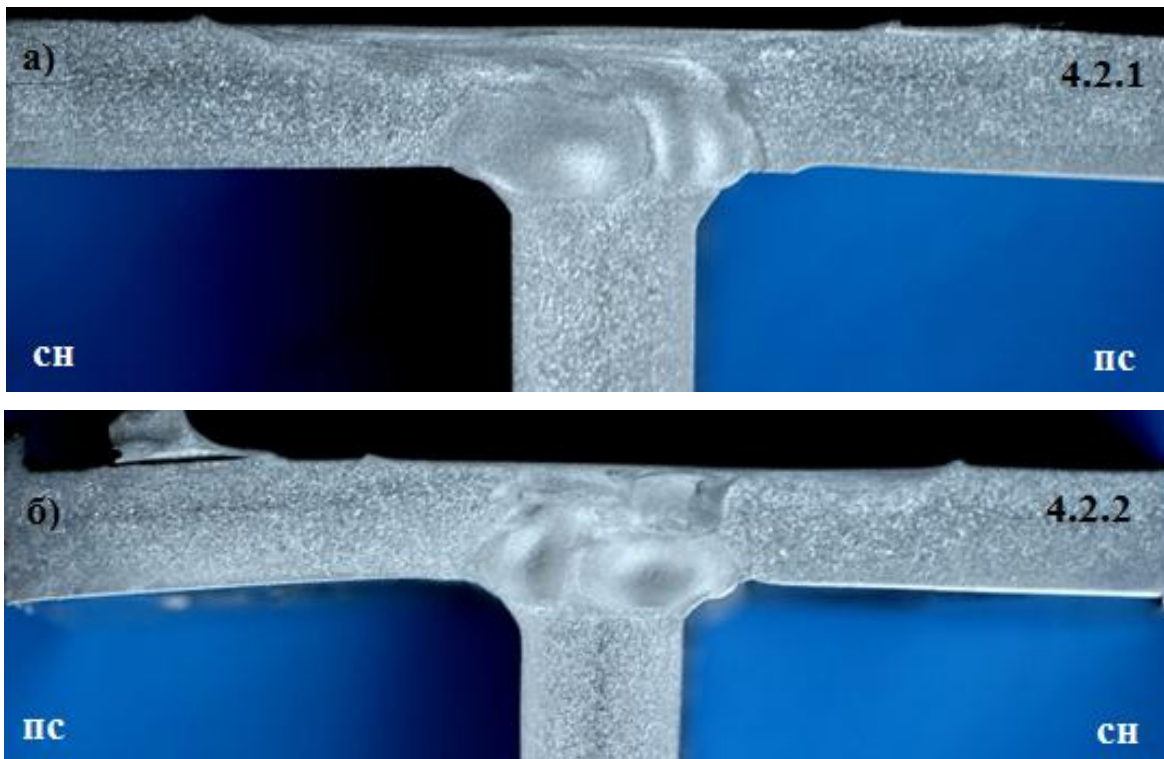


*Слика 5.22 Макроскопски снимци попречног пресека: а) узорка 3.1.1 и б) узорка 3.1.2, узетих из пробе 3.1*



*Слика 5.23 Макроскопски снимци попречног пресека: а) узорка 4.1.1 и б) узорка 4.1.2, узетих из из пробе 4.1*





*Слика 5.24 Макроскопски снимци попречног пресека: а) узорка 4.2.1 и б) узорка 4.2.2, узетих из из пробе 4.1*

Коришћењем стезног помоћног прибора од нерђајућег челика, поменутих параметара заваривања, машине за заваривање и изабраног алата за заваривање плоча дебљине 5 mm од алуминијумске легуре 5754-H111 избегнуте су грешке у завареном споју типа тунела, линија везивања и непровареног корена. Макроскопским испитивањем уочене су занемарљиве грешке. Те грешке су веома малих димензија и не разматрају се као места иницијалних прелина у металу шави.

Табелом 5.2 су представљени резултати макроскопског испитивања, односно присуство занемарљиво малих грешака у испитиваним завареним спојевима.

Табела 5.2 Макроскопско испитивање легуре 5754-Н111

Узорак		Резултат макроскопског испитивања	Редни број слике
3.1	3.1.1	Занемарљива грешка: шупљина пречника $h = 0,12\text{mm}$	Слика 5.22а)
	3.1.2	Занемарљива грешка: шупљина пречника $h = 0,2\text{mm}$	Слика 5.22б)
4.1	4.1.1	Занемарљива грешка: метални укључци пречника $h = 0,1 \div 0,13\text{mm}$	Слика 5.23а)
	4.1.2	Занемарљиве грешке: метални укључци пречника $h = 0,1 \div 0,2\text{mm}$	Слика 5.23б)
4.2	4.2.1	Нису примећене грешке	Слика 5.24а)
	4.2.2	Занемарљива грешка: шупљина пречника $h = 0,35\text{mm}$	Слика 5.24б)

Примећене грешке заварених спојева су занемарљиво малих димензија, тако да за ове спојеве можемо рећи да су без грешака.

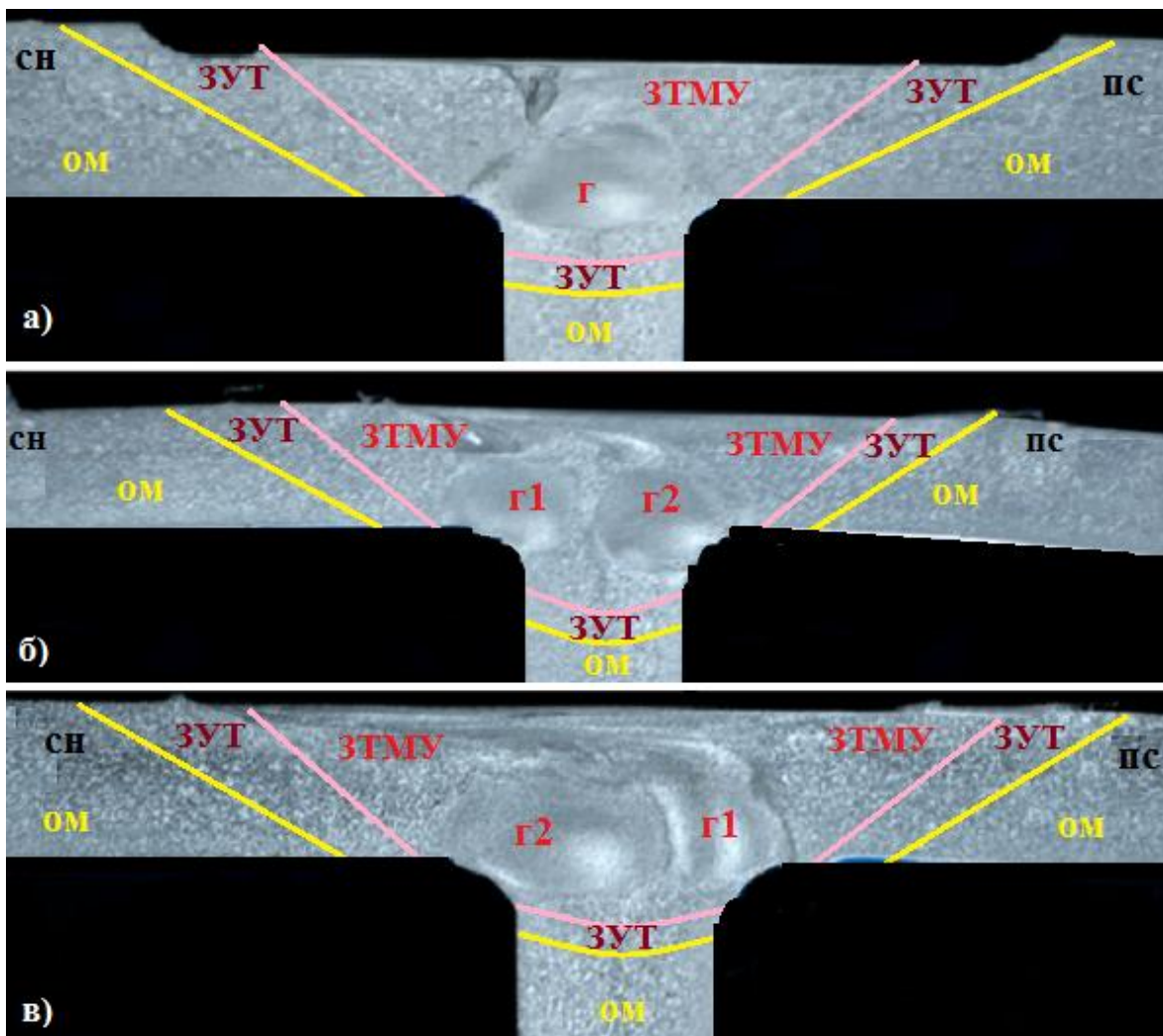
Да су пречници шупљина већих димензија онда би оне представљале места иницијалних прслина завареног споја. Јављају се као последица грешке типа линија везивања.

На кореној страни метала шава код пробе 4.1, на *Слици 5.23* изгледа као да је дошло до разливања омекшалог материјала. До тога заправо није дошло, него се Т-спој на кореној страни залепио за подложне плоче са радијусом од нерђајућег челика услед високе температуре процеса. Када се охладио Т-спој, лаганим ударом чекићем дошло је до раздвајања споја од подложних плоча, а на тим местима са радијусом је остала површина споја оштећена мало, односно храпавија.

На свакој макроскопској слици попречног пресека узорака из Т-спојева од алуминијумске легуре јасно се уочава зона грумена. Типична по својој финој, ситнозрнастој структури зона грумена има највећу тврдоћу у структури метала шава. Где је био један пролаз алата при заваривању, у структури метала шава је присутан један грумен, а према томе где су била два пролаза алата присутна су два грумена, чиме је повећана област највећих тврдоћа у завареном споју.

Макроструктурним испитивањима попречног пресека заварених спојева уочено је постојање структурних зона завареног споја: грумен (г), ЗТМУ и ЗУТ [101]. На

Слици 5.25 означене су отприлике структурне зоне на по једном узорку узетог из сваког испитиваног Т-споја, односно заварене пробе. Једино је зона грумена јасно уочљива и има тачно дефинисане границе.

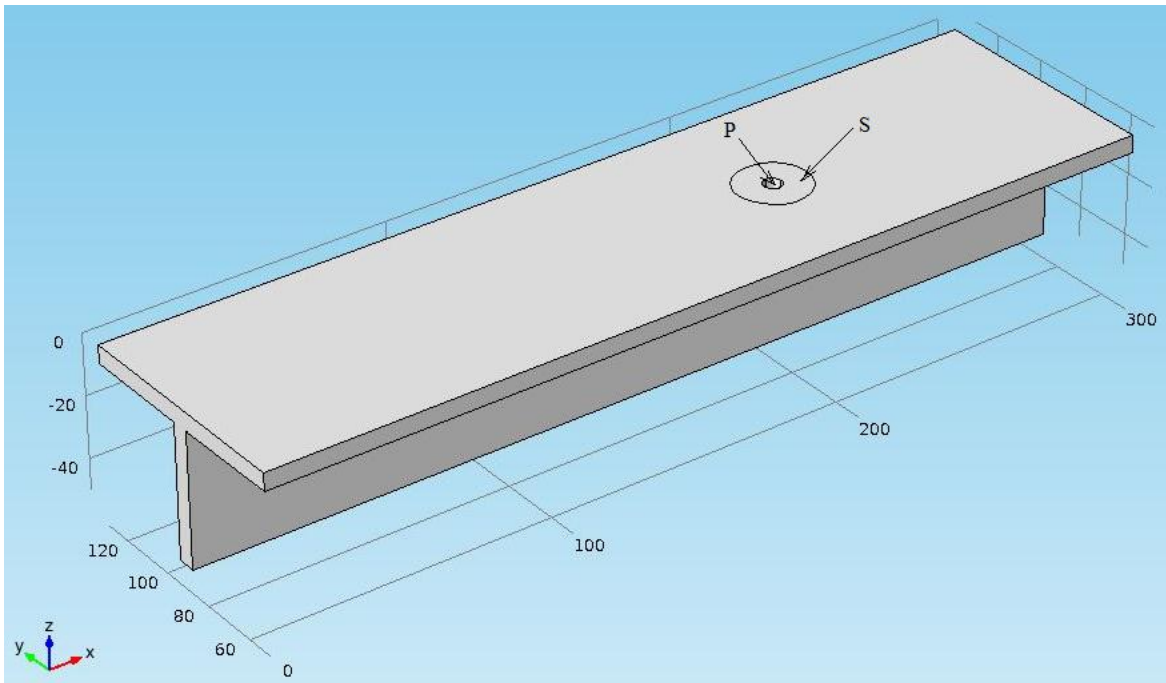


Слика 5.25 Макроструктурне зоне на попречним пресецима узорка узтих из заварених проба: а)3.1, б)4.1 и в)4.2

## 6. НУМЕРИЧКИ МОДЕЛ ПРОЦЕСА ЗАВАРИВАЊА ТРЕЊЕМ СА МЕШАЊЕМ

Да би се што боље развила технологија заваривања трењем са мешањем Т-спојева важно је што више проба заварити и испитати. Експериментално истраживање је скупо и захтева доста времена и зато је нумеричка симулација процеса и испитивање заварених проби методом коначних елемената одлично решење. Мана је та што за нумеричку симулацију је потребна велика стручност и искуство и што је јако мали број научних радова је доступно и постоји из ове области.

Нумеричка симулација заваривања трењем са мешањем три плоче у циљу добијања Т споја и израда термо-механичког 3D модела Т споја је урађена. Такође, урађена је и нумеричка симулација процеса ЗТМ две плоче од легуре алуминијума 6061-Т6 у циљу добијања сучеоног споја, о којој ће бити више речи у поглављу 6.2. Модел међусобног положаја три радне плоче дат је на *Слици 6.1*. Уочава се прстенаста површина „S“ која представља место утицаја чела рамена алата на површине материјала радних плоча у неком тренутку, као и рупа „P“ која представља дејство трна алата на материјал радних плоча (површина трна алата одговара површини рупе у радној плочи).



*Слика 6.1 Модел положаја радних плоча*

ЗТМ је процес заваривања без топљења материјала [102], где се материјал радних плоча налази у омекшаном стању. Температуре процеса су око 80% од температуре топљења радних плоча. Генерисање топлоте физички се заснива на трансформацији механичке у топлотну енергију у зони контакта алата и радних материјала. Процес заваривања подразумева истовремени термички и механички процес. Алат је цилиндричног облика, састоји се из раменог дела, чела алата и трна, а током процеса је у чврстом стању. Топлота се ствара услед трења чела алата и површине радних плоча и услед пластичних деформација радних материјала око трна алата, доводећи до омекшавања радних плоча. Алат се уз константно обртање креће транслаторно дуж линије споја, меша омекшали материјал, остављајући иза себе метал шава [103].

## 6.1. Математички модел

3D модел Т-споја састоји се од три алуминијумске радне плоче. Алат није моделован. У моделу су коришћене следеће претпоставке:

1. топлота настала у контакту рамена алата и материјала радних плоча је последица трења,
2. трн алата је цилиндричног облика, а навој на трну се занемарује и
3. нема уноса топлоте у материјал радних плоча ако локална температура процеса достигне температуру топљења радних плоча.

Током фазе заваривања алат се креће константном брзином заваривања дуж линије споја. За овакав проблем згодно је да се користи покретни координатни систем који се креће заједно са алатом, уместо коришћења непокретног координатног система. Коришћењем покретног координатног система поједностављује се ЗТМ модел процеса и избегава се компликован модел ЗТМ процеса у околини трна алата.

### 6.1.1. Израз за регулисање процеса

Једначина топлотне проводљивости која се решава у радним плочама дата је изразом (случај Ојлерове формулације са конвекцијом):

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) + q - \rho c v_{zav} \nabla T, \quad (6.1)$$

односно у покретном координатном систему где се алат креће у позитивном смеру  $x$  осе:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q - \rho c v_{zav} \frac{\partial T}{\partial x}. \quad (6.2)$$

С'обзиром да је реч о стационарном процесу, први члан израза је  $\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = 0$ ,

тако да се израз (6.1) своди на:

$$0 = \nabla(-k \nabla T) + \rho c v_{zav} \nabla T - q. \quad (6.3)$$

У датим једначинама се користе следеће величине:

$\rho \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$  густина материјала ,

$c \left[ \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \right]$  специфична топлотна капацитивност,

$T [\text{K}]$  температура,

$t [\text{s}]$  време,

$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}$  диференцијални оператор,

$k \left[ \frac{\text{W}}{\text{mK}} \right]$  проводљивост (кондуктивност),

$q \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^3} \right]$  запремински унос топлоте и

$v_{zav} \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$  брзина заваривања.

Дата диференцијална једначина (6.3) састоји се из два дела:

1.  $\nabla(-k\nabla T)$  представља конвекцију- пренос топлоте која се ствара испод чела и око трна алата и
2.  $\rho c v_{zav} \nabla T$  представља кондукцију- провођење топлоте (топлотни извор се креће).

### 6.1.2. Генерисање топлоте

Генерисање топлоте неопходне за термо-механички процес заваривања јавља се на два места и то [7,17,24]:

1. испод чела рамена алата, односно у контакту рамена алата и материјала радних плоча (*Слика 6.1*, означена површина одговара површини чела алата  $A_{shoulder} = \pi r_{shoulder}^2$ , где  $r_{shoulder}$  представља полупречник рамена алата) и
2. око трна алата, односно у контакту трна алата и материјала радних плоча (*Слика 6.1*, топлотни извор се моделује као рупа у радном материјалу чија површина

одговара површини омотача трна алата  $A_{pin} = h2\pi r_{pin} + \pi r_{pin}^2$ , где  $r_{pin}$  представља полупречник трна, док је  $h$  висина трна алата).

Топлота настала услед дејства трна алата представља само 2% укупне топлоте настале током ЗТМ процеса. Неки истраживачи су дали да је овај проценат око 20% [101]. Дакле, да би се што тачније моделовао процес преноса топлоте код ЗТМ, непоходно је укључити и генерисање топлоте услед трна алата.

#### Генерисање топлоте на контакту чела рамена алата и материјала радних плоча

За топлоту насталу услед трења контактних површина чела алата и дела горњих површина радних плоча испод чела алата коришћен је израз [104].:

$$q_{shoulder} = \mu \frac{F_n}{A_{shoulder}} r_{shoulder} v_{rot}, \quad (6.4)$$

где  $\mu$  представља коефицијент трења који се мења са променом температуре, а у овом моделу је узет да је константан и износи  $\mu = 0,3$ . Силу притиска, односно силу дејства алата на радне плоче у вертикалном правцу нисмо имали услова да меримо, па је узета константна вредност која износи  $F_n = 15\text{kN}$ .  $v_{rot}$  представља брзину обртања алата, која такође има константну вредност [104-107].

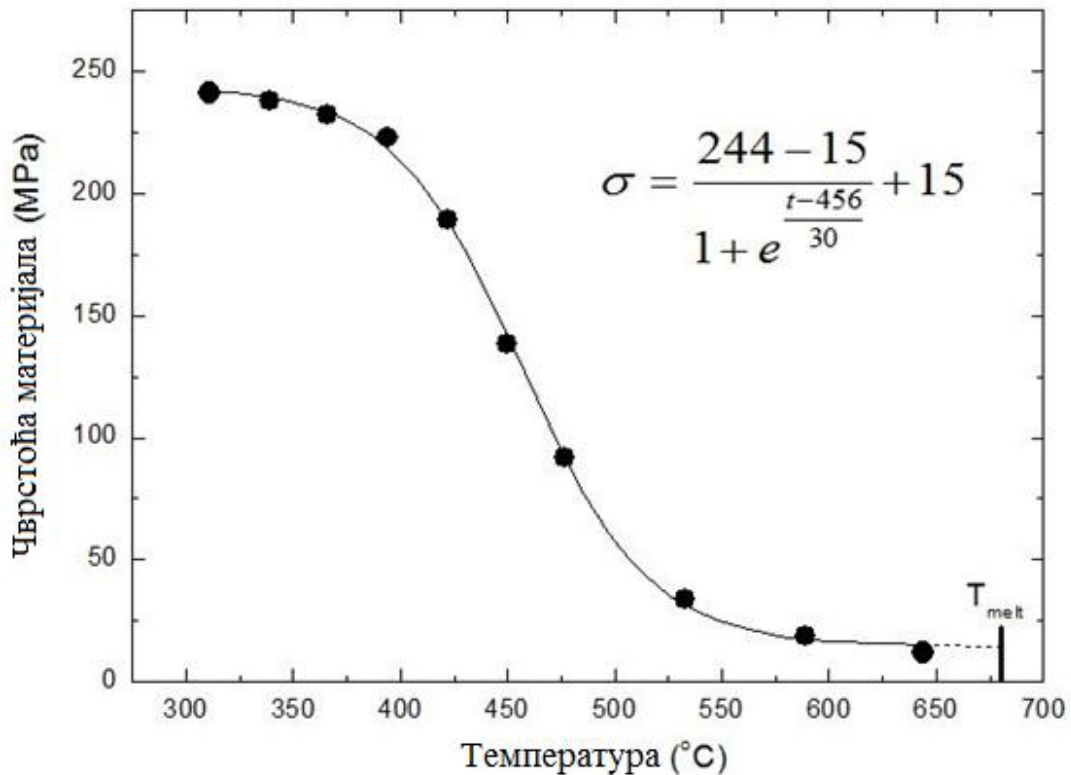
#### Генерисање топлоте на контакту трна алата и материјала радних плоча

Топлота настала услед пластичних деформација материјала радних плоча током заваривања услед дејства трна алата моделована је изразом [108]:

$$q_{pin} = \frac{\mu \pi \sigma h r_{pin}^2 v_{rot}}{\sqrt{3(1 + \mu^2)}}, \quad (6.5)$$

где  $h$  [mm] представља висину трна алата, а  $\sigma \left[ \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2} \right]$  је чврстоћа материјала која се добија из дијаграма зависности чврстоће материјала од температуре (Слика 6.2).





Слика 6.2 Дијаграм зависности чврстоће материјала од температуре, „S“ крива

### 6.1.3. Гранични услови

У овом разматрању коришћена су три гранична услова:

1. Гранични услов топлотног флукса за материјал радних плоча на контакту чела рамена алата и материјала радних плоча је:

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = q, \quad (6.6)$$

где се  $q$  рачуна према изразу (6.4), а  $n$  је вектор нормале на површину радних плоча.

2. Гранични услов топлотног флукса за материјал радних плоча на контакту трна алата и материјала радних плоча је:

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = q, \quad (6.7)$$

где се  $q$  рачуна према изразу (6.5).

3. Гранични услов конвекције за све површине материјала радних плоча које су у додиру са спољним ваздухом:

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_o), \quad (6.8)$$

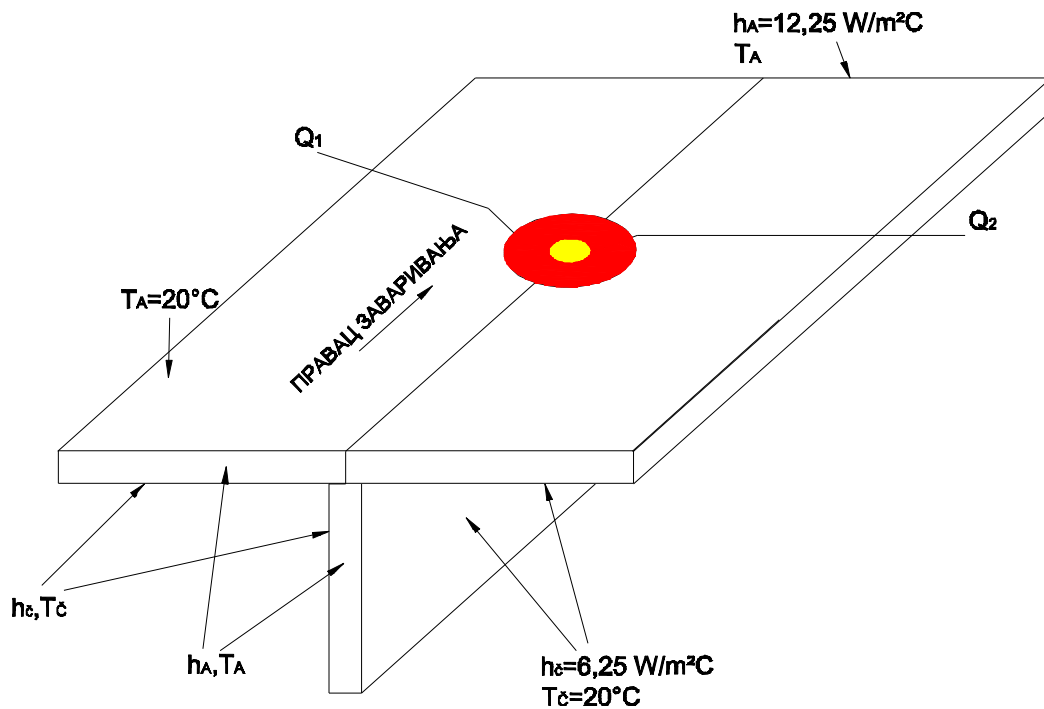
где је  $n$  вектор нормале на површину радних плоча,  $h$  је коефицијент преноса (конвекције) топлоте са радних плоча на спољни ваздух и  $T_o$  представља температуру околног ваздуха.

4. Гранични услов конвекције за све површине материјала радних плоча које су у додиру са подложним плочама:

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_o), \quad (6.9)$$

где је  $n$  вектор нормале на површину радних плоча,  $h$  је коефицијент преноса (конвекције) топлоте са радних плоча на подложне плоче и  $T_o$  представља температуру подложних плоча.

На Слици 6.3 дат је шематски приказ граничних услова узетих у овом разматрању.  $Q_1$  представља место генерисања топлоте услед дејства чела рамена алата на радне плоче, односно  $q_{shoulder}$ .  $Q_2$  представља место генерисања топлоте услед дејства трна алата на материјал радних плоча, односно  $q_{pin}$ .



Слика 6.3 Шематски приказ граничних услова за 3ТМ Т-споја

Типична вредност коефицијента преноса топлоте у литератури износи око  $h_{air} \approx 10 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$  за пренос топлоте са радних плоча у околни ваздух (*air-transfer*), и  $h_{bottom} \approx 1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$  за пренос топлоте са радних на подложне плоче [104-106].

#### 6.1.4. Почетни услов

Почетни услов је рачунат према:  $T(x, y, z, 0) = T_i$ . Почетна температура процеса је износила 300K.

Наредно поглавље 6.2 разматрано је да би се боље сагледао утицај брзине обртања алата и брзине заваривања као два основна технолошка параметра заваривања на простирање температурних поља кроз спој.

## 6.2. Утицај улазних технолошких параметара заваривања на генерисање топлоте код заваривања трењем са мешањем сучеоног споја

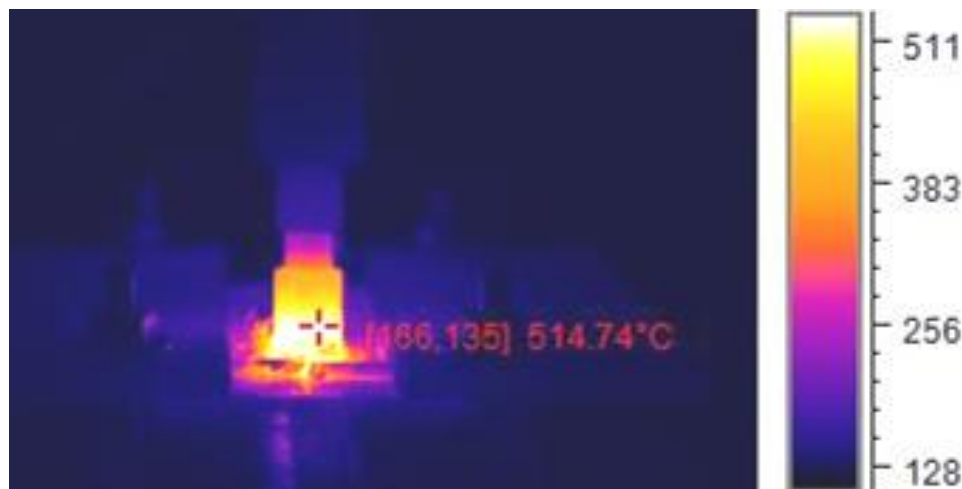
Под експерименталним и нумеричким истраживањем у оквиру ове докторске тезе обухваћено је и наредно разматрање. Утицај улазних параметара процеса заваривања на температуру процеса при заваривању сучеоног споја од алуминијумске легуре 6061-T6 је анализиран експерименталним и нумеричким методама у циљу верификације добијених резултата наведеним методама. Експерименталним и нумеричким методама процењене су максималне температуре које се могу јавити током процеса ЗТМ, на основу топлотног улаза. Топлотни улаз је разматран за различите вредности параметара заваривања, и то брзине обртања алата  $v_{rot}$  и брзине заваривања  $v_{zav}$  [109-112].

У Табели 6.1 приказани су параметри заваривања за 4 различите заварене пробе (проба 1, проба 2, проба 3 и проба 4), као и одговарајуће максималне температуре које су се појавиле током процеса заваривања мерене камером са инфрацрвеним зрацима „CHAUVIN ARNOX С.А. 1888“ [113].

Табела 6.1 Параметри процеса и одговарајућа вредност максималне температуре процеса

Редни број пробе	Брзина обртања алата $\left[ \frac{\text{obr}}{\text{min}} \right]$	Брзина заваривања $\left[ \frac{\text{mm}}{\text{min}} \right]$	Максимална вредност температуре [°C]
1	500	25	482 (измерена)
2	710	25	519 (измерена)
3	1000	25	539 (измерена)
4	710	40	515 (измерена)
5	500	40	479 (израчуната)

Типични изглед снимка добијеног коришћењем ове камере приказан је на *Слици 6.4* и може се уочити да је максимална присутна температура у том тренутку износила 514,74 °С .



*Слика 6.4 Фотографија процеса ЗТМ снимана инфрацрвеном камером*

Један од најједноставнијих начина да се израчуна максимална температура је да користити следећи израз [114]:

$$\frac{T}{T_{\text{топљења}}} = K \left( \frac{v_{\text{rot}}^2}{v_{\text{зав}} \cdot 10^4} \right)^\alpha, \quad (6.10)$$

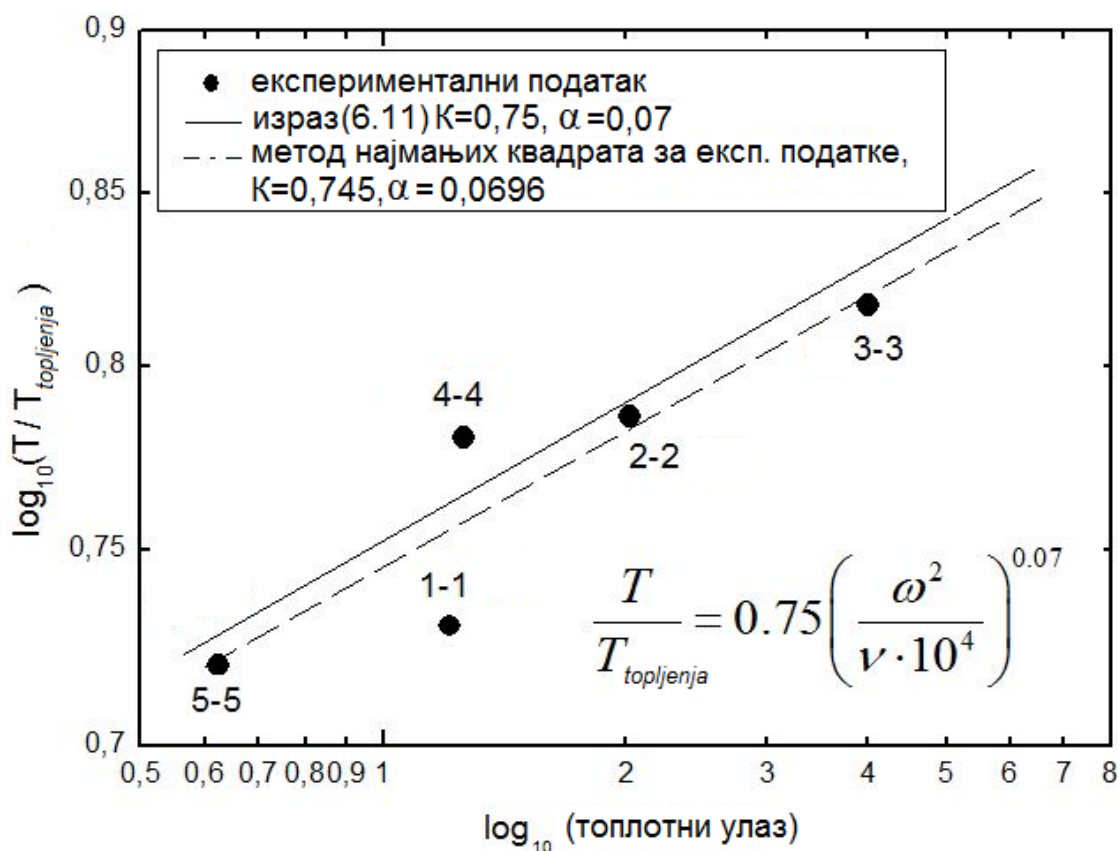
где је  $T$  [°С] максимална температура,  $T_{\text{топљења}}$  температура топљења,  $0,65 < K < 0,75$  и  $0,04 < \alpha < 0,06$  су корекциони фактори. Из *Табеле 6.1* видимо да су више вредности температуре када је већа брзина обртања алата а мања брзина заваривања. Такође, примећује се да већи утицај на температуру процеса има брзина обртања алата од брзине заваривања.

Експериментално измерене температуре приказане у *Табели 6.1* су испитиване због потврде израза (6.10). Резултат овог испитивања је приказан на *Слици 6.5*. Метода најмањих квадрата примењена је на експериментално добијеним подацима. Линеарна зависност је показала да су добијени добри резултати, одступања су мања од  $\pm 20^\circ\text{C}$  када је мањи улаз топлоте (проба 1, тачка 1-1). Анализа најмањих квадрата

указује на то да су највеће измерене температуре биле око горње границе за коефицијент  $K$  ( $K = 0,754 \approx 0,75$ ) и изнад горње границе за коефицијент  $\alpha$  ( $\alpha = 0,069 \approx 0,07$ ), према изразу (6.10). Према томе, коришћењем израза (6.10) добија се приближна веза између максималне температуре и основних параметара заваривања, односно топлотни улаз:

$$\frac{T}{T_{melt}} = 0.75 \left( \frac{\omega^2}{\nu \cdot 10^4} \right)^{0.07} \quad (6.11)$$

Израз (6.11) је добијен експерименталним испитивањем 4 узорка (тачка 1-1, тачка 2-2, тачка 3-3 и тачка 4-4). Тачка 5-5 је добијена израчунавањем израза (6.11).



Слика 6.5 Метода најмањих квадрата примењена на највећу измерену вредност температуре сваке пробе

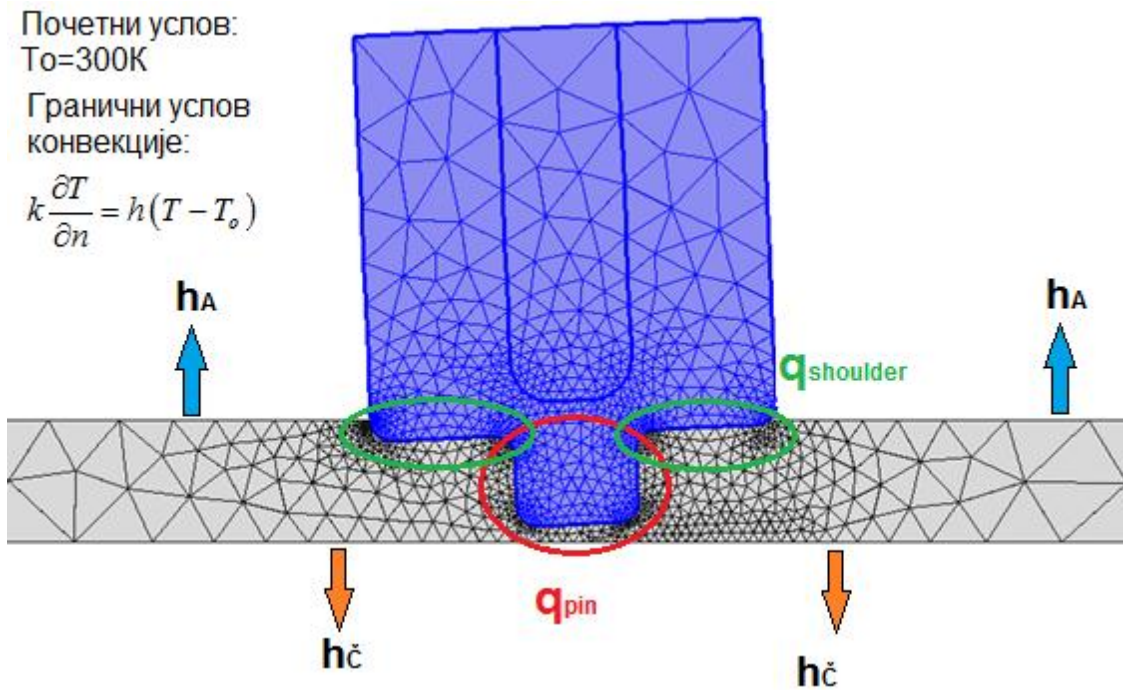
Изразом (6.10) наглашен је утицај два главна параметра на максималну температуру и улазну топлоту процеса ЗТМ и то брзине обртања алата и заваривања. Међутим, укупан унос топлоте је много комплекснији процес који зависи од већег броја процесних параметара и других ствари [111-113]. Да би се боље разјаснио пренос топлоте током ЗТМ плоча од алуминијумске легуре 6061-Т6 урађена је дводимензионална анализа методом коначних елемената. За анализу методом коначних елемената коришћен је софтвер Code Aster. Укупни топлотни флуks је подељен на два дела: топлотни флуks под дејством рамена алата (настао трењем рамена алата по горњим површинама радних плоча) и топлотни флуks услед дејства трна алата (настао услед пластичних деформација око трна алата) [112]. Укупна количина топлоте је дата изразом:

$$q = q_{shoulder} + q_{pin} = 2\pi\mu F_n r_{shoulder} v_{rot} + \frac{2\pi\bar{\sigma}hr_{pin}v_{rot}}{\sqrt{3(1+\mu^2)}}, \quad (6.12)$$

док су величине које учествују у датом изразу претходно објашњене у поглављу 6.1.2 у изразима (6.3) и (6.4). Примећује се да је израз за укупну количину топлоте исти као израз коришћен у овом раду за нумеричку симулацију заваривања Т-споја.

Геометрија, мрежа коначних елемената, гранични услови и почетак процеса дат је на *Слици 6.6*. Термички подаци за легуру 6061-Т6 дати су у *Табели 6.2*. Постоје два гранична услова конвекције:

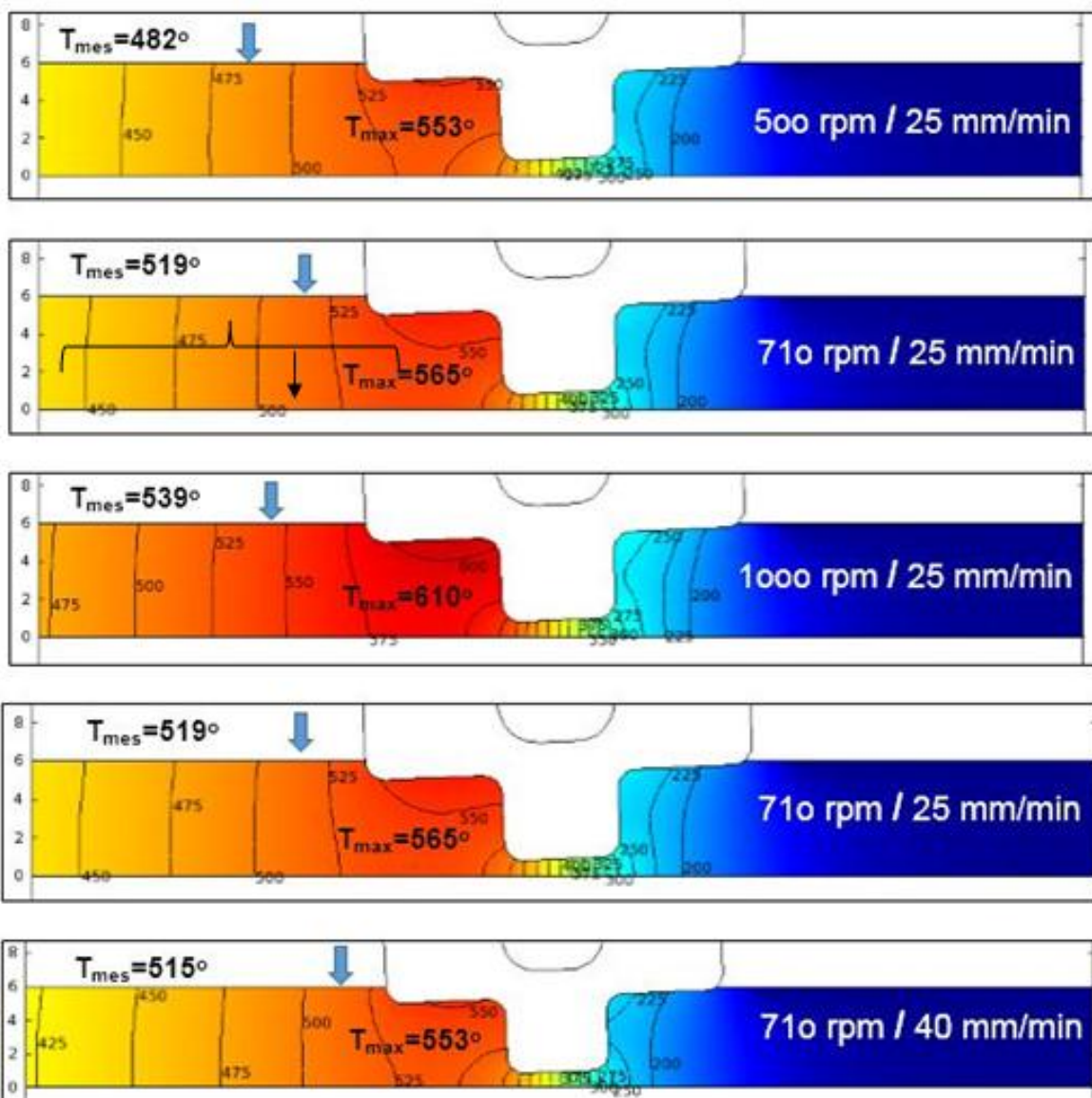
1. за слободне површине радних плоча, односно горње површине које су у контакту са околним ваздухом и
2. за доње површине радних плоча које су у чврстој вези и целом површином налажу на подложну плочу од нерђајућег челика L-316.



Слика 6.6 Геометрија, мрежа коначних елемената, гранични услови и места генерисања топлоте (топлотни улаз) за нумеричку анализу провеса ЗТМ

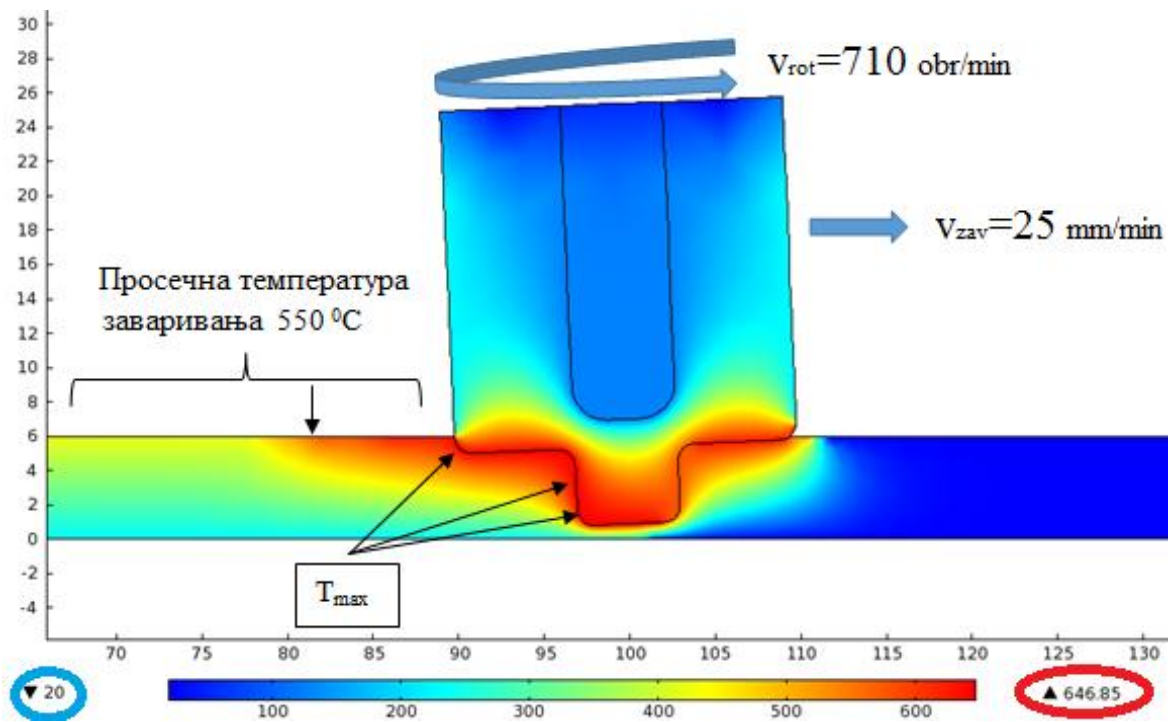
Температуре у неком тренутку добијене нумеричком методом које се јављају током процеса при различитим параметрима заваривања дате су на Слици 6.7.





Слика 6.7 Простирање температуре кроз спој за различите параметре заваривања

Примећује се на *Слици 6.8* да је максимална вредност температуре од  $T = 647^{\circ}\text{C}$  присутна испод чела рамена и у непосредној околини трна алата, али та зона није била доступна инфрацрвеној камери. Међутим, област иза рамена алата је била доступна инфрацрвеној камери и измерене вредности температуре су приближно исте као и вредности израчунате нумеричком методом, од  $T = 550^{\circ}\text{C}$ . Такође, уочава се да је минимална присутна температура износила  $T = 20^{\circ}\text{C}$ .



Слика 6.8 Метода коначних елемената коришћена за симулацију процеса ЗТМ.

*Простирање температурних поља током симулације заваривања*

На основу нумерички и експериментално добијених резултата испитивања утицаја улазних технолошких параметара заваривања на простирање температурних поља кроз сучеоне спојеве од алуминијумске легуре 6061-T6 може се закључити следеће:

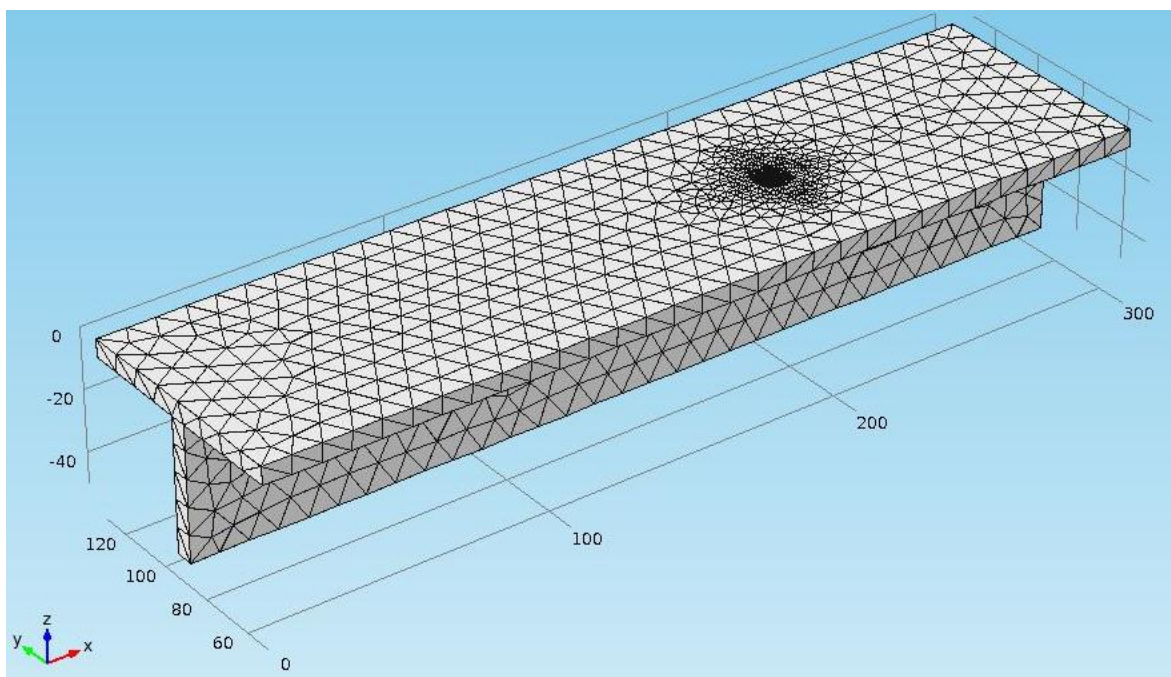
- температуре измерене инфрацрвеном камером и израчунате нумеричким путем су приближно једнаке и
- коришћен израз (6.10) се показао као добро аналитичко средство за успостављање зависности између максималне температуре процеса и основних параметара процеса заваривања, односно брзине обртања алата и брзине заваривања.

Ово разматрање иако обухвата сучеоне спојеве стављено је у текст дисертације да би се верификовали експериментално и нумеричком методом добијени резултати, као и да би се потврдили модели за топлотне изворе, односно изрази (6.4), (6.5) и (6.12).

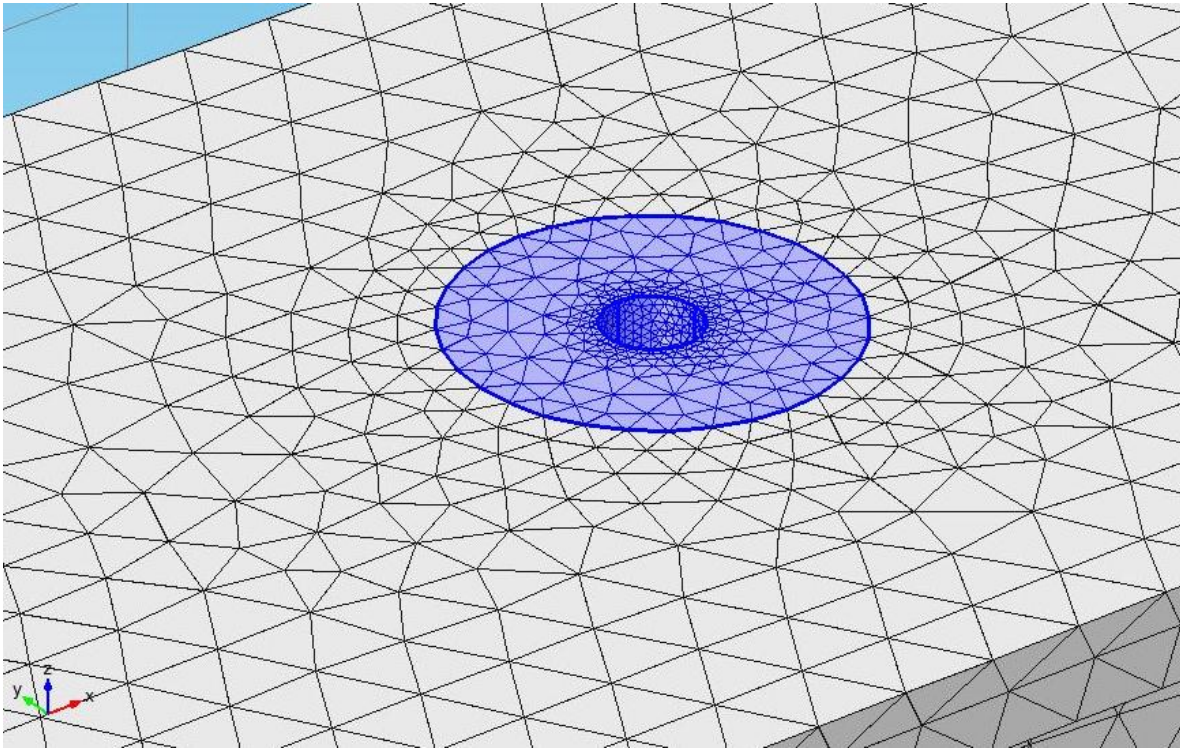
Према томе, коришћени модели топлотних извора код сучеоних спојева могу се користити и при симулацијама заваривања Т-спојева.

### 6.3. Мрежа коначних елемената

Мрежа коначних елемената мора бити квалитетна из разлога што је проце ЗТМ праћен веома великим пластичним деформацијама у ЗТМУ [115]. На *Слици 6.9* приказана је генерисана мрежа на моделу, а на *Слици 6.10* дат је увећан приказ мреже на месту чела и трна алата.



*Слика 6.9 Мрежа коначних елемената генерисана на 3D моделу Т-споја*



*Слика 6.10 Увећан приказ мреже коначних елемената на месту дејства чела рамена алата и трна алата на материјал радних плоча*

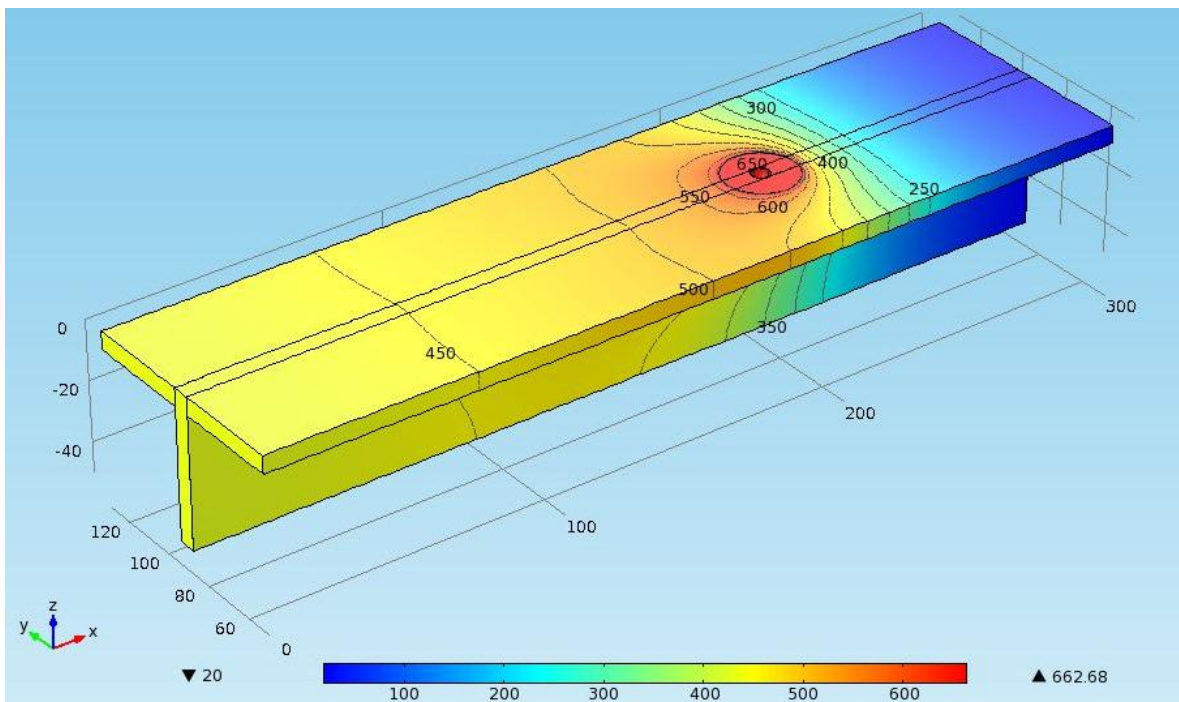
Поступак решавања проблема и његова сложеност много зависи од претпоставки начињених приликом подешавања заваривања, граничних услова и врсте топлотног извора. Процесни параметри су приказани у *Табели 6.2*.

Табела 6.2 Параметри за нумеричку симулацију процеса заваривања и димензије алата

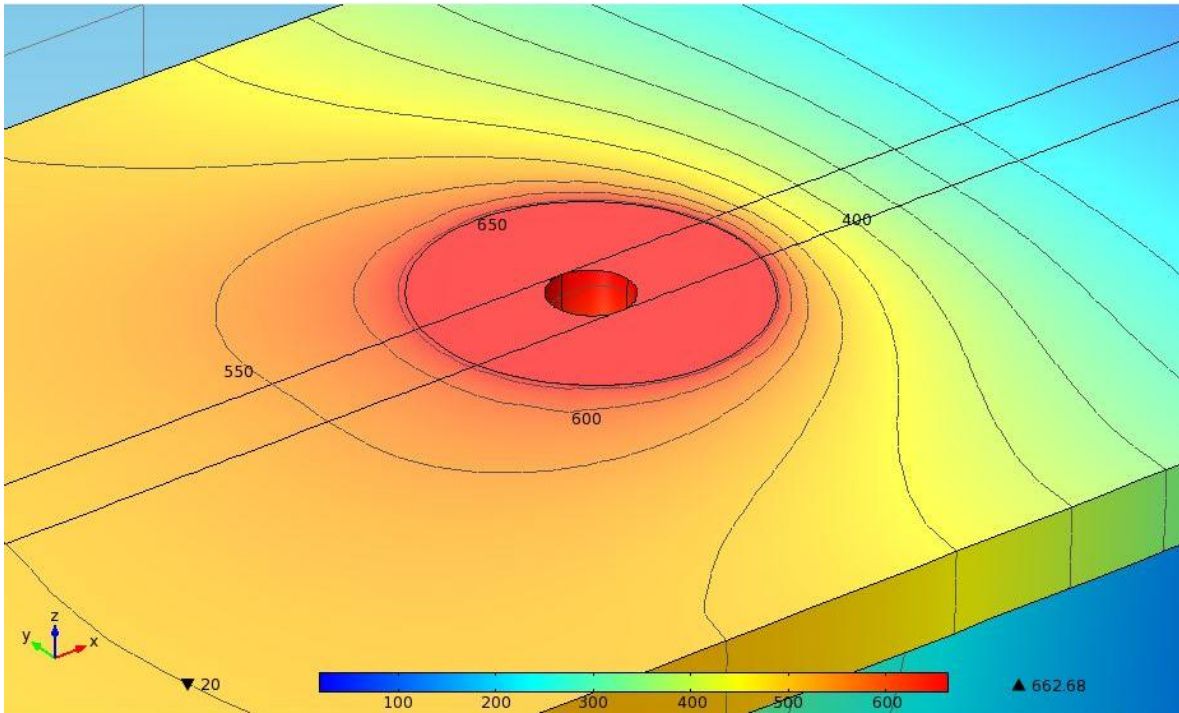
Ознака	Вредност параметра
$v_{zav} \left[ \frac{\text{mm}}{\text{s}} \right]$	1,59
$v_{rot} \left[ \frac{\text{obr}}{\text{min}} \right]$	500
$h_A \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$	12,25
$h_c \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$	6,25
$\mu$	0,4
$\varepsilon$	0,3
$T_{početno} [\text{K}]$	300
$T_{topljenja} [\text{K}]$	933
$F_n [\text{kN}]$	15
$r_{pin} [\text{mm}]$	2,5
$r_{shoulder} [\text{mm}]$	12,5
$h [\text{mm}]$	5,5
$k \left[ \frac{\text{W}}{\text{mK}} \right]$	160
$\rho \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$	2700
$c \left[ \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \right]$	900

## 7. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА НУМЕРИЧКОМ МЕТОДОМ ДОБИЈЕНИХ РЕЗУЛТАТА

На *Слици 7.1* приказана су температурна поља на моделу Т-споја, док је на *Слици 7.2* дат увећан приказ распореда температурних поља на местима генерисања топлоте. Температурна поља су симетрична у односу на уздужну осу споја која прати правац линије спајања плоча. Највећа вредност температуре која се јавља током нумеричке симулације процеса заваривања износи  $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ , односно  $933\text{ K}$ .

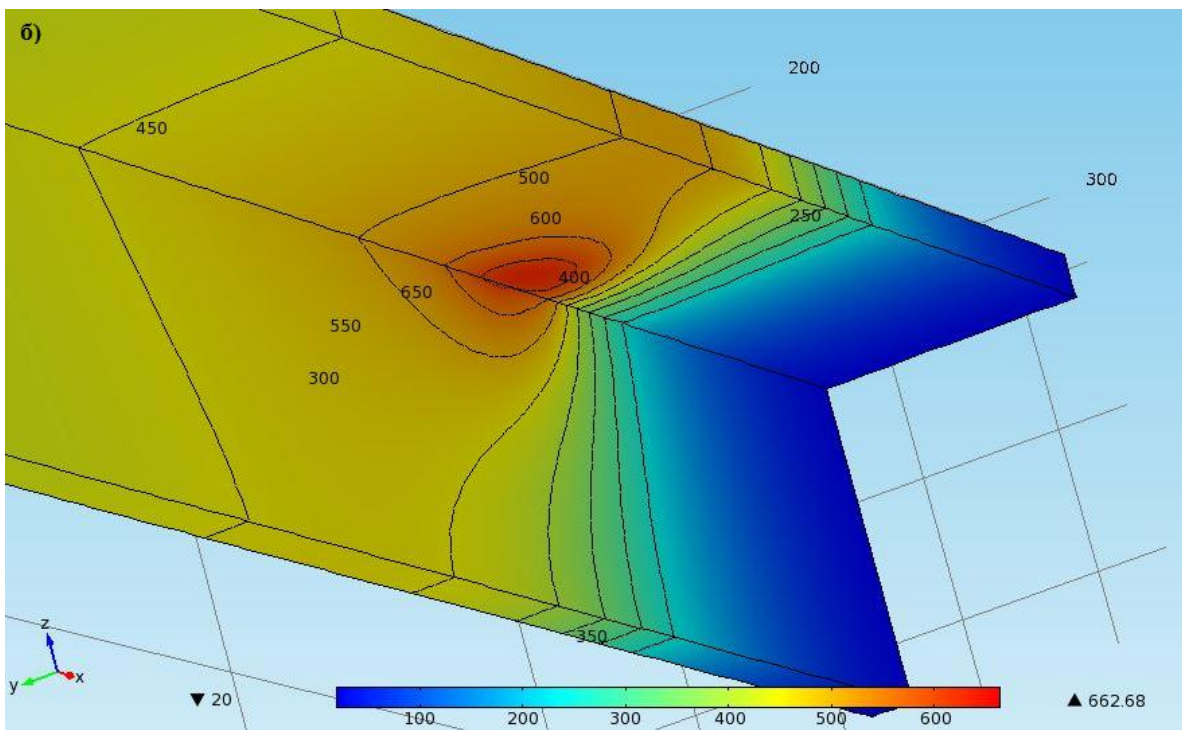
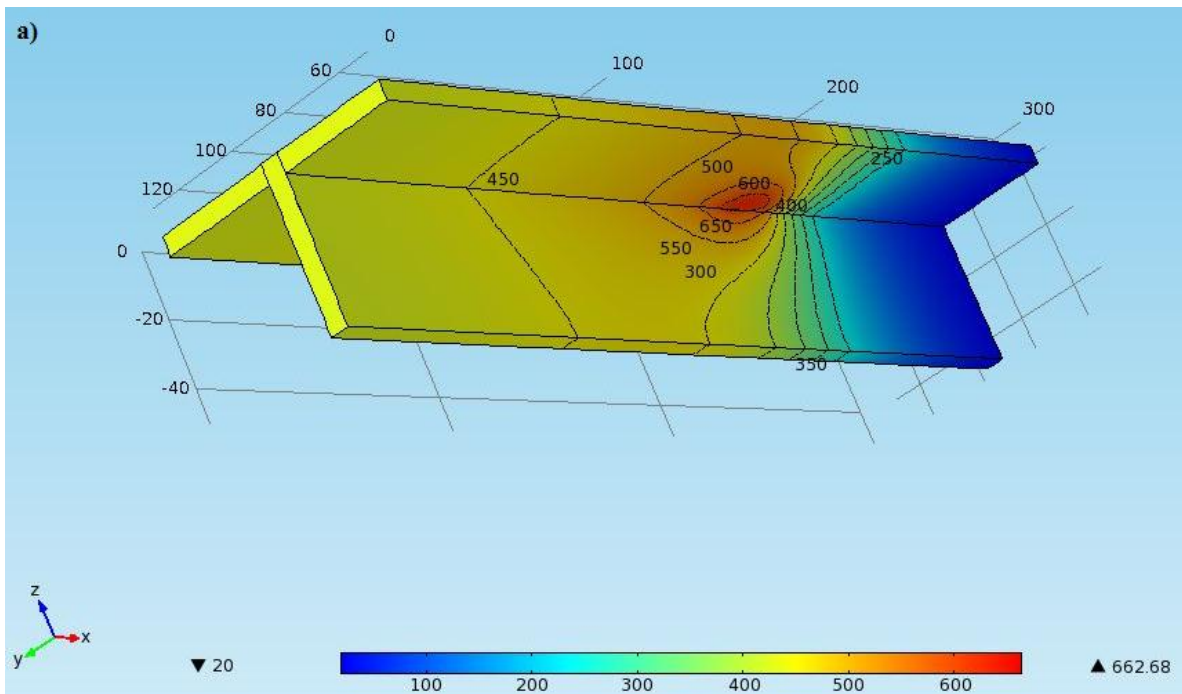


*Слика 7.1* Распоред температурних поља на моделу Т-споја



*Слика 7.2 Распоред температурних поља на местима генерисања топлоте*

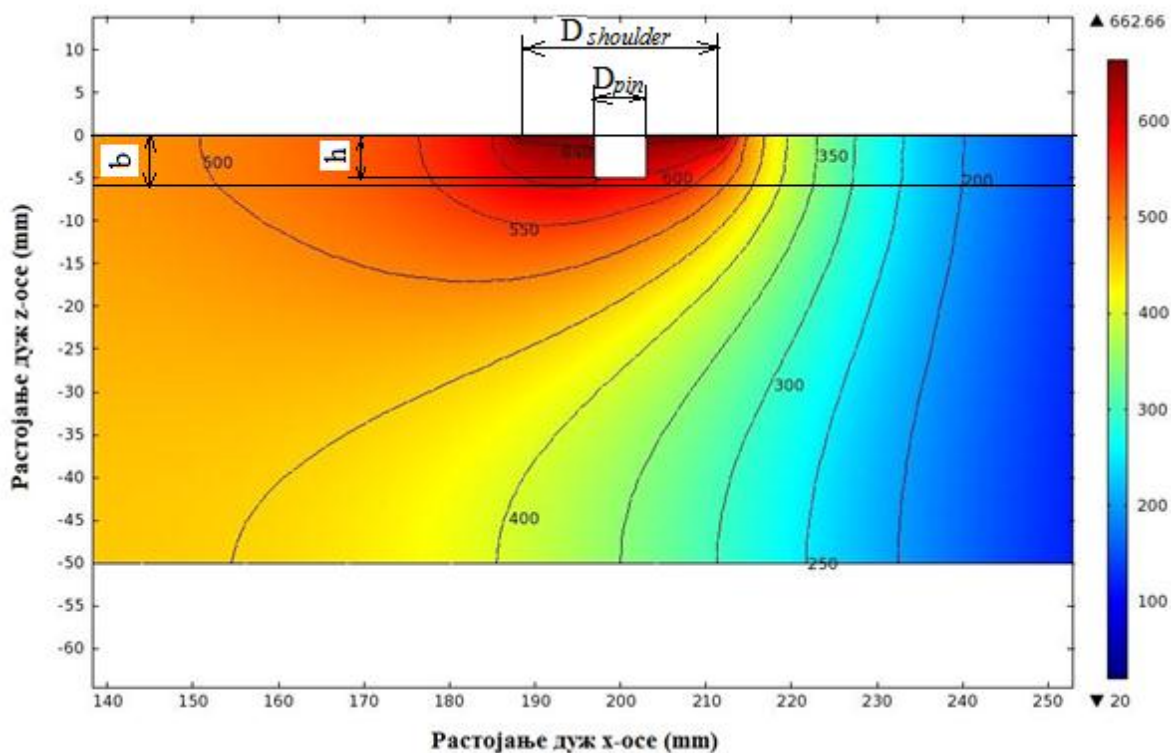
На *Слици 7.3 а)-б)* приказан је распоред температурних поља на моделу Т-споја посматраног са стране где су радне плоче у контакту са подложним плочама.



Слика 7.3 Распоред температурних поља посматран са стране где су радне плоче у контакту са подложним плочама



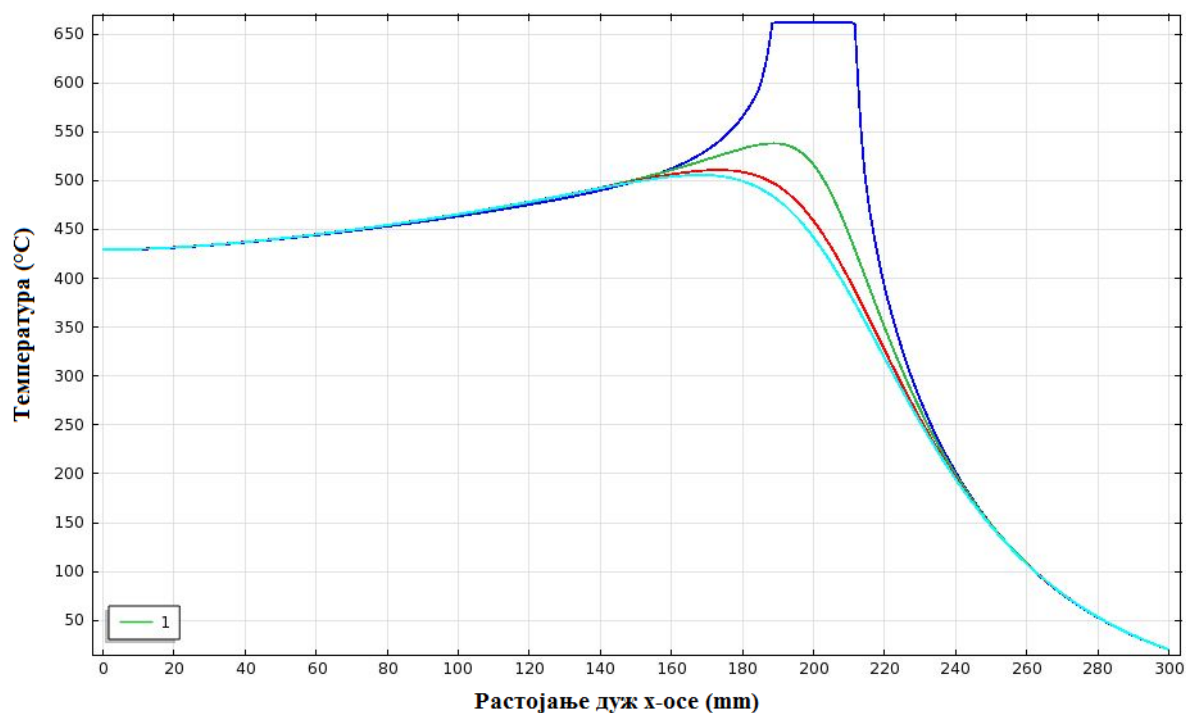
Приказ распореда температурних поља посматран кроз пресек споја у правцу линије спајања ( $x$ -оса) дат је на *Слици 7.4*. Очекивано, највеће вредности температуре присутне су у области непосредно око извора топлоте, односно испод чела рамена алата и у непосредној околини трна алата.  $D_{shoulder}$  представља пречник чела рамена и износи 25mm,  $D_{pin}$  је пречник трна алата од 5mm, висина трна алата  $h$  је 5,5mm, док је са  $b$  означена дебљина радних плоча која износи 6mm.



*Слика 7.4* Распоред температурних поља посматран у  $x$ - $z$  равни

Када се извор топлоте или алат, а у овом разматрању место генерисања топлоте креће дуж  $x$ -осе могу се уочити различите вредности температура на различитим местима, а то је приказано на *Слици 7.5*. Дијаграм приказан љубичастом линијом представља расподелу температуре кроз средину споја, заправо тачке која се налази на самом врху трна алата а у његовом центру, у зависности од датог растојања на  $x$ -оси. Зеленом бојом је приказан дијаграм расподеле температуре тачке која се налази

на тангенти чела рамена алата у зависности од датог растојања дуж  $x$ -осе. Црвена и светло плава линија такође представљају дијаграме заисности температура неких тачака које су на још већој удаљености од чела рамена алата, од истог датог растојања на  $x$ -оси.



Слика 7.5 Дијаграми расподеле вредности температура на различитим местима у зависности од померања извора топлоте дуж  $x$ -осе

Важно је да током процеса заваривања трењем са мешањем знамо у сваком тренутку вредност температуре процеса. Температура процеса не би требала да прелази температуру топљења материјала који се заварују. Експерименталним испитивањем у поглављу 6.2 коришћена је камера са инфрацрвеним зрацима која је мерила температуру али само на површинама радних плоча. Нумеричком симулацијом процеса заваривања добијене су вредности температура не само на површинама радних плоча него и кроз спој легуре. Тиме се боље прати температура која се јавља током процеса заваривања.

Променом улазних технолошких параметара заваривања мења се и температура процеса што нам је израз (6.10) и потврдио. У овом разматрању варирани су само брзина ротације алата и брзина заваривања. Недовољно генерисање топлоте при симулацији заваривања једне пробе је настало услед смањења броја обртаја алата и превелике брзине заваривања [106].

Изрази (6.4) и (6.5) показали су се као добри за моделовање топлотних извора јер је дошло до велике сличности температура на површини радних плоча измерених камером са инфрацрвеним зрацима и израчунатих нумеричким путем.

Методом коначних елеманата урађена је и симулација процеса заваривања трењем са мешањем две плоче у Т-спој истих димензија и са истим технолошким параметрима заваривања, као што је приказано у тачкама рада 6.1, 6.2 и 6.3. Добијени резултати, односно расподела температурних поља кроз Т-спој добијен заваривањем две плоче је идентична као и код Т-споја добијеног заваривањем три плоче. Из тог разлога ово разматрање није представљено али је значајно споменути га. Исте вредности температура присутних током процеса заваривања су биле и очекиване из разлога што су радне плоче које се заварују биле од истог материјала. Коефицијент преноса топлоте  $h$  [W/m<sup>2</sup>K] ту има најзначајнију улогу. Према томе, да је требало заварити у Т-спој две и три радне плоче од различитог материјала дошло би до промене граничних услова, а тиме би се добио другачији распоред температурних поља.

Коришћењем нумеричке симулације процеса заваривања трењем са мешањем свакако се смањују трошкови експерименталног истраживања као и неопходно време.

## 8. ЗАКЉУЧАК

Циљ истраживања у оквиру ове дисертације био је да се освоји технологија заваривања трењем са мешањем Т-спојева од легуре алуминијума. Анализиран је утицај технолошких параметара заваривања на механичке и структурне карактеристике Т-спојева од алуминијумских легура 5052-Н32 и 5754-Н111. У раду су варирани различити параметри заваривања да би се оценио утицај унете топлотне енергије на понашање материјала метала шава и квалитет завареног споја. Укупно је заварено 16 проба, 7 у првој и 9 проба у другој фази експерименталног рада. Варирани параметри заваривања кретали су се у наведеном опсегу, и то у првој фази експерименталног рада: брзина заваривања  $v_{zav}=24\div 73$  mm/min, брзина обртања алата  $v_{rot}=600\div 950$  obr/min, дубина урањања алата у радни материјал  $a=5,3\div 5,9$  mm и угао нагиба алата  $\alpha=0\div 1,5^\circ$ . Корак заваривања, односно однос брзине обртања алата и брзине заваривања је износио  $v_{rot}/v_{zav}=8,20\div 39,58$  obr/mm. У другој фази експерименталног рада параметри су се кретали у опсегу: брзина заваривања  $v_{zav}=27\div 60$  mm/min, дубина урањања алата у радни материјал  $a=5,6\div 5,8$  mm, корак заваривања износио је  $v_{rot}/v_{zav}=15,83\div 35,19$  obr/mm, док угао нагиба алата  $\alpha=1^\circ$  и брзина обртања алата  $v_{rot}=950$  obr/min нису варирани.

Специјални алат коришћен за заваривање поступком ЗТМ израђен од алатног челика Н13, који је након машинске израде термички обрађен на тврдоћу од 40÷52 HRC има одличну постојаност у процесу заваривања.

На постојећој нумерички управљаној алатној глодалици типа Првомајска АГ 400-МИНА успешно су заварени сви Т-спојеви.

Конструисана су и израђена два специјална стезна помоћна прибора. Материјал стезног помоћног прибора који је коришћен у првој фази експерименталног рада је угљенични челик S355. Његово коришћење је довело до одвођења дела топлоте из зоне заваривања неопходне за успешно одвијање процеса и зато су сви испитивани спојеви имали грешке у металу шава. У другој фази експерименталног рада елементи стезног помоћног прибора су били од нерђајућег челика класа 1.4301 и 1.4541. Макроструктурним испитивањем све испитиване заварене пробе из друге фазе су

биле без грешака. Нерђајући челик познат као лош проводник топлоте одабран је за израду елемената стезног помоћног прибора коришћеног у другој фази експерименталног рада да би се током заваривања одвођење генерисане топлоте из зоне заваривања svelo на најмању меру, односно да би губици топлоте били што мањи, а термичка ефикасност процеса била већа.

Освојена је технологија заваривања трењем са мешањем алуминијумских плоча дебљине 5 mm од легуре 5754-N111. Са дефинисаним технолошким параметрима заваривања добијени су Т-спојеви без грешака.

Испитивање произведених Т-спојева је урађено у акредитованим лабораторијама. Испитивањем макроструктуре попречног пресека заварених спојева уочено је постојање области грумена, ЗТМУ и ЗУТ-а, њихов положај и облик. Величина грумена се разликује од тога да ли је заваривање извршено једним или са два пролаза алата. Највећа ширина грумена добијена је при заваривању три плоче од легуре 5754-N111 са два пролаза алата при брзини обртања алата 950 obr/min, брзини заваривања 27 mm/min, дубини урањања алата  $a = 5,6$  mm и углу нагиба алата  $\alpha = 1^\circ$ . У области грумена добијена је рекристалисана ситнозрна структура која се јасно уочава на макроскопским снимцима. Структуру ЗТМУ карактеришу деформисана зрна, јасно се уочавају у овој зони линије тока размекшалога материјала у металу шава услед дејства трна и чела рамена алата током заваривања. ЗУТ је због мале количине унете топлоте слабо уочљива и не могу се јасно утврдити њене границе.

Расподела микротврдоће кроз пресек спојева од легуре 5052-N32 показује да је у целом завареном споју дошло до пада нивоа микротврдоће у односу на основни материјал. Највећи пад микротврдоће код свих испитиваних спојева забележен је у ЗТМУ на страни уз ЗУТ. Област грумена је део завареног споја са највећом микротврдоћом. До пораста микротврдоће у грумену долази услед смањења величине зрна. Смањење брзине заваривања повећава ниво микротврдоће у грумену.

Нумеричка симулација заваривања три плоче и израда термо-механичког 3D модела Т-споја је урађена у циљу бољег развијања технологије заваривања трењем са мешањем Т-спојева.

Тродимензионална нелинеарна анализа заваривања трећем са мешањем Т-спојева је урађена методом коначних елемената. Добијене расподеле температурних поља код Т-спојева су другачије у односу на сучеоне спојеве где се температура простире у виду концентричних кругова. Разлог томе је геометрија Т-споја.

Симулација процеса ЗТМ применом методе коначних елемената предвиђа температуре које су присутне у основним структурним зонама споја: грумену, зони термомеханичког утицаја и зони утицаја топлоте. Јасно се види велика разлика вредности температура код радних плоча у зони грумена и ЗТМУ од осталих делова плоча.

Током експерименталног заваривања праћена је промена температуре на површинама радних плоча камером са инфрацрвеним зрацима и упоређена је са нумерички добијеним резултатима. Тако је верификован модел за симулацију процеса заваривања. Коришћен израз (6.10) се показао као добро аналитичко средство за успостављање зависности између максималне температуре процеса и основних параметара процеса заваривања, односно брзине обртања алата и брзине заваривања. Варирањем технолошких параметара заваривања утиче се на величину топлотног улаза. Доказано је у раду да повећање брзине обртања алата повећава и величину генерисане топлоте.

Температурна поља су симетрична у односу на осу места извора топлоте. Највеће вредности температуре присутне су у области непосредно око извора топлоте, односно испод чела рамена алата и око трна алата и износе 650 °С.

У Србији први пут урађено спајање радних плоча од легуре алуминијума у Т-спој поступком заваривања трећем са мешањем. Резултати добијени истраживањем у овој дисертацији поред практичних, имају и шири научни значај јер прегледом литературе је установљено да је јако мали број радова о производњи и испитивању Т-споја датим поступком експерименталним, а још мање нумеричким методама. Добијени резултати могу допринети даљем развоју технологије процеса и производњи спојева без грешака. Нумеричком симулацијом процеса заваривања смањени су трошкови присутни при експерименталном истраживању.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] М. Мијајловић, Д. Милћић, М. Ђурђановић, В. Грабулов, А. Живковић, М. Перовић, *Основни појмови код поступка заваривања трењем са мешањем према AWS D17.3/D17.3M:2010 и ISO 25239-1:2011*, Заваривање и заварене конструкције, vol. 57, бр.2, стр. 61-68, 2012.
- [2] И. Радисављевић, А. Живковић, Н. Радовић, *Елиминација тунела при заваривању трењем алатом легуре Al 5052-H32*, Заваривање и заварене конструкције, vol. 57, бр.1, стр. 5-12, 2012.
- [3] G. Tempus, *Werkstoffe für transport und verkehr- New aluminium alloys and fuselage structures in aircraft design*, EADS Airbus GmbH Bremen ETH Zürich, Switzerland, 2001.
- [4] Д. Живојиновић, *Примена механике лома на процену интегритета заварених конструкција од легуре алуминијума*, Докторска дисертација, Машински факултет Универзитета у Београду, 2013.
- [5] Д. Стаменковић, М. Ђурђановић, Д. Митић, *Заваривање поступком "FSW"*, Заваривање и заварене конструкције, vol. 57, бр.2, стр. 59-66, 2006.
- [6] <http://www.esab.de/de/de/support/upload/fsw-technical-handbook.pdf>
- [7] R. Nandan, T. DebRoy, H. K. D. H. Bhadeshia, *Recent Advances in Friction Stir Welding – Process, Weldment Structure and Properties*, Progress in Materials Science, vol. 53, 980-1023, 2008.
- [8] T. K. Khairuddin, A. Jamaluddin, H. Zuhailawati and P. A. Indra, *Principles and Thermo-Mechanical Model of Friction Stir Welding*, Welding Processes- book edited by Radovan Kovacevic, 2012.
- [9] Д. Вељић, *Експериментална и нумеричка термо-механичка анализа процеса заваривања трењем мешањем легуре алуминијума високе чврстоће*, Докторска дисертација, Машински факултет Универзитета у Београду, 2011.
- [10] R. S. Mishra, Z. Y. Ma, *Friction stir welding and processing*, Materials Science and Engineering, vol. 50, no. 1-2, pp. 1–78, 2005.

- [11] M. Taiki, K. Atsushi, T. Masato Tsujikawa, H. Makoto, H. Tomotake, H. Kenji, *Dissimilar Welding of Al and Mg Alloys by FSW*, Materials Transactions, vol. 49, no. 5, pp. 1129-1131, 2008.
- [12] M. P. Mubiayi, E. T. Akinlabi, Members of IAENG, *Friction Stir Welding of Dissimilar Materials between Aluminium Alloys and Copper - An Overview*, Proceedings of the World Congress on Engineering 2013, London, U.K., vol.3, 2013.
- [13] C. Thaiping, L. Wei-Bang, *A prime study of FSW joint of dissimilar metals*, Proceedings of the XIth International Congress and Exposition, Orlando, Florida USA, 2008.
- [14] H. Lombard, *Optimized fatigue and fracture performance of friction stir welded aluminium plate: A study of the inter-relationship between process parameters, TMAZ, microstructure, defect population and performance*, PhD Thesis, Faculty of Technology Plymouth University, 2007.
- [15] G. Zacharias, *Analysis of material flow around a retractable pin in a friction stir weld*, PhD Thesis, Faculty of Engineering, Port Elizabeth Technikon University, South Africa, 2003.
- [16] A. Живковић, *Утицај геометрије алата за поступак заваривања трећем помоћу алата на својства завареног споја легуре Al 2024*, Докторска дисертација, Машински факултет Универзитета у Београду, 2011.
- [17] R. Naidu, *Friction Stir Welding: Thermal effects of a parametric study on butt and lap welds*, Shivaji University, India, 2006.
- [18] M. Grujicic, G. Arakere, B. Pandurangan, A. Hariharan, C. F. Yen, B. A. Cheeseman, *Development of a Robust and Cost-Effective Friction Stir Welding Process for Use in Advanced Military Vehicles*, Journal of Materials Engineering and Performance, vol. 20, 2011.
- [19] Y. N. Zhang, X. Cao, S. Larose, P. Wanjara, *Review of tools for friction stir welding and processing*, vol. 51, no. 3, pp. 250-261, 2012.
- [20] M. Jayaraman, R. Sivasubramanian, V. Balasubramanian, A. K. Lakshminarayanan, *Optimization of process parameters for friction stir welding of cast aluminium alloy*



- A319 by Taguchi method*, Journal of Scientific & Industrial Research, vol. 68, pp. 36-43, 2009.
- [21] J. Hilgert, *Knowledge based process development of bobbin tool friction stir welding*, PhD Dissertation, Technischen Universitat Hamburg, 2012.
- [22] R. S. Misra, M. W. Mahoney, *Friction stir welding and processing*, pp. 6 – 19, 2007.
- [23] CTC Kragujevac, *Studija slučaja: Zavarivanje trenjem*, Naziv projekta: WBC Virtual Manufacturing Network – Fostering an Integration of the Knowledge Triangle, Podgorica, Crna Gora, 2012.
- [24] A. A. Larsen, *Process optimization of friction stir welding based on thermal models*, PhD Dissertation, Department of Mathematics, Technical University of Denmark, Lyngby, 2009.
- [25] K. Colligan, *Material Flow Behavior during Friction Stir Welding of Aluminum*, Supplement of the welding journal, 1999.
- [26] G. Buffa, L. Fratini, F. Micari, R. Shivpuri, *Material Flow in FSW of T-joints: Experimental and Numerical Analysis*, Int J Master Form, Springer/ESAFORM, no. 1, pp. 1283-1286, 2008.
- [27] H. Fujii, Y. G. Kim, T. Tsumura, T. Komazaki, K. Nakata, *Estimation of Material Flow in Stir Zone during Friction Stir Welding by Distribution Measurement of Si Particles*, Materials Transactions, vol. 47, no. 1, pp. 224- 232, 2006.
- [28] <http://www.me.sc.edu/research/fsw/research/process/mflow.html>
- [29] <http://www.metalworkingworldmagazine.com>
- [30] P. Surendrababu, A. G. Krishna, Ch. S. Rao, *Material Flow Behaviour in Friction Stir Welding Process- A Critical Review on Process Parameters and Modeling Methodologies*, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, vol. 3, no. 6, 2013.
- [31] L. Cui, X. Yang, G. Zhou, X. Xu, Z. Shen, *Characteristics of defects and tensile behaviors on friction stir welded AA6061-T4 T-joints*, Materials Science and Engineering A, pp. 58– 68, 2012.

- [32] T. Santos, P. Vilaça, L. Quintino, *Developments in NDT for Detecting Imperfections in Friction Stir Welds in Aluminium Alloys*, *Welding in the World*, vol. 52, pp. 30-37, 2008.
- [33] W. Thomas, D. Nicholas, D. Staines, P. J. Tubby, M. F. Gittos, *FSW Process Variants and Mechanical Properties*, TWI Ltd (III-1293-04), 2004.
- [34] S. Swalha, J. A. Al-Jarrah, T. Abu-Mansour, N. S. Gharaibeh, *Mechanical properties of aluminium joints welded by friction stir welding*, *International Journal of Mechanical Engineering (IJME)*, vol. 2, no. 3, pp. 77-84, 2013.
- [35] H. J. Liu, H. Fujii, M. Maeda, K. Nogi, *Tensile properties and fracture locations of friction-stir-welded joints of 2017-T351 aluminum alloy*, *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 692–696, 2003.
- [36] P. L. Threadgill, A. J. Leonard, H. R. Shercliff, P. J. Withers, *Friction stir welding of aluminium alloys*, *International Materials Reviews*, vol. 54, no. 2, pp. 49-93, 2009.
- [37] M. B. Prime, R. J. Sebring, J. M. Edwards, J. A. Baumann, R. J. Lederich, *Contour method determination of parent part residual stresses using a partially relaxed FSW test specimen*, *Proceedings of the 2004 SEM X International Congress & Exposition on Experimental and Applied Mechanics*, Costa Mesa, California USA, 2004.
- [38] <http://megastir.com/~media/megastir/files/fswToolGuide.ashx>
- [39] R. Rai, A. De, H. K. D. H. Bhadeshiaand, T. DebRoy, *Review: friction stir welding tools*, *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 16, no. 4, 2011.
- [40] Á. Meilinger, I. Török, *The importance of friction stir welding tool*, *Production Processes and Systems*, vol. 6, no. 1, pp. 25-34, 2013
- [41] Y. N. Zhang, X. Cao, S. Larose, P. Wanjara, *Review of tools for friction stir welding and processing*, vol. 51, no. 3, pp. 250-261, 2012.
- [42] C. B. Fuller, Rockwell Scientific Company, *Friction Stir Tooling: Tool Materials and Designs*, CHAPTER 2, *Friction Stir Welding and Processing* R. S. Mishra, M. W. Mahoney, editors, pp. 7-35, 2007.
- [43] W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needham, P. Temple-Smith, S. W. K. W. Kallee, C. J. Dawes, *Friction stir welding*, UK Patent Application 2306366, 1996.

- [44] C. D. Sorensen, *Friction Stir Welding Tool Designs*, Brigham Young University, ASM International, 2011.
- [45] W. M. Thomas, K. I. Johnson, C. S. Wiesner, *Friction stir Welding - Recent developments in tool and process technologies*, *Advanced Engineering Materials*, no.7, pp. 485–490, 2003.
- [46] <http://www.welding-advisers.com/FSW-equipment.html>
- [47] <http://www.twi-global.com>
- [48] <http://www.holroyd.com/heavy-industries/new-machines/friction-stir-welding.php>
- [49] F. Callahan, *Constructing a Prototype Man-Portable Friction Stir Welding System*, Engineering Consulting Services, NC George Talia, Wichita State University, KS, NSRP SP-7 Meeting Ann Arbor, MI, 2011.
- [50] C. B. Smith, J. F. Hinrichs, *A Comparison of Robotic Friction Stir Welding and Robotic GMAW*, 2002.
- [51] <http://www.alueurope.eu/wp-content/uploads/2012/01/AAM-Joining-3-Friction-stir-welding.pdf>
- [52] C. B. Smith, *Robotic Friction Stir Welding of Tailor Welded Blanks*, Report ATP-1536, Tower Automotive Internal Report, 2000.
- [53] M. Indira Rani, R. N. Marpu, A. C. S. Kumar, *A Study of Process Parameters of Friction Stir Welded AA 6061 Aluminium Alloy in O and T6 Conditions*, *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 6, no. 2, pp. 61- 66, 2011.
- [54] H. Fujji, I. Cui, M. Maeda, K. Nogi, *Effect of tool shape on mechanical properties and microstructure of friction stir welded aluminium alloys*, *Mater Sci. Eng. A*, pp. 25-31, 2006.
- [55] V. Balasubramanian, *Relationship between base metal properties and friction stir welding process parameters*, *Mater Sci. Eng. A*, pp. 397-403, 2008.
- [56] R. Rai, A. De, H. K. D. H. Bhadeshia, T. DebRoy, *Review: friction stir welding tools*, *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 16, no. 4, pp. 325-342, 2011.

- [57] P. M. Miles, T. W. Nelson, R. Steel, E. Olsen, M. Gallagher, *Effects of friction stir welding conditions on properties and microstructures of high strength automotive steel*, Science and Technology of Welding and Joining, vol. 14, no. 3, pp. 228-232, 2009.
- [58] E. T. Akinlabi, S. A. Akinlabi, Friction Stir Welding Process: A Green Technology, International Scholarly and Scientific Research & Innovation, vol. 6, no. 11, 2012.
- [59] <http://aluminium.matter.org.uk/content/html/eng/default.asp?catid=205&pageid=2144416867>
- [60] W. M. Thomas, P. L. Threadgill, E. D. Nickolas, *Friction Stir Welding of Steel: Part Four*, Total Materia, 2008.
- [61] <http://www.tehnomarket.com>
- [62] <http://www.brams.rs/brams-alu-profilu-siroke-namene.php>
- [63] <http://www.mage.at/hr/trzista/ekstrudirani-aluminijski-profilu-za-prvu-ugradnju-oem.html>
- [64] [www.frictionstirlink.com/apps.html](http://www.frictionstirlink.com/apps.html)
- [65] <https://www.grf.bg.ac.rs>
- [66] H. Šuman, *Metalografija*, Zavod za izdavanje udžbenika Socijalističke Republike Srbije, Beograd, 1965.
- [67] D. Seferijan, *Metalurgija zavarivanja*, Građevinska knjiga, Beograd, 1969.
- [68] A.C. Munoz, G. Ruckert, B. Huneau, X. Sauvage, S. Marya, *Comparison of TIG welded and friction stir welded Al-4.5Mg-0.26Sc alloy*, Journal of materials processing technology, vol. 197, pp. 337-343, 2008.
- [69] Metals Handbook, *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, ASM Metals Park, Ohio, vol. 2, 1997.
- [70] A. Седмак, В. Шијачки, А. Милосављевић, В. Ђорђевић, М. Вукићевић, *Машински материјали – 2 део*, Машински факултет, Београд, 2000.
- [71] SRPS С.ТЗ.012, Заваривање и лемљење метала – Листа поступака и означавање поступака заваривања на цртежима, ИСС, Београд, 1991.
- [72] М. Павловић, Љ. Радовић, *Алуминијумске легуре повишене чврстоће за заварене конструкције*, Заваривање и заварене конструкције, vol 57, бр. 3, стр. 99-105, 2001.

- [73] M. R. Johnsen, *Friction Stir Welding Takes Off at Boeing*, The Welding Journal, vol. 78, pp. 35-39, 1999.
- [74] <https://www.outokumpu.com/SiteCollectionDocuments/Austenitic-Standard-Cr-Ni-Grades-Data-sheet.pdf>
- [75] З. Д. Петровић, *Заварене конструкције*, Машински факултет у Подгорици Универзитета Црне горе, 2002.
- [76] Б. Н. Лукић, *Технологије заваривања конструкција од алуминијума и алуинијумских легура*, „ WIPITS“ д.о.о., Ужице, 2013.
- [77] [asm.matweb.com](http://asm.matweb.com)
- [78] <https://www.aalco.co.uk>
- [79] [https://www.alcoa.com/mill\\_products/europe/en/nautical\\_products.asp](https://www.alcoa.com/mill_products/europe/en/nautical_products.asp)
- [80] <https://www.azom.com>
- [81] <https://sb-specialty-metals.com/grades/h13>
- [82] M. Santella, G. Grant, W. Arbegast, *Plunge testing to evaluate tool materials for friction stir welding in Proceedings of the Fourth International Symposium on Friction Stir Welding*, Park City, Utah, USA, pp. 14-16, 2003.
- [83] Д. Вељић, *Технологија заваривања алуминијумских легура трећем помоћу алата*, Магистарски рад, Машински факултет Универзитета у Београду, 2006.
- [84] <http://www.kensmetal.co.ke>
- [85] <http://www.metalravne.com/selector/steels/UTOPMO2.html>
- [86] <http://www.metricmetal.com/products/Grade%20Descriptions/S355%20Grade%20Description.php>
- [87] А. Ђурђевић, А. Седмак, А. Живковић, И. Радисављевић, *Експериментално истраживање заваривања трећем сам мешањем за добијање Т-спојева ос легуре алуминијума*, 39. Јупитер конференција, Београд, 2014.
- [88] SRPS EN-970, Испитивања без разарања - Испитивање заварених спојева изведених топљењем - Визуелно испитивање, ИСС, Београд, 2003.
- [89] SRPS С.А4.040, Механичка испитивања метала – Испитивање тврдоће по Викерсу (од HV 0,2 до испод HV 5), ИСС, Београд, 1986.

- [90] SRPS С.Т3.051, Техника варења метала, Испитивање квалитета заварених спојева– Испитивање разарањем челичних спојева заварених електролучно или плински, ИСС, Београд, 1961.
- [91] A. Đurđević, A. Sedmak, A. Živković, Đ. Đurđević, *Macrostructures, defects and microhardness of friction stir welded T joints of AA 5052 and AA 5754-H111*, 7<sup>th</sup> International Scientific and Expert Conference TEAM 2015, vol. 7, no. 1, pp. 523-527, Belgrade, Serbia, 2015.
- [92] P. Dong, F. Lu, J. K. Hong, *Analysis of Weld Formation Process in Friction Stir Welding*, 1st International Symposium on Friction Stir Welding at Thousand Oaks, Cal, 1999.
- [93] M. J. Peel, A. Steuwer, P. J. Withers, T. Dickerson, Q. Shi, H. Shercliff, *Dissimilar friction stir welds in AA5083-AA6082 Part I: Process parameter effects on thermal history and weld properties*, Metallurgical and Materials Transactions A, vol. 37, pp. 2183–2193, 2006.
- [94] X. Cao, M. Jahazi, *Effect of tool rotational speed and probe length on lap joint quality of friction stir welded magnesium alloy*, Materials and Design, vol. 32, no. 1, pp. 1-11, 2011.
- [95] A. Živković, A. Đurdjević, A. Sedmak, S. Tadić, I. Jovanović, *Defectless T joints made by FSW of Al2024 T351*, accepted for publication in the journal Structural Integrity and Life 15, no.3, 2015.
- [96] A. Oosterkamp, L.D. Oosterkamp, A. Nordeide, *Kissing Bond Phenomena in Solid-State Welds of Aluminium Alloys*, Welding Journal, vol.83, no.8, pp. 225S–231S, 2004.
- [97] S.R. Ren, Z.Y. Ma, L.Q. Chen, *Effect of initial butt surface on tensile properties and fracture behavior of friction stir welded Al-Zn-Mg-Cu alloy*, Materials Science and Engineering A, vol. 479, pp. 293–299, 2008.
- [98] H.N.B. Schmidt, T.L. Dickerson, J.H. Hattel, *Material flow in butt friction stir welds in AA2024-T3*, Acta Materialia, vol. 54, pp. 1199–1209, 2006.
- [99] И. Радисављевић, *Утицај параметара заваривања на својства заварених спојева алуминијумских легура добијених поступком заваривања трењем*

алатом, Докторска дисертација, Технолошко-металуршки факултет Универзитета у Београду, 2014.

- [100] K. Colligan, I. Ucock, K. McTernan, P. Konkol, J.R. Pickens, *Friction Stir Welding of Thick Section 5083-H131 and 2195-T8P4 Aluminum Plates*, Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Symposium on Friction Stir Welding, Kobe Exhibition Center, Port Island, Kobe, Japan, 2001.
- [101] A. Živković, A. Đurđević, A. Sedmak, H. Dascau, I. Radisavljević, Đ. Đurđević, *Friction Stir Welding of T-joints*, 3rd IIW South-East European Welding Congress, Romania, 2015.
- [102] Р. Прокић-Цветковић, О. Поповић, *Заваривање и сродни поступци*, Завод за уџбенике, Београд, 2011.
- [103] A. Đurđević, S. Tadić, A. Sedmak, *Friction stir welding of „T“ joint-Numerical analysis*, 7<sup>th</sup> International Scientific and Expert Conference TEAM 2015, vol. 7, no. 1, pp. 531-534, Belgrade, Serbia, 2015.
- [104] P. Colegrove, *Three dimensional flow and thermal modeling of the friction stir welding process*, Proceedings of the second International Symposium of Friction Stir Welding, Sweden, 2000.
- [105] J. E. Gould, Y. Feng, *Heat flow model for friction stir welding of aluminium alloys*, Journal of Material and Manufacturing Science, 1998.
- [106] M. Song, R. Kovacevic, *A new heat transver model for friction stir welding*, Transaction of NAMRI/SME, vol 30, 2002.
- [107] G. Vručinić, *Zavarivanje i zavarljivost aluminija i legura*, Aluminij i aluminijske legure – rukovanje, priprema, zavarivanje, 5. Seminar, Pula, 2008.
- [108] M. Song, R. Kovacevic, *Thermal modeling of friction stir welding in moving coordinate system and its validation*, International Journal of Machine & Manufacture, vol. 43, pp. 605-615, 2003.
- [109] P. Podrzaj, B. Jerman, D. Klobcar, *Welding defects at friction stir welding*, Metalurgija, vol. 2, no. 54, pp. 387-389, 2015.
- [110] A. Djurdjevic, S. Tadic, R. Kumar, S. Chattopadhyaya, S. Hloch, A. Sedmak, E. Donceva, *Heat input effect of friction stir welding on aluminium alloy AA 6061-T6*

- welded joint*, Thermal Science, paper is accepted for publication, ISSN 0354-9836, 2015.
- [111] D. Veljic, A. Sedmak, M. Rakin, N. Bajic, B. Medjo, D. Bajic, V. Grabulov, *Experimental and Numerical Thermo-Mechanical Analysis of Friction Stir Welding of High Strength Aluminium Alloy*, Thermal Science, no. 18, pp. S29-S38, 2014.
- [112] H. Schmidt, J. Hattel, J. Wert, *An analytical model for the heat generation in friction stir welding*. Modelling Simul. Mater. Sci. Eng. 12, pp. 143–157, 2004.
- [113] D. Veljić, M. Perović, A. Sedmak, M. Rakin, M. Trifunović, N. Bajić, D. Bajić, *A Coupled Thermo-mechanical Model of Friction Stir Welding*, Thermal Science, no. 16, vol.2, pp. 527-534, 2012.
- [114] H. Bisadi, A. Tavakoli, M. T. Sangsaraki, K. T. Saragaraki, *The influences of rotational and welding speeds on microstructures and mechanical properties of friction stir welded Al5083 and commercially pure copper sheets lap joints*, Materials and Design, vol.43. pp. 80–88, 2013.
- [115] A. Đurđević, D. Živojinović, A. Grbović, A. Sedmak, M. Rakin, H. Dascau, S. Kirin, *Numerical simulation of fatigue crack propagation in friction stir welded joint made of Al 2024-T351*, Engineering Failure Analysis, DOI:10.1016/j.engfailanal.2015.08.028, ISSN:1350-6307, 2015.



## **БИОГРАФИЈА**

Име и презиме: Андријана Ђурђевић  
Датум рођења: 23.07.1985.  
Место рођења: Земун  
Породично стање: Удата, једно дете

### Школовање:

1992.-2000. Основна школа „Светозар Милетић“ у Земуну  
2000.-2004. „Политехничка академија“ Нови Београд  
2004.-2010. Студије на Машинском факултету у Београду, одсек Производно машинство  
29.06.2010. Одбрањен дипломски рад на Машинском факултету у Београду, са темом „Пројектовање технолошких процеса и технолошке ћелије за израду фамилије точкова и ролни на принципу групне технологије“ оценом 10  
2011.-до данас Докторске студије на Машинском факултету у Београду. У предвиђеном року (три године) положени сви испити на Докторским студијама са просечном оценом 9,86. Одлуком Декана, а на основу сагласности Већа научних области техничких наука Универзитета у Београду, одобрен рад на Докторској дисертацији са радни насловом „Технологија заваривања трењем са мешањем Т-спојева од легуре алуминијума“.

### Кретање у послу:

Током Докторских студија учествовала је на иновационом пројекту Министарства просвете, науке и технолошког развоја Владе Републике Србије под називом „Освајање технологије израде Т-спојева поступцима фриксионог

заваривањем мешањем“, број пројекта 451-03-2802/2013-16/69, под руководством др Александра Живковића.

Тренутно, учесница је на пројекту основног истраживања Министарства просвете, науке и технолошког развоја Владе Републике Србије „Микромеханички критеријуми оштећења и лома“, број пројекта 174004. Руководилац пројекта је др Марко Ракин, редовни професор на Технолошко-металуршком факултету Универзитета у Београду. Учесница пројекта је од 01.01.2012. године.

Од 2012. године активни је члан Друштва за интегритет и век конструкција „Проф. др Стојан Седмак“.

Запослена је у Иновационом центру Машинског факултета Универзитета у Београду од 1.1.2012. године, тренутно има звање истраживач-сарадник. Држала је вежбе из предмета Техничка механика, Отпорност материјала Б и Машински елементи на Високој инжењерској школи струковних студија „Техникум Таурунум“ у Земуну.

Говори и пише на енглеском језику, а служи се и немачким језиком.

Служи се програмима из пакета MS Office, Solid Works, AutoCAD, Inventor 3D CAD, AnyLogic, Abaqus.

Прилог 1.

## Изјава о ауторству

Потписани-а Андрејана Ђурђевић  
број индекса D43/11

### Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Технологија заваривања шрећем са мешањем  
T-сиојева од легуре алуминијума

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, 3.11.2015.

Андрејана Ђурђевић

Прилог 2.

## Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Андрејана Ђурђевић  
Број индекса D43M  
Студијски програм Заваривање и заварене конструкције  
Наслов рада Технологија заваривања ирењем са мањом Т-стојева  
од легуре алуминијума  
Ментор др Александар Седак, редовни професор на Машинском  
факултету Универзитета у Београду  
Потписани/а Андрејана Ђурђевић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, 31. 2015.

Андрејана Ђурђевић

Прилог 3.

## Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Технологија зваривања шрењем са мешањем  
T-стојева од легуре алуминијума

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда

У Београду, 3.11.2015.

