

**Факултет инжењерских наука
Универзитета у Крагујевцу**

Петар Р. Љушић

**Тема: Примена ERP система у производном процесу
FSW заваривања**

-мастер рад-

Крагујевац, 2019.

**Факултет инжењерских наука
Универзитета у Крагујевцу**



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Информатика у инжењерству

Предмет: Електронско пословање и менаџмент односа са корисницима (ЦРМ)

Број индекса: 359/2017

Петар Р. Љушић

**Примена ERP система у производном процесу
FSW заваривања**

- мастер рад -

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. др Ненад Грујовић - ментор
2. _____
3. _____

Датум
одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру мастер рада са темом „Примена ERP система у производном процесу FSW заваривања“ кандидат треба да:

Представи технологију фриксионог заваривања за формирање спојева у индустрији са посебним освртом на металне и алуминијумске структуре. Применом софтвера за електронско пословање формирати потребну процесну документацију у оквиру реалних производних процеса.

Препоручена литература:

- [1] Стаменковић Д., Ђурђевић М., Митић Д. (2006): Заваривање поступком „FSW“, Међународна конференција „Заваривање 2006“, Златибор
- [2] Mishra R.S, Ma Z.Y (2005): „Friction stir welding and processing“, Center for Friction Stir Processing, Department of Materials Science and Engineering, University of Missouri, USA and Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China
- [3] Rai R., De A., D. H. H. K. Bhadeshia and T. DebRoy (2011): „Review: friction stir welding tools“, Department of Materials Science and Metallurgy, Pennsylvania State University, University Park, PA 16802, USA, Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology, Bombay, Mumbai 400076, India and Department of Materials Science and Metallurgy, University of Cambridge, Pembroke Street, Cambridge CB2 3QZ, UK
- [4] Kaur J. (2016): „Customer Relationship Management: A Study of CRM Policies of Different Companies“, Global Journal of Finance and Management. ISSN 0975-6477 Volume 8, Research India Publications
- [5] Madanhire I., Mbohwa C. (2016): „Enterprise resource planning (ERP) in improving operational efficiency: Case study“, School of Engineering Management, University of Johannesburg, Auckland Park 2006, Johannesburg, 0027, South Africa

Крагујевац, октобар 2019.

Ментор:
Проф. др Ненад Грујовић

Изјава о самосталној изради рада

Изјављујем да сам овај мастер рад урадио самостално, служећи се стеченим знањем и искуством као и наведеном литературом.

359/2017 Петар Љушић

(потпис)

ЗАХВАЛНОСТ

Изработом овог рада руководио је др Ненад Грујовић, редовни професор на факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, коме се захваљујем на изузетном ангажовању, саветима и подршци током рада.

Захваљујем се „IMW INSTITUT“-у на челу са дир. Андрејом Радовановићем, и његовим сарадницима на помоћи, саветима, испитивању заварених спојева и корисним предлозима.

Такође, захваљујем се предузећу „АММ MANUFACTURING doo“ за припрему алата и материјала за заваривање, запосленима на стручним саветима, разумевању и помоћи.

Захваљујем се Милану Симићу на свеобухватним саветима и предлозима за време израде рада.

Владимиру Живановићу на изради алата, помоћи при извођењу експеримената, и издвојеном времену.

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

Резиме

У овом раду биће представљена технологија фриксионог заваривања, анализом литературе и извођењем експеримената FSW поступка заваривања биће дискутовано о технолошким параметрима и геометрији алата. Други део рада се заснива на начину употребе и коришћења ERP софтвера у производним процесима.

Кључне речи: Заваривање трењем са мешањем, Microsoft dynamics NAV

Summary

In this paper will be introduced friction welding technology. We will discuss about technological parameters and tool geometry analyzing the literature and performing experiments of the FSW welding process. The second part of the paper is based on the usage of ERP software in production processes

Keywords: Friction stir welding, Microsoft dynamics NAV

Садржај

1. Увод	1
2. Принцип рада FSW заваривања и његови технолошки параметри	3
2.1 Принципи рада FSW поступка заваривања	3
2.2 Параметри FSW поступка заваривања	6
2.2.1 Утицај броја обртаја алата у FSW поступку заваривања.....	6
2.2.2 Утицај аксијалне силе у FSW поступку заваривања	6
2.2.3 Утицај транслаторна брзине у FSW поступку	6
2.2.4 Геометрија алата	7
2.3 Положаји заваривања	9
2.4 Генерисање топлоте	9
2.5 Материјали који се могу заварити FSW поступком.....	10
2.6 Конвенционалне машине за заваривање поступком трења са мешањем.....	11
2.7 Предности и недостаци	15
3. Нумеричка симулација FSW процеса	18
4. Експерименталне пробе на конвенционалним машинама.....	26
4.1 Конвен. машине коришћене у експерименту FSW заваривања.....	26
4.2 Геометрије алата коришћене у експерименту	30
4.2.1 Екпериментално коришћени импровизовани алати.....	35
4.3 Начини извођења, дискусија и резултати експеримента	36
4.3.1 Експерименти над пластиком.....	37
4.3.2 Експерименти над алуминијумом.....	45
4.3.3 Визуелни резултати FSW поступка применом различите геометрије алата	55
5. Место ERP софтвера у производном процесу	60
5.1 Артикал, саставница и производног поступак	60
5.2 Креирање артикла.....	60
5.3 Креирање саставнице	63
5.4 Креирање производног поступка	64
6. Правци даљег истраживања.....	68
7. Закључак.....	69
8. Литература	70

1. Увод

Friction stir Welding (FSW) је релативно нова неконвенционална метода заваривања која за сада не налази заслужену примену у индустрији, из тог разлога се о овој методи размишља као о технологији будућности. У литератури се могу наћи различити слободни преводи за назив „Friction Stir Welding“, најчешће се као превод узима „Заваривање трењем са мешањем“. Проналазак овог поступка је омогућио заваривање (силом трења) лимова већих дебљина, различитих материјала и у свим положајима. FSW поступак се најчешће користи за заваривање алуминијума, алуминијумских легура, и легура алуминијума са разним челицима. [1]

FSW поступак спада, као и сви поступци заваривања трењем, у групу „зелене технологије“ јер је енергетски економичнији и еколошки чист у односу на друге конвенционалне методе. Добијени заварени спојеви овим поступком су притом високог квалитета. Поступак заваривања трењем са мешањем је експериментално разјашњен и патентиран од стране британског института за заваривање (TWI) 1991.г. Данас се најчешће користи за заваривање лимова великих димензија као што су лимови у бродоградњи, железничкој и авиоиндустрији. [2]

Формирање завареног споја се обавља у чврстој фази, а потребна топлота за заваривање се добија коришћењем специјалног алата. Карактеристика FSW процеса је заправо локално течење материјала у близини алата захваљујући генерисаној топлоти. Алат је цилиндричног облика, на чијем се челу налази трн („pin“). Овај специјални алат ротира око своје осе одређеном брзином и у додиру са материјалом генерише топлоту. На трн-у алата, у зависности од материјала који се заварује, се могу наћи профилисане завојнице. [2]

Први експерименти FSW поступка су извођени на глодалицама, тако што се на радном столу машине налази сучеоно спојени лимови (радни комади) који су причвршћени стегама са свих страна за радни сто, како се у току процеса заваривања неби догодило да лимови услед деловања великих сила крену да се помичу.

Захваљујући FSW поступку је могуће заварити алуминијумске конструкције које спадају у тешко заварљиве (због слабе микроструктуре и порозности споја), дакле без додатка гасова и других материјала, једноставним „мешањем“ материјала. У литератури се налази на податке да је заварен спој овом методом често бољих механичких особина у односу на конвенционалне поступке. [3]

Основна разлика између FSW и осталих метода заваривања трењем је у процесу ослобађања топлоте, односно потребна топлота се не ослобађа директно трењем између елемената споја већ посредством специјалног алата. Пренос топлоте и масе зависи од особина материјала који се заварују, брзине ротације алата, силе притиска на материјал, геометрије и брзине заваривања. [3]

У великим индустријским постројењима, где се обавља серијска производња, најчешће се за FSW поступак користе аутоматизовани роботи, ово омогућава са

идеалном комбинацијом параметара, висок квалитет и прецизност сваког оствареног шава. Ово представља још једну ставку у низу предности овог поступка.

Развој рачунарске технологије је условио широку примену рачунара у скоро свакој врсти пословања, самим тим се појавила и потреба за паметнијим решење целокупног функционисања малих, средњих и великих индустријских компанија. Microsoft Dynamics NAV је софтвер који нуди аутоматизовано решење за планирање ресурса, процеса производње, ланац набавке, продаје, маркетинга, управљање залихама, управљање људским ресурсима, управљање пројектима, као и подршку клијентима.[4]

У првом делу овог рада дефинише се Friction Stir Welding (FSW) метода заваривања, затим се акценат ставља на основне параметре које утичу на овај процес, аналитички модел, експеримент и дискусију.

Други део рада се односи на значај имплементације ERP решења у производном процесу са конкретним примерима и упутством за рад у Microsoft Dynamics NAV софтверском пакету.

2. Принцип рада FSW заваривања и његови технолошки параметри

2.1 Принципи рада FSW поступка заваривања

Принцип рада током FSW заваривања подразумева да не долази до топљења основног материјала, већ се уз генерисану количину топлоте (добијену трењем алата и радног комада) у зони заваривања радни комади нађу у „омекшаном“ односном пластичном стању, и уз помоћ цилиндричног алата са или без профилисаним трном „мешају“ и сједињују. Процес FSW заваривања се према интернационалном стандарду (EN ISO 25239-1:2012-03) може поделити на пет фаза. Прва фаза обухвата покретање машине, односно достизање потребне брзине ротације алата и његово спуштање ка узорцима који се заварују (Слика 1). Друга фаза обухвата продирање трна алата у материјал све до тренутка док чело алата не дође у контакт са материјалом-ова фаза се може назвати фазом продирања. Количина ослобођење топлоте је најмања на почетку а највећа на крају продирања. Већ на крају ове фазе долази до лепљења и нагомилавања материјала радног комада на фрикционе површине алата. Трећом фазом се започиње процес формирања завареног споја, односно транслаторно кретање алата дуж линије спојених узорака. Током треће фазе најинтензивније се генерише топлота на самом фронталном делу трна алата јер током транслаторног кретања долази у додир са слабо загрејаним материјалом. Четврта фаза подразумева престанак транслаторног кретања и пета фаза извлачење алата из завареног материјала. [5]



Слика 1. Шематски приказ фаза FSW поступка заваривања [5]

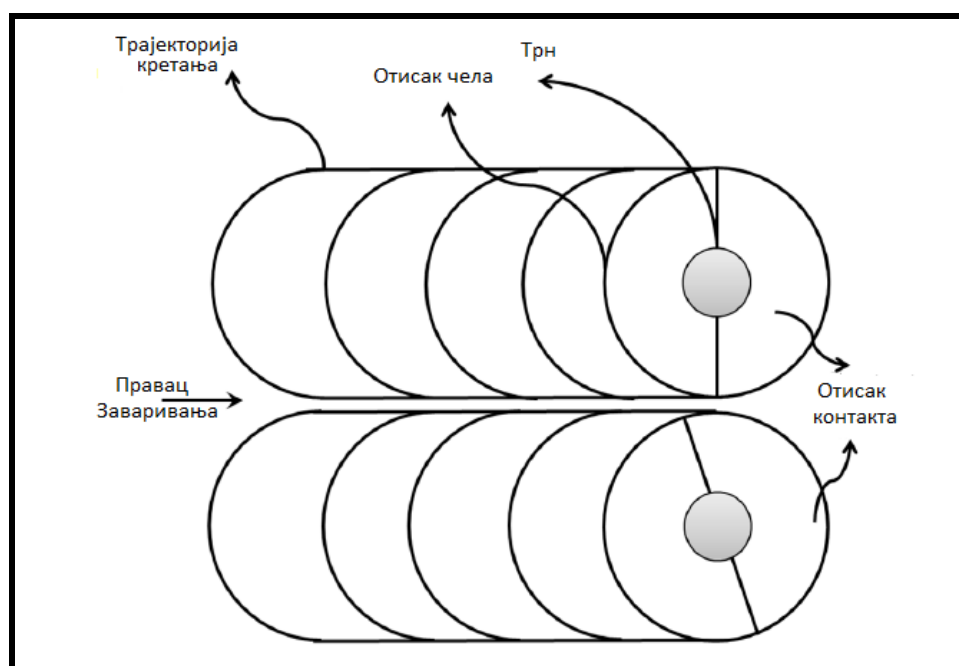
На основу претходно наведених фаза се може закључити да у току процеса FSW заваривања фигуришу аксијална сила (сила којом алат делује на радни комад), обртни момент алата и транслаторна сила којом се врши заваривање радног комада.

Током ове методе заваривања температура у току формирања споја се одржава на 100°C до 200°C испод тачке топљења материјала. [6]



Слика 2. Шематски приказ FSW процеса [6]

Према стандарду (EN ISO 25239-1:2012-03) смер обртања чела и трна алата се мора поклопити. Аксијална сила делује вертикално наниже, у правцу осе, одређеном силом притиска на радни комад и остаје константа током заваривања, све до тренутка када престане транслаторно кретање. Карактеристика добијеног метал шав (лице шав) завареног споја овом методом је површина настала као последица деловања чела алата на радни комад. У пракси, потребној димензији завареног споја, се пре FSW заваривања комада повећа димензија радног комада за два пречника чела алата. Након заваривања се овај додаток сече и добија се потребна димензија завареног споја. На слици 3 се може видети шематски приказ лица шав завареног споја добијеног FSW методом заваривања.



Слика 3. Шематски приказ шав насталог FSW поступком заваривања [15]

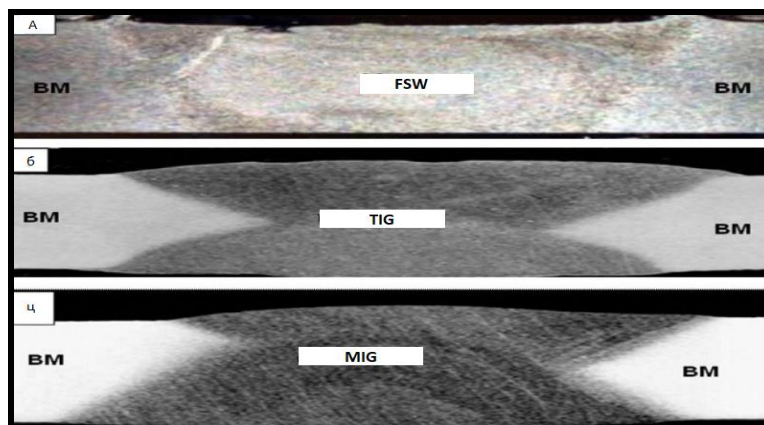
Микроструктура FSW завареног споја је први пут испитана 1997.г на TWI институту за легуре алуминијума. Посматрајући микроструктуру овог споја могу се уочити четири микроструктурне зоне (Слика 4) које су и усвојене консензусом. Прва зона (Слика 4. позиција „1“) представља основни материјал, у овој зони нема никаквих механичких ни топлотних дејства, а самим тим микроструктурне и механичке особине материјала остају непромењене. Другу зону (Слика 4. позиција „2“) представља зона утицаја топлоте (ЗУТ), ова зона током заваривања пролази кроз одређен температурни циклус и самим тим доводи до промена како у микроструктури, тако и у механичким особинама материјала. У наредној зони (Слика 4. позиција „3“) постоји термо-механички утицај топлоте који доводи до пластичних деформација са обе стране мешања. Зона мешања (Слика . позиција „4“) представља зону великих деформација. [6]



Слика 4. Шематски приказ структуре FSW завареног споја [6]

Димензије ове зоне су приближне димензији трна алата. У литератури се могу наћи и други називи за ову зону, као што су „nugget“, „динамички рекристализована зона“ и сл. Зрна у овој зони су грубо промешана и често реда величине мање него у зони основног материјала. Заправо величина зрна у овој зони зависи од врсте легуре и услова заваривања, креће се од 1 μm до 10 μm [6]

Количина енергије која се доводи у завар зависи од механичких карактеристика алата (материјала алата), материјала који се заварују, геометрије алата као и технолошких параметара који се користе при заваривању узорака. Као што је већ и напоменуто, основни технолошки параметри за формирање завареног споја су број обртаја, аксијална сила и транслаторна брзина кретања- брзина заваривања. [2]
Разлика у макроструктури експериментално заварених спојева између FSW, TIG и MIG поступка се може видети на слици 5. [13]



Слика 5. Приказ макроструктуре а) FSW б) TIG ц) MIG завареног споја [13]

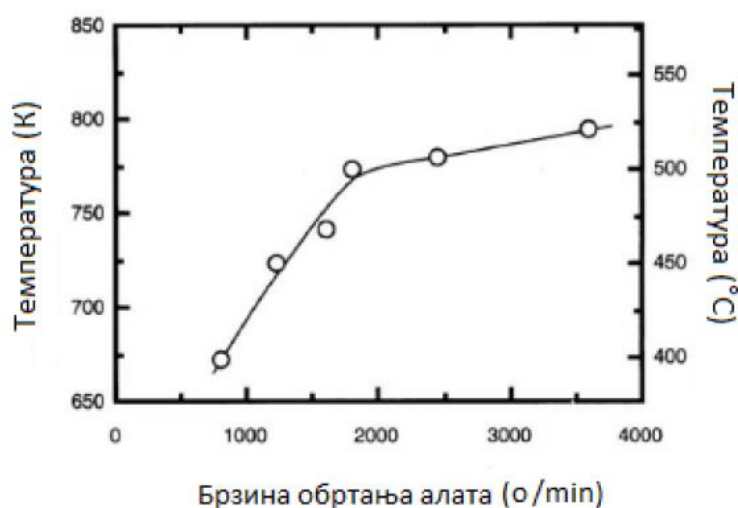
FSW заварен спој који се ствара мешањем материјала са врло малом количином генерисане топлоте у односу на TIG и MIG поступке заваривања, а поседује боље механичке карактеристике споја него наведене методе. [6]

2.2 Параметри FSW поступка заваривања

Главне технолошке параметре заваривања чини брзина обртаја алата, брзина заваривања, аксијална (притисна) сила алата, геометрија и угао нагиба алата. Али квалитет завареног споја зависи и од дубине урањања алата, генерисане топлотне енергије, температурних поља, температуре алата, начину одвођења топлоте. [8]

2.2.1 Утицај броја обртаја алата у FSW поступку заваривања

Бројем обртаја n се директно дефинише потребна периферна брзина чела и трна алата, која зависи од врсте материјала. Током заваривања број обртаја треба бити константан, што подразумева коришћење машине довољне снаге. Према литератури, број обртаја алата при примени FSW поступка заваривања варира од 100 до 4000 o/min. Повећањем броја обртаја алата при константном притиску расте и сама температура процеса (Слика 6). [7] [8]



Слика 6. Приказ односа брзине броја обртаја алата и температуре код алуминијума 6063 [8]

2.2.2 Утицај аксијалне силе у FSW поступку заваривања

Аксијална сила представља силу којом алат делује на радни комад, она зависи од карактеристике материјала и геометрије алата. Аксијална сила се постепено повећава при II фази FSW заваривања и у току продирања трна алата достиже максималну вредност. Након продирања трна и спуштања чела алата до додира са радним комадом ова сила у наставку FSW заваривања има константу вредност. Температура процеса се подиже услед повећања аксијалне силе. Вредност аксијалне силе која се препоричује у литератури креће се од 2 до 200 kN. [6] [7]

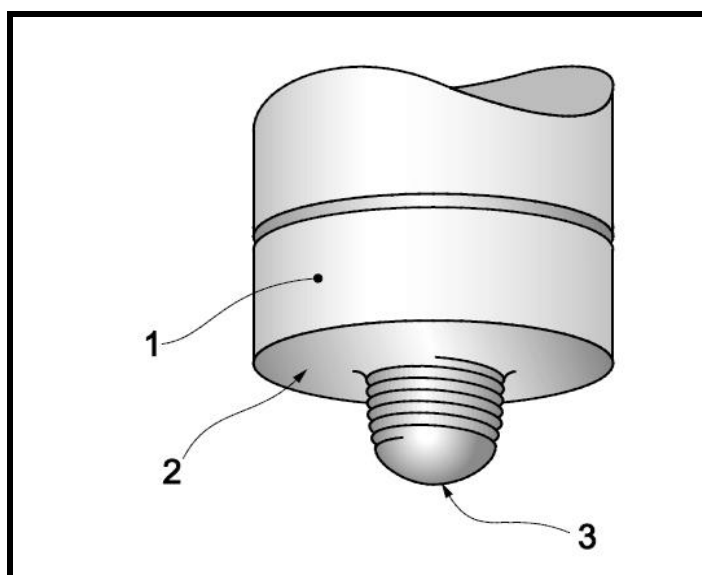
2.2.3 Утицај транслаторна брзине у FSW поступку

Транслаторна брзина представља уједно и брзину заваривања, која такође зависи од механичких и физичких својста материјала. Током FSW процеса заваривања ова

брзина је константна. У литератури се може наћи препорука односа полупречника трна (R), трансляторне (v) и угаоне (ω) брзине за ову методу заваривања. Према препоруци из литературе, однос $v/\omega R$ треба бити у границама 0,01-0,02. Уколико је брзина превелика долази до грешака у споју. Повећавањем брзине заваривања при константном броју обртаја алата и аксијалном силом, температура процеса благо опада. [8]

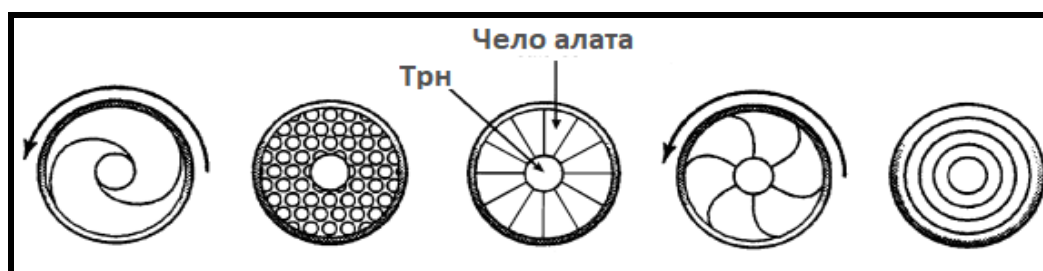
2.2.4 Геометрија алата

Геометрија алата утиче на карактеристике и квалитет завареног споја. Према стандарду EN ISO 25239-1:2012-03, основни делови алата за FSW заваривање су тело алата (Слика 7, позиција 1), чији се крај користи као прихват машине, чело алата (Слика 7, позиција 2), које учествује у процесу генерисања топлоте са површином радног комада и трна алата (пин) на коме се може наћи карактеристичан профил или лева завојница (Слика 7, позиција 3), са одређеним углом која има задатак да потпомогне механичко мешање материјала током процеса заваривања.



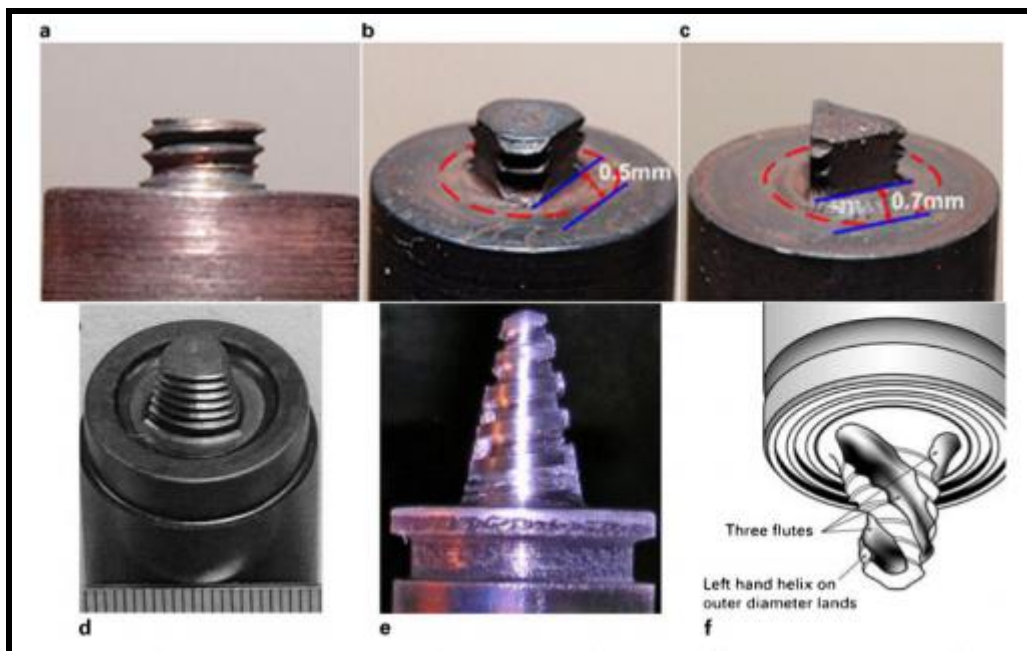
Слика 7. Шематски приказ алата за FSW процес заваривања) [6]

Чело алата углавном има равну површину, али постоје и алати са профилисаним челом (Слика 8), који имају улогу олакшавања преноса материјала око алата али и улогу „резервоара“ односно прикупљања истиснутог омекшаног материјала који се ствара изнад површине радног комада. Трнови алата су најчешће цилиндричног или конусног облика различитих пречника (Слика 9). [2]



Слика 8. Шематски приказ профилисаних чела алата за FSW поступак заваривања [20]

Димензије чела и трна алата зависе од врсте и дебљине материјала. Рецимо, уколико је трн дужи или исувише краћи од радног комада, неће доћи до стварања пуне пенетрације у споју, самим тим се квари механичке особине завареног споја.



Слика 9. Приказ профила и облика трна алата за FSW поступак заваривања [22]

Поред облика тела трна, геометрија трна алата подразумева и облик врха трна. Постоји доста конвенционалних алата са различитим геометријама врха трна и тела трна, као и њиховом комбинацијом (Слика 10). [8]

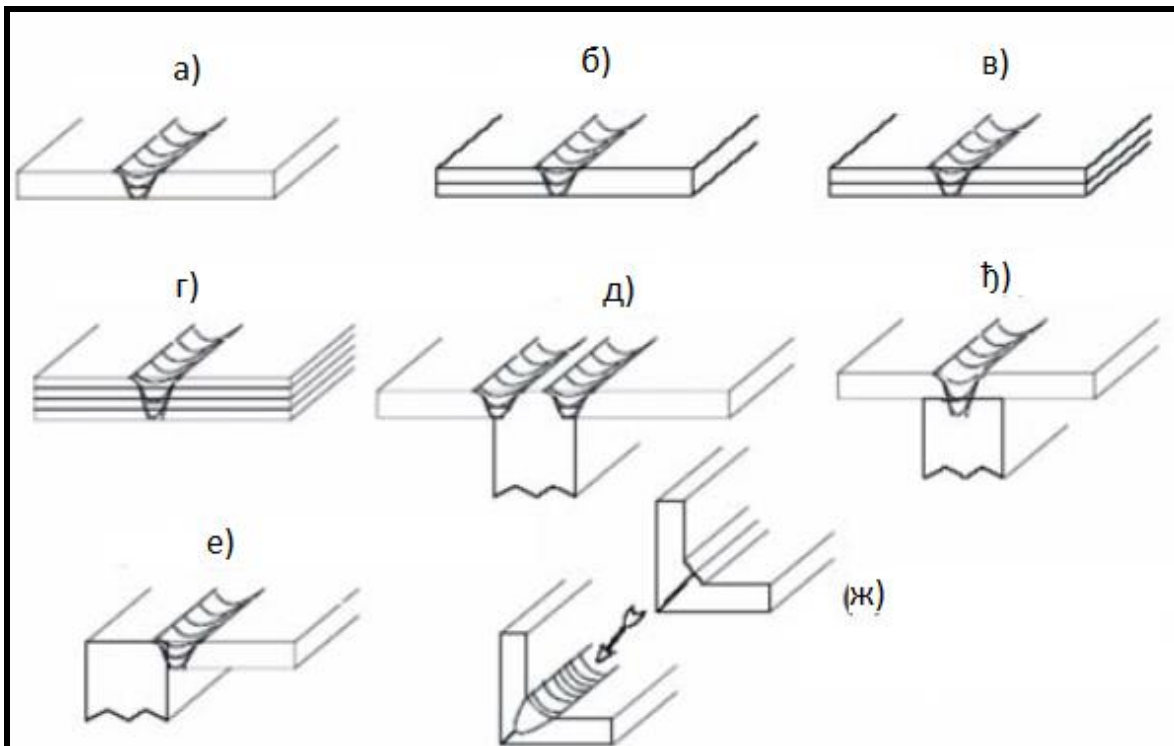


Слика 10. Фотографије: а) цилиндрични трн са равним врхом б) цилиндрични трн са куполом на врху в) трн конусног облика са равним врхом [8]

Колико је заправо битна геометрија алата, али и дубина његовог продирања у материјал за механичке карактеристике завареног споја потврђено је и стандардом. Стандардом се дефинише разлика у дозвољеном одступању између дебљине материјала и висине шави (дубина пенетрације).

2.3 Положаји заваривања

FSW поступком се могу заварити лимови и плочасти радни комади у свим положајима. Најчешће се при заваривању овим поступком користе сучеони и преклопни спој, јер добијени заварени спојеви у овим положајима поседују најбоље карактеристике. На слици 11. се могу видети положаји заваривања FSW поступком.



Слика 11. а) сучеони спој б) комбиновани сучеони и преклопни спој в) једноструки преклопни спој г) вишеструки преклопни спој; д) Т спој три елемента; е) Т спој два елемента е) угаони-сучеони спој; ж) угаони спој [1]

Пре, али и након заваривања најчешће није потребно додатно обрађивати радне комаде. Дужина шави је ограничена максималним кретањем главе машине по оси која се заварује (или у случају кретања радног стола са комадом, могућношћу кретању радног стола). Заваривање овим поступком се користи најчешће за заваривање алуминијума и легура алуминијума, с тим што је највећа предност завареног споја овом методом немогућност појаве порозности. Структура завареног споја је зрнаста и хомогена. Механичке особине споја су или исте или боље од основног материјала. [1]

2.4 Генерисање топлоте

У току фрикционог заваривања „FSW“ поступком јавља се процес генерисања топлоте између алата и радног комада. Тачније, испод чела алата и горње површине радног комада (површина генерисања топлоте одговара површини $A_{shoulder} = \pi r_{shoulder}^2$, где $r_{shoulder}$ представља полупречник чела алата), као и на локалитету око трна, контакту материјала радне плоче и трна алата (која одговара површини $A_{pin} = h2\pi r_{pin} + \pi r_{pin}^2$, где r_{pin} представља полупречник трна, а h висину трна алата). [8]

Топлота која се генерише током контакта чела алата и радног комада се може добити коришћењем следећег израза:

$$q_{shoulder} = \mu \frac{F_n}{A_{shoulder}} r_{shoulder} v_{rot} \quad [2.4.1]$$

где F_n представља силу притиска, дејства алата на радне плоче, која услед недостатка адекватних инструмената није испитивана у овом раду. Вредност коефицијента трења μ се мења променом температуре, у симулацији (поглавље 3) је узета константна вредност и износи $\mu = 0,3$. v_{rot} представља брзину ротационог кретања алата, која се такође током заваривања није мењала у експерименту, а ни у симулацији. [8]

Топлота која се генерише на контакту материјала радног комада и трна алата, је топлота која је настала као резултат пластичних деформација материјала радног комада и она се може добити изразом:

$$q_{pin} = \frac{\mu \pi \sigma h r_{pin}^2 v_{rot}}{\sqrt{3(1 + \mu^2)}} \quad [2.4.2]$$

Где је $h[\text{mm}]$ висина трна алата, док σ представља чврстоћу материјала, чија се вредност узима са дијаграма зависности чврстоће од температуре.

2.5 Материјали који се могу заварити FSW поступком

Овај поступак је настао првенствено за заваривање алуминијума, али се FSW поступком могу још заварити и легуре никла, бакра, титанијума, олово, цинк, нискоугљенични челици, пластика, полимери, конструкциони челици. У табели 2.5 је дат приказ алуминијума и његових легура које је могуће заварити помоћу овог поступка. [8]

Табела 2.5.1 Легуре алуминијума које се заварују FSW поступком [7]

Легуре алуминијума које се заварују FSW поступком	
Серија	Компонента
1XXX	Комерцијално чист алуминијум
2XXX	Al – Cu
3XXX	Al-Mn
4XXX	Al-Si
5XXX	Al-Mg
6XXX	Al-Mg-Si
7XXX	7XXX
8XXX	Al-Li

Успешност заваривања различитих серија алуминијума, али и свих других поменутих материјала директно зависи од одабира технолошких параметара заваривања и геометрије алата.

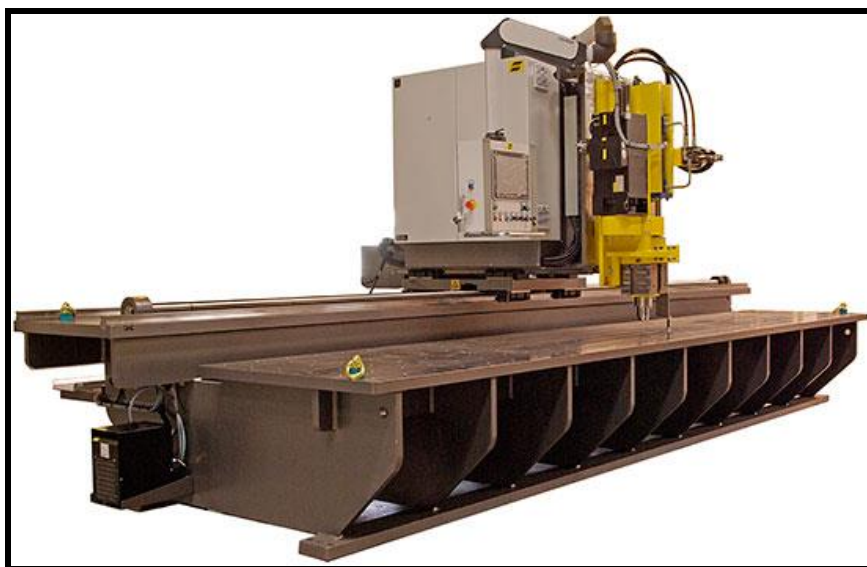
2.6 Конвенционалне машине за заваривање поступком трења са мешањем

Заваривање FSW поступком заслужено постаје стандард за одређене гране машинске индустрије (пре свега се мисли на војну, свемирску, бродограђевинску, железничку и авиоиндустрију) захваљујући бољим механичким карактеристикама добијеног споја у односу на друге конвенционалне поступке заваривања. Дебљине радних комада које се могу заварити FSW поступком зависе од могућности саме машине и варирају од произвођача до произвођача. Према литератури овим поступком се могу спајати лимови од Al легура дебљине од 0,3 до 75 mm, док за легуре Ti и челика важи дебљина до 25 mm. [1]

На тржишту се може наћи велики број произвођача FSW машина и опреме. Најчешће су овакве машине потпуно или делимично аутоматизоване. Поред сваке машине постоји командна табла на којој обучен оператер прати и подешава параметре заваривања. Неки од реномираних произвођача су:

- Компанија „ESAB“ која се бави производњом уређаја и опреме за сечење и заваривање различитих конвенционалних поступака, међу којима је и FSW поступак. У овој категорији ова компанија у својој понуди поседује:

- „Legio Friction Stir Welding System“ пружа могућности за рад са радним комадима дужине 1-5 m и дебљине 1,2-65 mm. Глава којом се изводи заваривање је врло прецизно хидраулички аутоматизована што пружа могућности да се на врло малој површини добије потребна сила притиска. Силу притиска свих „Legio“ система контролише микроконтролер (PLC) најновије генерације. У овој понуди произвођача постоји могућност одабира платформе (саосности) машине.



Слика 12. Фотографија „Legio Friction Stir Welding“ система [9]

- „SuperStir“ платформа представља концепт одабира конфигурације према потребама купаца, предвиђена за рад и аутоматизацију серијске производње у широком спектру индустрија. [9]



Слика 13. Фотографија „SuperStir“ платформе [9]

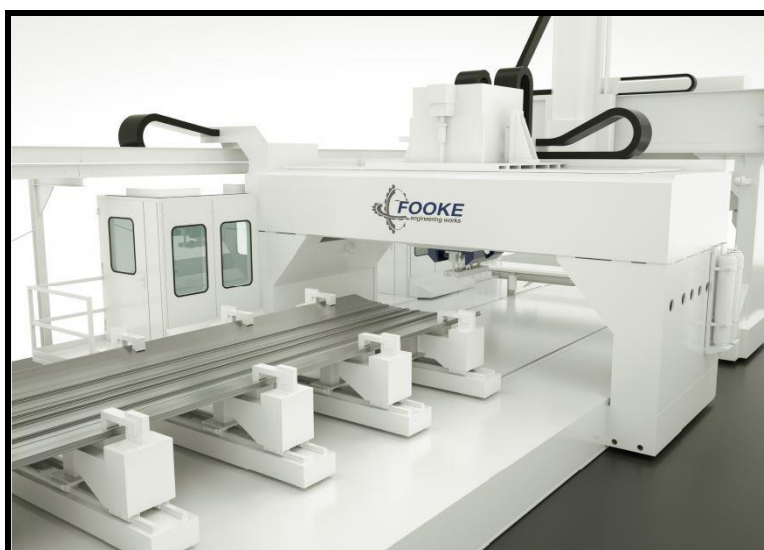
- „Robot Rosio“ је концепт осмишљен од стране „ESAB“ компаније за рад и стварање комплексних (координантно захтевних) спојева алуминијума, који пружа могућност троосног кретања главе робота као и могућност заваривања радних плоча већих од 2.5 m. Сила притиска којом робот може да делује током заваривања на материјал износи 13 kN. Захваљујући коришћењу последње генерације микроконтролера и добро опремљеном корисничком интерфејсу, оператер може врло ефикасно да програмира робота за једноосно, циркуларно или неко друго захтевно заваривање, при томе да геометрија радног комада не утиче на квалитет самог шав. [9]



Слика 14. Фотографија „Robot Rosio“ концепта [9]

- Немачка компанија „Fooke engineering works“ постоји на тржишту више од једног века. Током дуге историје ове компаније мењао се асортиман њених производа, као и систем пословања како би се прилагођавао све више захтевнијем тржишту. Од 2015. год. ова компанија је у своје производе уврстила и машине намењене FSW поступку заваривања, а данас у понуди поседује:

- „FOOKE FSW 35“ је петоосна машина намењена за заваривање великих радних комада алуминијума. Процесом комбиновања великих аксијалних сила и подешавањем потребних параметара FSW процеса које пружа ова радна машина, добија се као резултат спој одличних механичких карактеристика. Машина поседује могућност заваривања алуминијума серије 6xxx дебљине до 12 mm. Сила којом машина посредством алата може да делује на радни комад је 35 kN. Брзина заваривања износи до 3000 o/min. Димензије кретања траверзе износи 60,000x4,500x1,000 mm. [10]



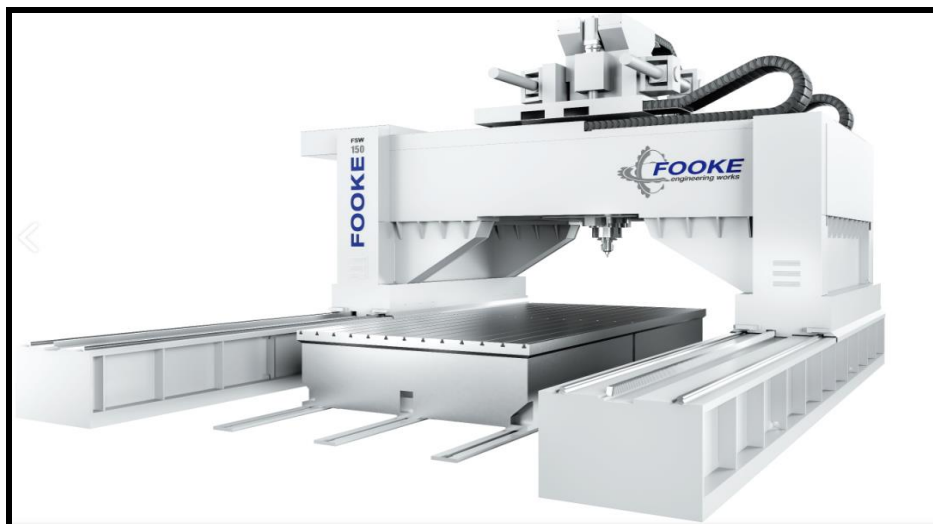
Слика 15. Фотографија „FOOKE FSW 35“ система [10]

- „FOOKE FSW 60“ је такође петоосна машина за заваривање FSW поступком, која пружа могућности за заваривање алуминијума (серије 6xxx) дебљине 20 mm, брзином заваривања до 3000 mm/min. Сила којом машина посредством алата може да делује иде до максималних 60 kN. Димензије кретања траверзе износи 60,000x4,500x1,000 mm. [10]



Слика 16. Фотографија „FOOKE FSW 60“ система [10]

• „FOOKE FSW 150“ претставља машину за FSW заваривање са највећом аксијалном силом од 150 kN коју у понуди поседује овај произвођач. Машина поседује могућност за заваривање радних комада дебљине алуминијума (bxxx) до 50 mm. Максимална брзина заваривања износи до 3000 mm/min. Димензија кретања траверзе у понуди компаније износи 60,000x4,000x1,000 mm. [10]



Слика 17. Фотографија „FOOKE FSW 150“ система [10]

Компанија из Велике Британије која поседује 150. год. искуства у конструисању, производњи, проналаску нових технологија и алата на светском тржишту је свакако „PTG-Holroyd precision“ компанија. Од 2000 год. када се појавило велико интересовање за фрикционим заваривањем, ова компанија у својој понуди поседује машине за ову намену. Успешно се заварује алуминијум дебљине 2-35 mm. Машина поседује CNC контролу са великим екраном на додир, која пружа могућност обученом оператеру да на врло једноставан начин подеси и параметре и дође до квалитетних заварених спојева. [11]

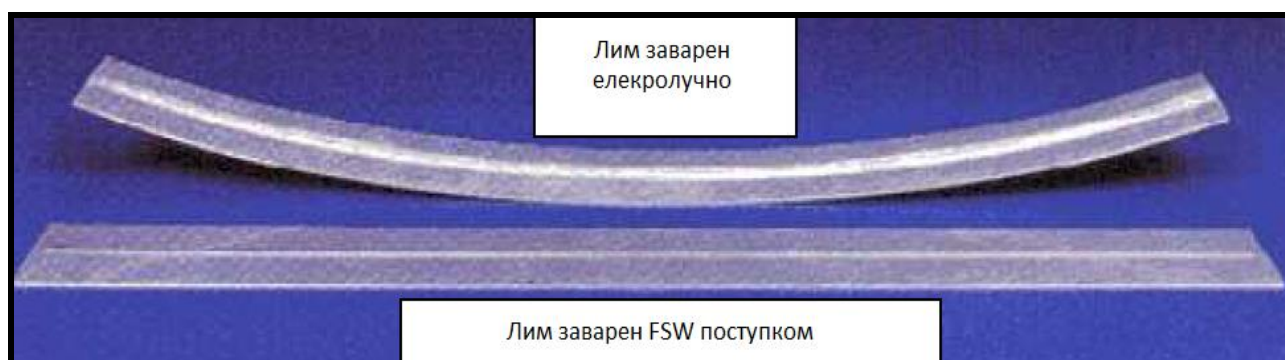


Слика 18. Фотографија FSW машине „PTG-Holroyd precision“ компаније [11]

Машина такође поседује могућност праћења заваривања са контролне станице камером велике резолуције, прецизну контролу аксијалне силе помоћу сензора последње генерације, безконтактно праћење температуре током заваривања и могућност стварања заштићене атмосфере током заваривања различитих материјала као што су титан и челик. У овом раду је поменуто само пар реномираних произвођача машина за заваривање овом методом. Захваљујући добрим механичким особинама добијеног споја ова технологија заваривања привлачи велику пажњу, а самим тим су и велика улагања у истраживање овог поступка заваривања оправдана.

2.7 Предности и недостаци

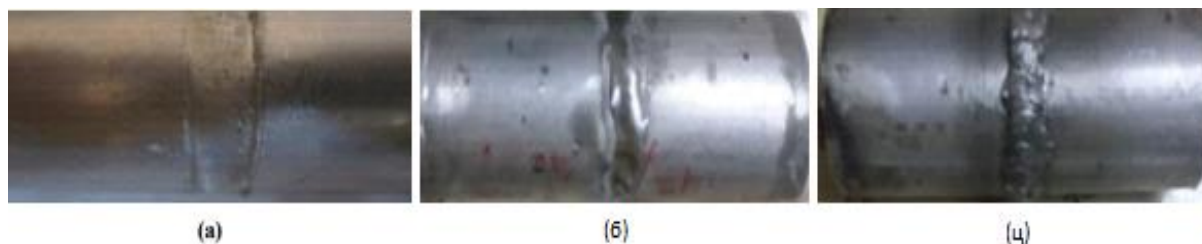
Заваривање алуминијумских радних комада, према литератури, обично се обавља до 50 mm дебљине, уколико се ради у једностраном пролазу или до 70 mm дебљине уколико се ради о двостраном пролазу. Овај поступак је настао као потреба за заваривање радних комада истог или разнородног материјала у хладном стању. Материјали који се користе за заваривање овим поступком најчешће нису отпорни на топлоту која се генерише код других конвенционалних поступака заваривања. Спојеви настали на тај начин нису задовољили потребне механичке, структурне и визуелне критеријуме. На слици 67. се може видети пример заварених лимова FSW и REL поступком. Визуелно се може уочити разлика у деформацији која се јавља између заварених радних комада.



Слика 19. Фотографија заварених спојева електролучном и FSW методом [6]

У односу на друге конвенционалне поступке заваривања успешно заварен спој поседује занемарљиво мале напоне са добром структуром шавов који је отпорнији на корозију. Такође предности су: минималне деформације, заваривање без додатног материјала, заваривање алуминијума без додатка гаса, иста ширина шавов током целе дужине споја, уштеда енергије-економичност, добијен спој не садржи примесе односно нечистоће, коришћење „зелене“ технологије- без загађења животне средине. [6]

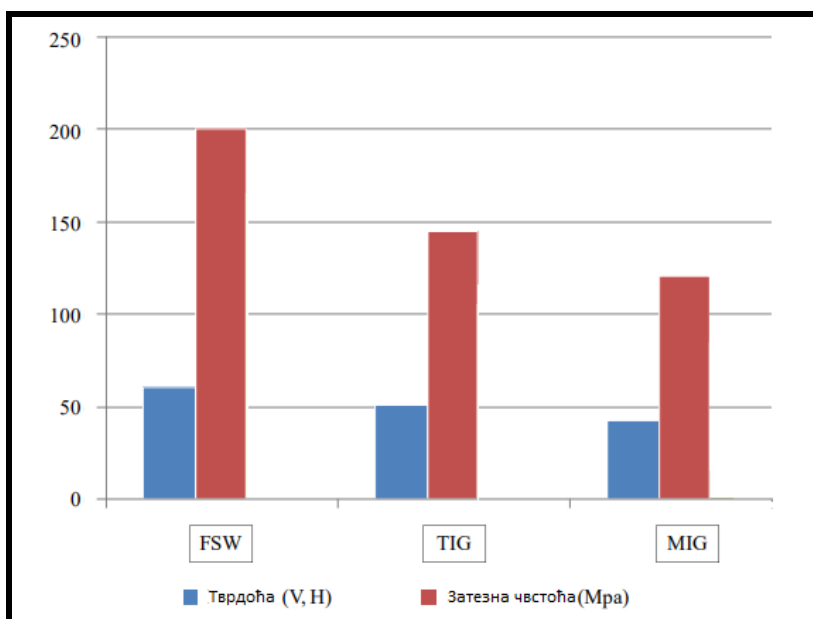
Експериментално доказана предност FSW поступка се може наћи и у литератури, где су анализирани и тестирані механичке особине заварених спојева (Al 6061) MIG (Слика 20, ц), TIG (Слика 20, б), и FSW (Слика 20, а) поступка заваривања.



Слика 20. Фотографија заварених спојева методом: а) FSW б) TIG и) MIG методом [13]

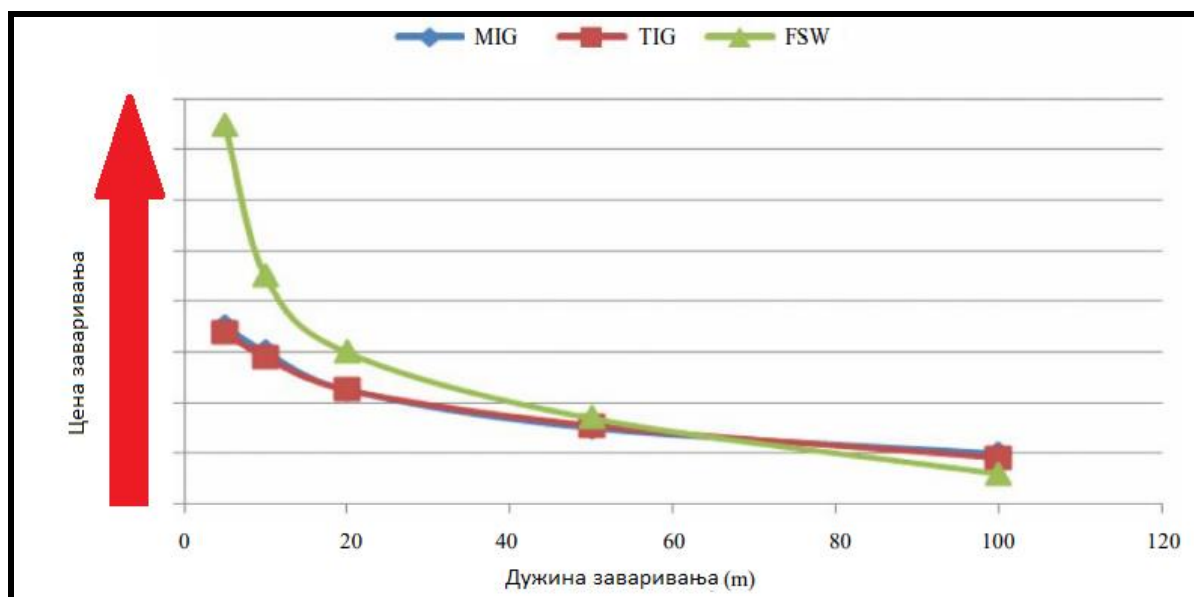
Експеримент је обухватао испитивање завареног споја на затезање и тврдоћу, где се дошло до закључка да је заварени спој FSW поступком поседовао најбоље карактеристике у односу на остала два поступка. Разлог томе је управо другачија структура споја добијена мешањем материјала са релативно малом толотом током заваривања у односу на друге поступке. Код FSW завареног споја до лома је дошло у зони термомеханичког мешања материјала, док је код MIG и TIG завареног споја дошло до лома у зони утицаја топлоте (ЗУТ зони). На графикону (4.4.1) се могу видети експериментално добијени резултати испитивања спојева.

График 4.4.1. Резултати испитивања тврдоће FSW, TIG и MIG завареног споја [13]



Предност FSW поступка, такође у односу на MIG и TIG, се може уочити посматрањем трошкова заваривања (цене опреме, специјализоване машине, лиценци, обуке, потрошног материјала, брзине заваривања, потрошене енергије) долази се до закључка да је највише оправдано коришћење FSW поступка у серијској производњи, за заваривање лимова и профила великих дужина. Као предност коришћена FSW поступка се такође сматра и укупно утрошено време заваривања која обухвата време стегања, контролу спојева, позиционирање главе машине, коришћене заштитне опреме, стегање комада и време стварања завареног споја. [13]

График 4.4.2. Однос трошкова и дужине заварених спојева FSW, TIG и MIG [13]

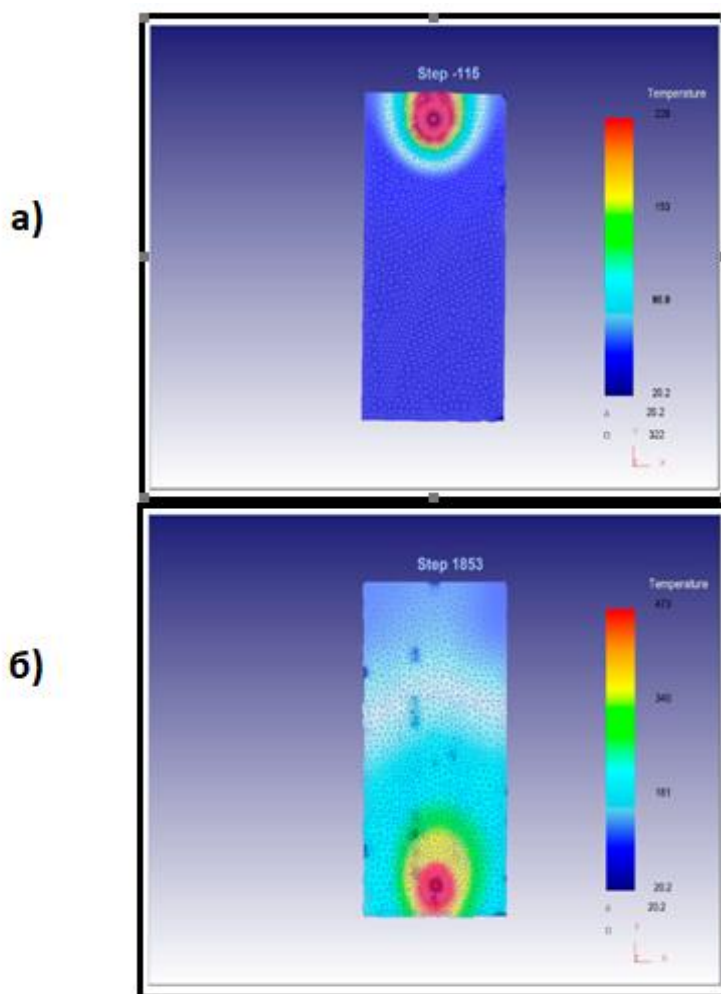


Недостаци овог поступка су: обавезна употреба стезног алата, коришћење потпорне плоче (испод радног комада), немогућност заваривања материјала различитих дебљина, стварање отвора при продирању алата у материјал и при изласку из њега (обично се радни комади остављају на предмеру, како би се након заваривања ови делови исекли), хабање алата (специјализовани алат за заваривање алуминијума серије бxxx може да се користи за формирање шавова до 1000 m), нагомилавање основног материјала током заваривања на фрикционе површине алата.

3. Нумеричка симулација FSW процеса

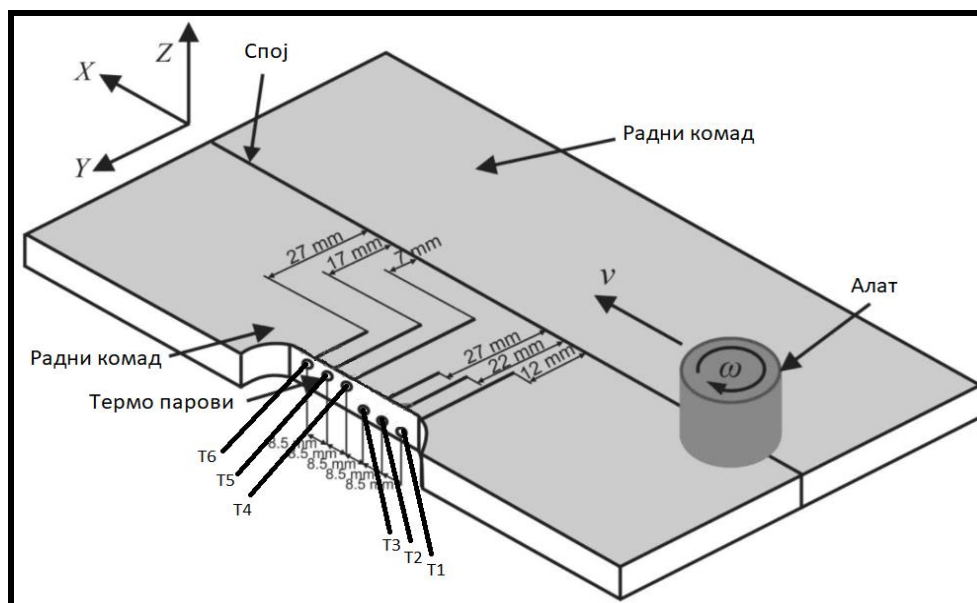
Експериментално истраживање са великим бројем узорака представља методу која укључује велике новчане трошкове и доста времена, из тог разлога је нумеричка симулација ефикасније и прихватљивије решење. Нумеричком симулацијом се може експериментално симулирати процес и методом коначних елемената испитати заварен спој. На овај начин се развој и FSW технологије заваривања (примена различитих геометријала алата, технолошких параметара и коришћењем разнородних материјала) може унапредити на бржи и јефтинији начин.

Према литератури, експериментално је изведена нумеричка симулација FSW процеса заваривања над радним коадима од алуминијума (AA6082-T6), дебљине 7.8 mm. Технолошки параметри употребљени у симулацији се поклапају са параметрима коришћеним током извођења експеримента физички. Коришћена брзина трансляторног кретања алата током заваривања износила је $v=2.0833 \text{ mm/sec}$ (125 mm/min), брзина обртања алата $\omega=83.78 \text{ Rad/sec}$ (800 rpm), и сила којом алат делује на радни комад износи $F_a=2,40\text{--}5,47\text{kN}$. Коришћењем FEM (Finite element method) конвенционалног софтвера дошло се до експерименталног резултата-расподеле температурних поља током заваривања. На слици 21. су приказане температуре а) на почетку фазе заваривања и б) на крају фазе заваривања. [16]



Слика 21. Расподела температуре по пољима приликом FSW поступка заваривања [16]

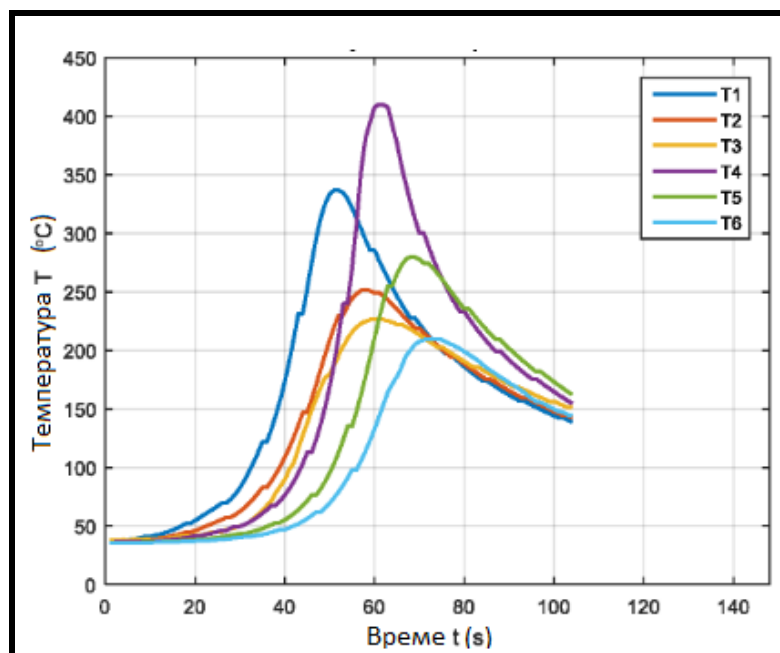
Са предходне слике се уочава да максимална температура у почетној фази заваривања износи 220°C . Максимална вредност температуре добијена након извођења целог процеса заваривања достиже до 473°C . Обе максималне вредности се налазе у зони контакта алата и радног комада. Поређења ради, у наведеном раду је урађено мерење температуре помоћу термо-парова током FSW заваривања у карактеристичним тачкама, приказаним на слици 22.



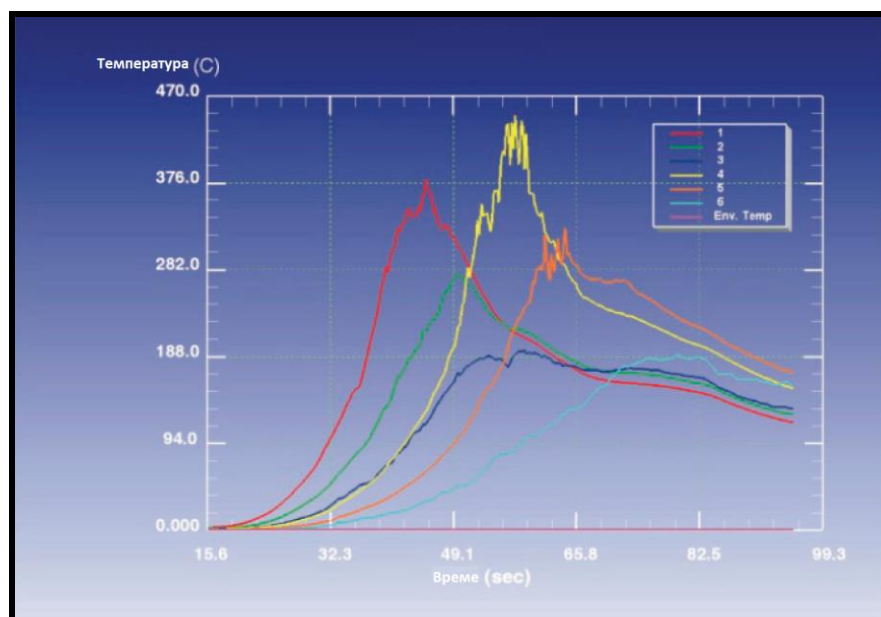
Слика 22. Мерење температуре помоћу термо-парова у карактеристичним тачкама [16]

Тачка четири (Слика 22) поседује највећу измерену локалну вредност температуре током заваривања (Слика 23). На слици 24. је приказан дијаграм температура карактеристичних тачака добијен нумеричком симулацијом.

Дијаграм 3.1. Температуре карактеристичних тачака добијене експерименталним мерењем приликом извођења FSW поступка заваривања [16]

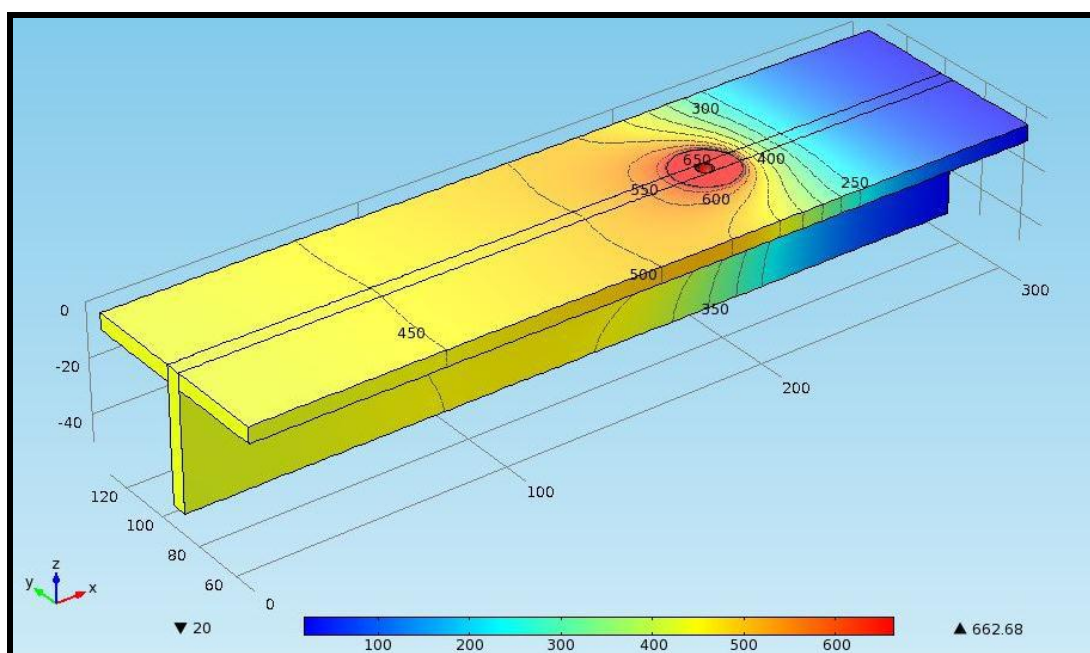


Дијаграм 3.2. Температуре карактеристичних тачака добијене нумеричком симулацијом FSW поступка заваривања [16]



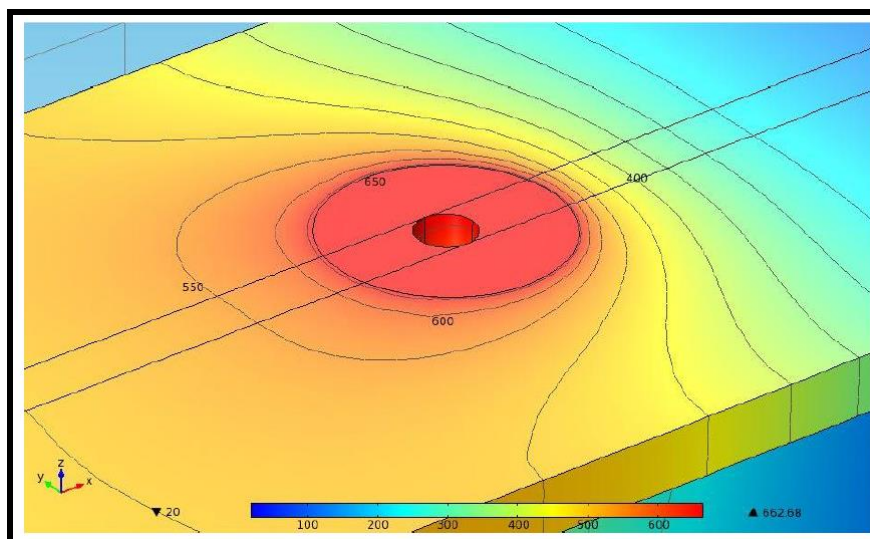
Поређењем резултата добијених експериментом и симулацијом се уочава разлика мања од 10 %, што према раду указује да се симулација FSW заваривања могу изводити коришћењем FEM анализе.

У литератури се налази на нумеричку симулацију FSW процеса заваривања Т-споја, такође методом коначних елеманата. Материјал за радне комаде је такође алуминијум (5052-H32 и 5754-H111), коришћена аксијална сила којом алат делује на радни комад износи 15 kN, брзина обртаја алата $\omega=500$ o/min, брзина заваривања $v=1,59$ mm/s. Коришћена је тродимензионална нелинеарна анализа и добијени су резултати температурних поља у Т-споја (Слика 25). [8]



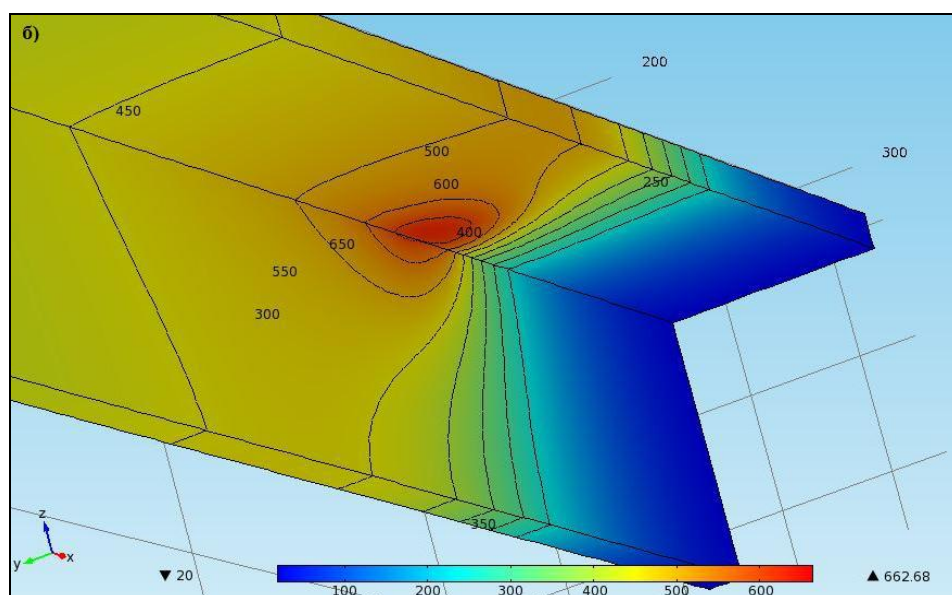
Слика 23. Распоред температурних поља на моделу Т-споја [8]

Највиша вредност температуре се налази у области контакта алата и радних комада, и износи 650°C (Слика 26).



Слика 24. Распоред температурних поља на местима генерисања топлоте [8]

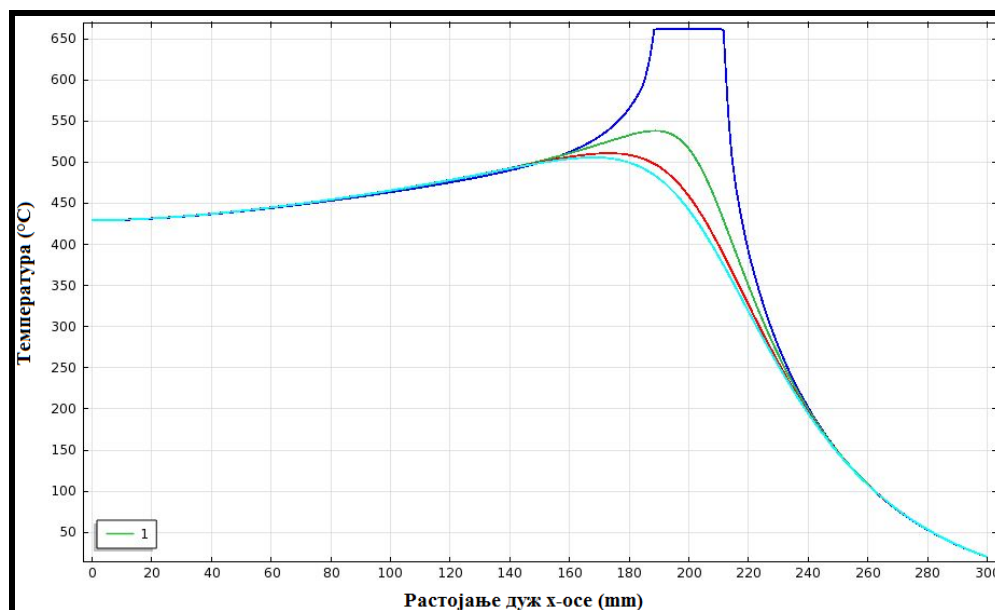
На основу добијених расподела температурних поља Т-споја, у раду се закључује да постоји разлика у расподели у односу на сучеон заварен спој FSW поступком, где се расподела простира у виду концентричних кругова. За разлику од њега, може се видети велика разлика вредности температура, у зони грумена и зони термомеханичког утицаја од осталих делова код Т-споја.



Слика 25. Распоред температурних поља посматран са стране где су радне плоче у контакту са подложним плочама [8]

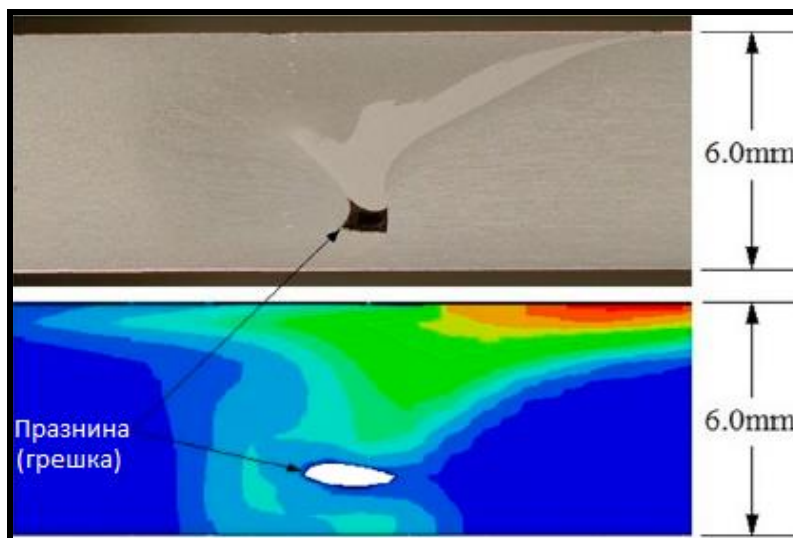
На дијаграму 3.3 је приказан дијаграм расподеле температуре. Тамно плава линија представља расподелу температуре кроз средину споја, тачке која се налази на врху трна алата, а у самом центру, у зависности од растојања на x -оси. Зеленом бојом је приказан дијаграм расподеле температуре тачке која се налази на тангенти чела рамена алата у зависности од датог растојања дуж x -осе. [8]

Дијаграм 3.3. Дијаграми расподеле вредности температура на различитим местима у зависности од померања извора топлоте дуж x-осе [8]



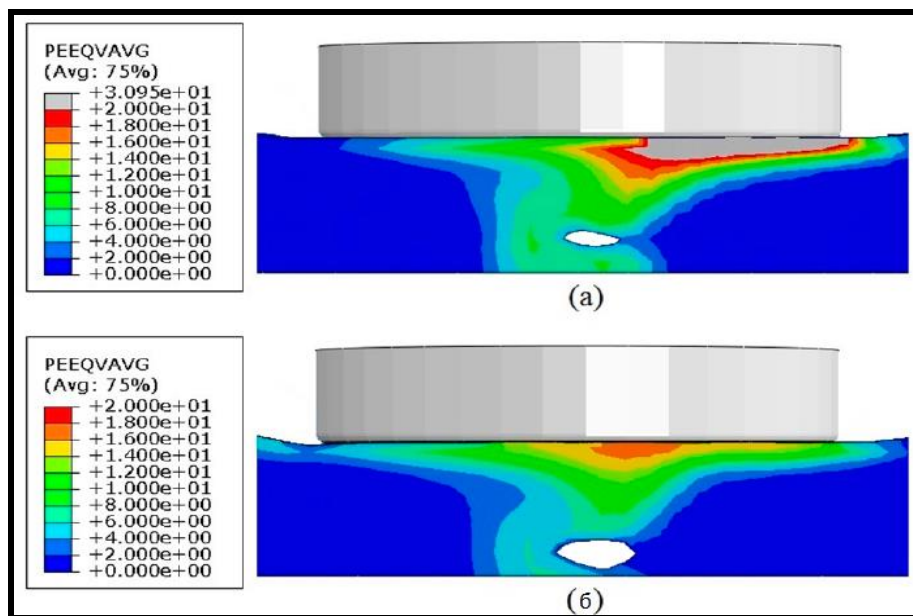
У раду се наводи да је процес FSW заваривања је праћен камером са инфрацрвеним зрацима, те су уз мала одступања добијени резултати у симулацији потврђују као тачне вредности.

Такође у литератури се налазе нумеричке симулације у којима се поред добијања расподеле температуре може видети и пластично понашање материјала у зони око трна алата. За експеримент је коришћен алуминијум Al6061-T6, 6 mm дебљине, са комбинацијом различитих технолошких параметара. Сам процес мешања материјала је условљен геометријом алата и технолошким параметрима употребљеним у процесу заваривања. Коришћењем неодговарајућих параметара заваривања долази се до „неадекватног мешања“ материјала радног комада, што узрокује настанак грешке у завареном споју. У наведеном раду је резултат добијен симулацијом упоређен са резултатом добијеним експериментом (Слика 29). [17]



Слика 26. Поклапање резултата добијеног експериментом и симулацијом [17]

Оно што је већ експериментално аргументовано у овом раду, да је коришћење неадекватних технолошких параметара узрок добијања споја лоших механичких карактеристика, потврђује се и експерименталном нумеричком симулацијом. Испитан је утицај параметра брзине транслаторног кретања радног комада (брзине заваривања), уз одржавање константних вредности осталих технолошких параметара на резултат добијања споја. На слици 25. су приказани резултати FSW симулације, где се могу видети зоне пластичног кретања материјала насталим при брзинама а) 50 mm/min и б) 150 mm/min. [17]



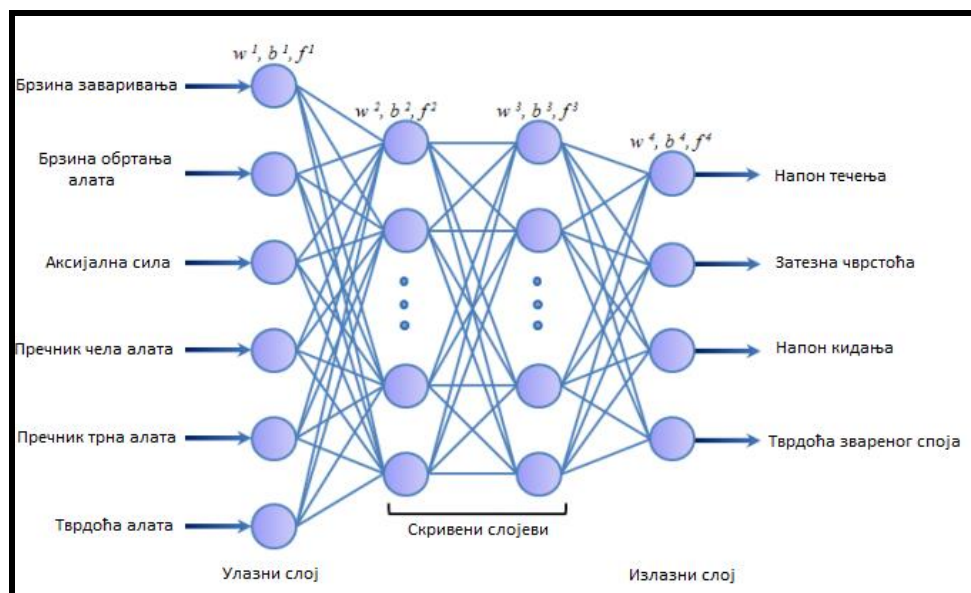
Слика 27. Резултат добијен симулацијом FSW поступка завр. при брзинама а) 50 mm/min и б) 150 mm/min [17]

Као што је приказано наведеном литературом, коришћењем нумеричке симулације се може извести велики број различитих експеримената и испитати конкретан утицај на FSW процес заваривања. Једном направљен нумерички модел, се може уз мале корекције прилагодити различим потребама, као што је испитивање технолошких параметара заваривања, испитивање утицаја геометрија алата, испитивање деформација, испитивања процеса заварљивости истородних и разнородних материјала и др.

Резултати добијени извођењем експеримената и нумеричким симулацијама се могу искористити за проналазак оптималних параметара FSW заваривања за добијање завареног споја добрих механичких карактеристика, али уколико се овај процес жели унапредити, потребно је поради на динамици стварања завареног споја. Само врло прецизним задавањем параметара у тачно одговарајућем тренуцима је могуће добити врхунски FSW спој. Још један проблем који се јавља код овог процеса је деформација настала приликом заваривања радних комада великих дужина, из тог разлога је потребно константно пратити процес заваривања, расподелу температуре и подешавати параметре захтевима процеса.

У литератури се може наићи на коришћење вештачке интелигенције, односно примене вештачке неуронске мреже за добијање доста прецизних параметара FSW заваривања. Скупљањем експерименталних података, њиховим уносом, процесом тренирања, валидације неуронске мреже и коначном предикцијом, може се доћи до најоптималнијих технолошких параметара потребних за дати процес. У научним

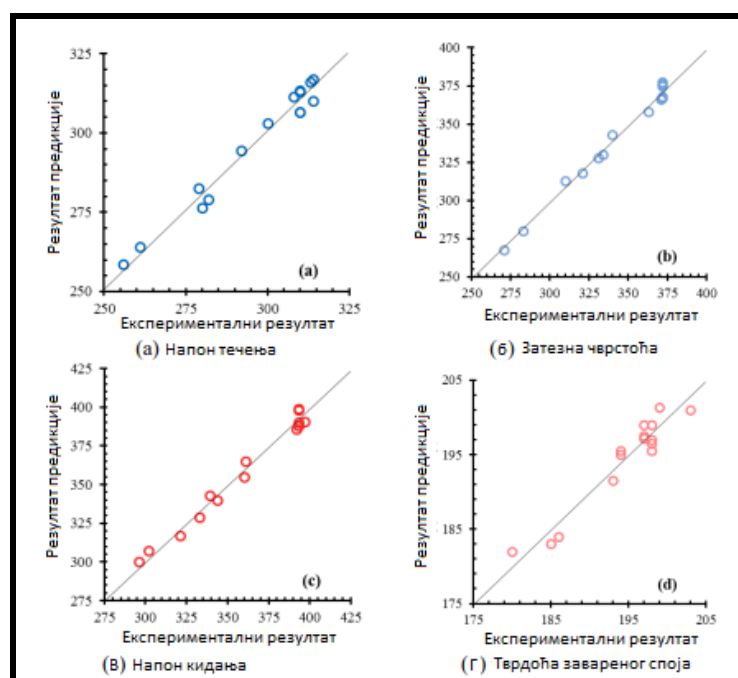
радовима се такође може наћи и обртни процес, да се неуронска мрежа „нахрани“ са великим бројем улазних података, односно FSW технолошким параметрима, материјалним и добијеним механичким карактеристикама завареног споја, потом истренира и тестира. Након тестирања мреже, може се приступити процесу симулације и предикције. Уносом одређених FSW параметара, предикцијом се добију механичке карактеристике завареног споја. Према литератури, један такав концепт је приказан на слици 28. [18]



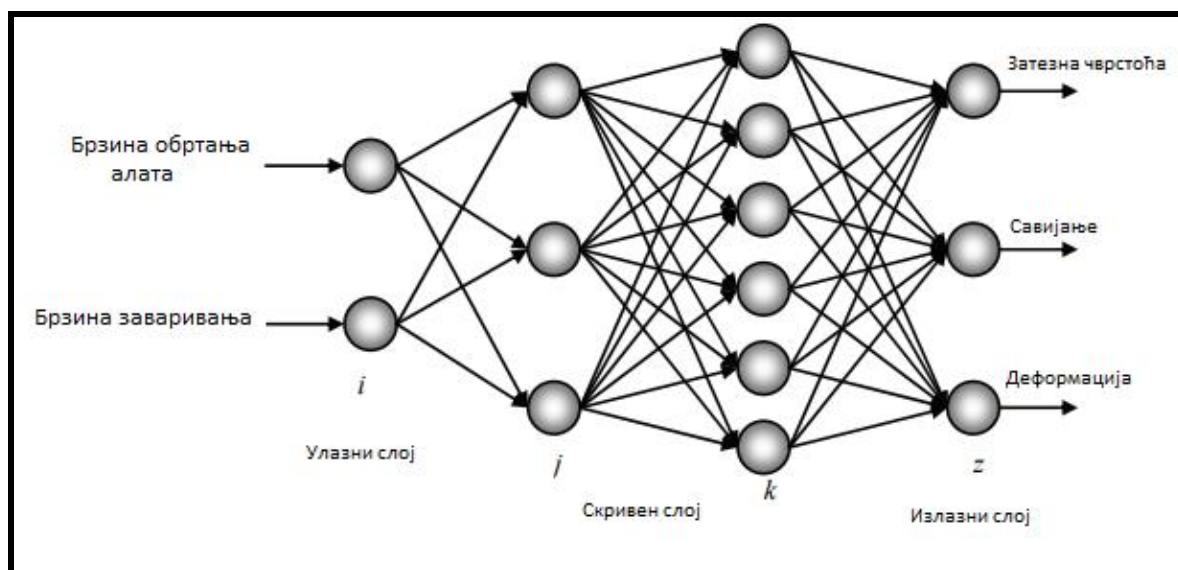
Слика 28. Концепт неуронске мреже за FSW поступаа заваривања [18]

За потребе поменутог рада коришћен је алуминијум Al7075-T6, дебљине 5 mm, где се након извођења експеримената, обучавања и тестирања мреже, извршило упоређивање резултата добијених експериментално и предикцијом вештачке неуронске мреже. Механичке карактеристике заварених спојева су се поклапале у 99% случајева.

Дијаграм 3.4. Поређење резултата добијеног експериментом и предикцијом [18]



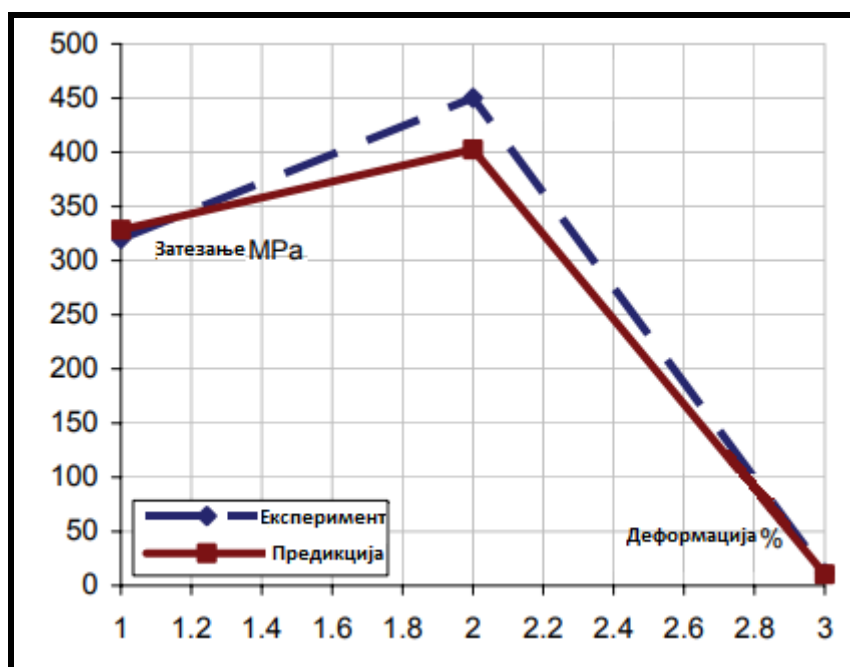
У стручној литератури се још могу наћи и примери концепта неуронске мреже са мањим бројем улазних параметра у улазном слоју. У овом концепту се само помоћу улазних параметара, брзине заваривања и ротације алата, долази до предикције резултата неких механичких карактеристика FSW завареног споја. [19]



Слика 29. Концепт неуронске мреже за FSW поступаа заваривања [19]

На дијаграму 3.5 је приказано поређење резултата добијених експериментом коришћење предикције неуронске мреже. Према литератури, закључује се да се неуронска мрежа може користити као алтернатива за експерименте.

Дијаграм 3.5. Поређење резултата добијеног експериментом и предикцијом [19]



Експериментално добијени резултати у спрези са нумеричком симулацијом процеса и вештачком интелигенцијом се могу отворити нове могућности за развој FSW технологије заваривања уз минималне временске и новчане трошкове.

4. Експерименталне пробе на конвенционалним машинама

Експериментално заваривање FSW методом је обављено коришћењем вибрационе, стубне бушилице и глодалица. Није било неопходно прилагођавање постојеће машинске опреме потребама заваривања овом методом. Експериментално је испробано прво заваривање пластике FSW методом а потом и алуминијума. Експеримент је укључивао комбинацију различитих технолошких параметара. Параметри који су коришћени за експериментално заваривање су вођени различитим препорукама из литературе, а везани су за обртни момент и транслаторно кретање током заваривања. Експерименти у литератури су такође извођени на прилагођеним комерцијалним глодалицама, те се из тог разлога не могу наћи параметри везани за јачину вертикалне силе (сила којом алат делује на материјал), као и параметри везани за време и начин генерисања потребне топлоте како би дошло до идеалних услова за „мешање материјала“. За експеримент су коришћене радне плоче од алуминијума серије 5083. Ознака серије 5xxxx подразумева легуре алуминијума са магнезијумом. Највећа разлика између коришћеног материјала из поменуте серије у односу на остале серије легура алуминијума (термичких необрадивих легура алуминијума) је највећа чврстоћа. [10]

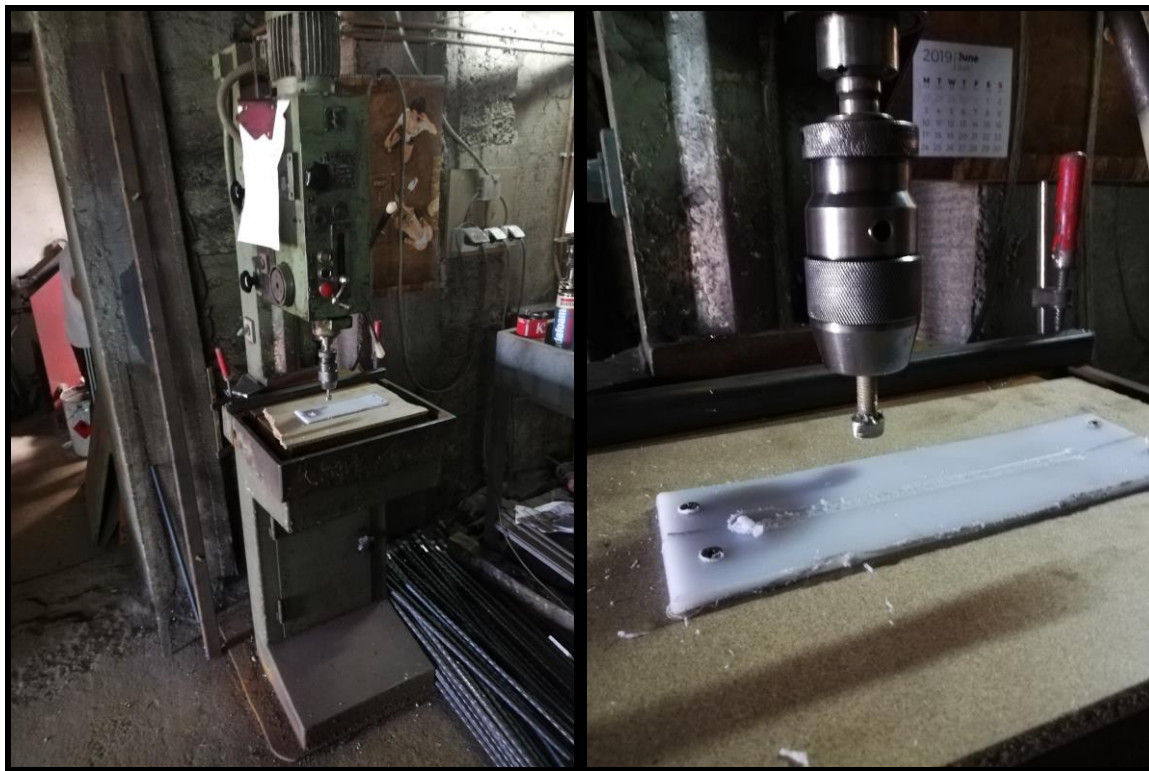
4.1 Конвен. машине коришћене у експерименту FSW заваривања

Пре коришћења конвенционалних глодалица за FSW заваривање пластике испробана је могућност извођена заваривања помоћу вибрационе ручне бушилице. Вибрациона бушилица (слика 30.) произвођача „ISKRA“, модел „Z1J-HF-13E-2“ поседују снагу од 600 W и максималним 2800 o/min. Вибрациона бушилица је постављена на сталак како би се осигурао константан контакт између алата и радног комада.



Слика 30. Фотографија експеримента са вибрационом бушилицом

Експеримент је такође рађен и на стубној бушилици произвођача „Dalmastroj”, модел: „МК 4“, која је приказана на слици 31. Ова бушилица поседује максималну брзину од 2000 o/min. Стубна бушилица не поседује могућност транслаторног кретања радног стола, па се брзина заваривања своди на ручно гурање ослонца радног комада.



Слика 31. Фотографија стубне бушилице произвођача „Dalmastroj”, модел: „МК 4“

Прва глодалица која је коришћена у експерименту FSW заваривања је типа вертикалне механичке глодачице, проиођача K rings модел: UF1 (Слика 32), ова глодалица располаже снагом погона 5 kW, максималним бројем обртаја 1280 o/min, максималним посмаком 238 mm/min , са постољем величине 1400x500 mm.



Слика 32. Фотографија конвен.глодалице произвођача „K rings“ модела „UF1“

За процес FSW (експерименталног) заваривања није било потребно додатно прилагођавати глодалицу, али је пожељно имати машину са којом без великог напора може извршити заваривање, што у овом експерименту није био случај. Током заваривања није мерена аксијална сила (притисна сила деловања алата на радни комад). На слици 33. је приказан положај и начин стезања радних комада пре процеса заваривања.



Слика 33. Фотографија начина стезања радног комада при FSW поступку заваривања

Друга коришћена глодалица за екпериментални FSW поступка заваривања је такође вертикалног типа, произвођача „Wilheem“ групе, модела „VF20“ (Слика 34), снаге 5 KW. Максималан број обртаја износи 2000 o/min, док се максималан посмак креће до 380 mm/min.



Слика 34. Фотографија глодалице произвођача „Wilheem group“ модела „VF20“

За потребе експеримента заваривања глодалица није додатно прилагођена. Радни комади су постављени у стегу (Слика 35) која је причвшћена за радни простор на глодалици. Испод радних комада се налазила потпорна плоча. Експериментално заваривање је извођено у дужини захвата стега.

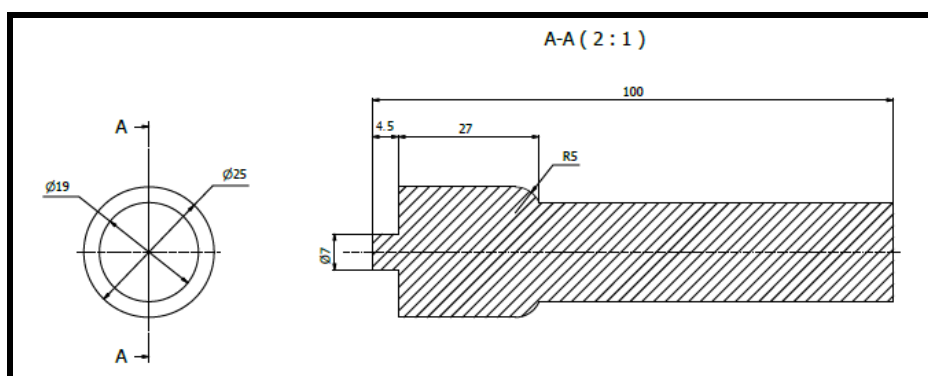


Слика 35. Фотографија начина стезања радног комада при FSW поступку заваривања

Експерименти су извођени у различитим режимима рада глодалица. Експериментишући са технолошким параметрима процеса заваривања и различитим геометријама алата, радне машине су у неким тренуцима давале свој максимум, те се експеримент морао прекидати и настављати тек након одмора и хлађења глодалице.

4.2 Геометрија алата коришћене у експерименту

Геометрија алата поред већ наведених параметара заваривања има велики утицај за добијање споја са добрим механичким и визуелним карактеристикама. Алати који су коришћени у експерименту су израђени на стругу од конструкционог челика и челика за побољшање. Геометрија алата је мењана на основу теоријског и практичног искуства. Димензије тела и чела су на свим алатима исте, чело алата $\varnothing 25\text{mm}$ и тело алата (прихват) $\varnothing 19\text{mm}$. Први коришћени алат (чији је технички цртеж дат на Слици 36) карактерише трн цилиндричног облика $\varnothing 7\text{mm}$ дужине 4.5mm . Алат је израђен изједна од конструкционог челика и без термичке обраде. Геометрија трна и чела алата није обухватала никакве профиле нити профилисане завојнице.



Слика 36. Технички цртеж алата бр.1

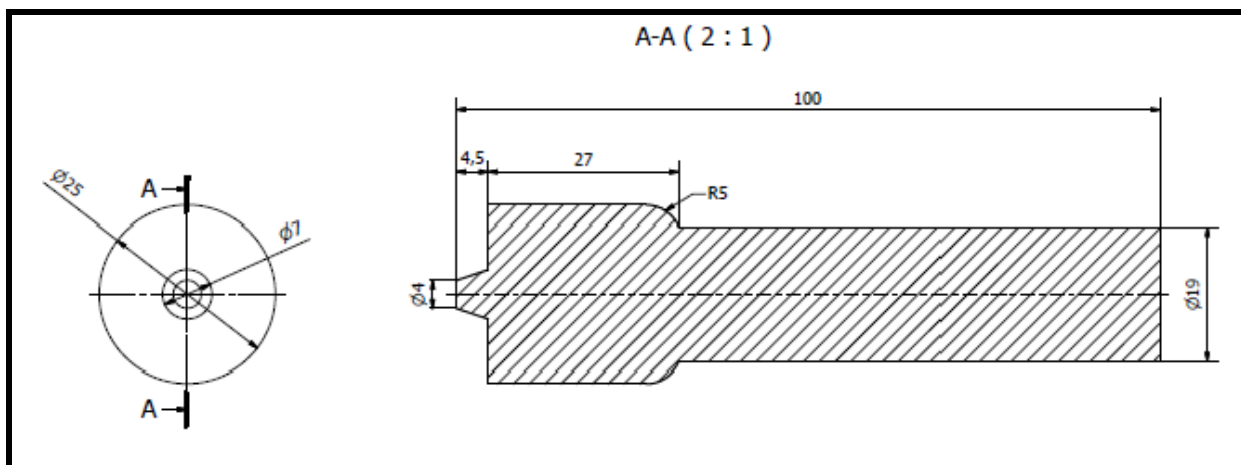
Коришћењем овог алата су извођени FSW експерименти на алуминијуму и на пластици. Прихват алата је током експеримента прилагођаван машини. На слици 37. је приказан израђен алат, пре експеримената заваривања. [12]



Слика 37. Фотографија израђеног алата бр.1

У литератури се може наићи на податак да алати обично имају на трну или челу алата израђену неку врсту профила, експериментално је покушано заваривање FSW поступком без икаквих профила. Други експериментално коришћен алат поседује трн у облику зарубљене купе, са кореном трна $\varnothing 7\text{ mm}$ и врхом трна $\varnothing 4$, дужине 4.5 mm . Такође, алат је израђен на стругу, изједна и без профилисаних завојница. Алат је од

конструкционог челика и без термичке обраде. Технички цртеж алата је дат на Сlici 38.



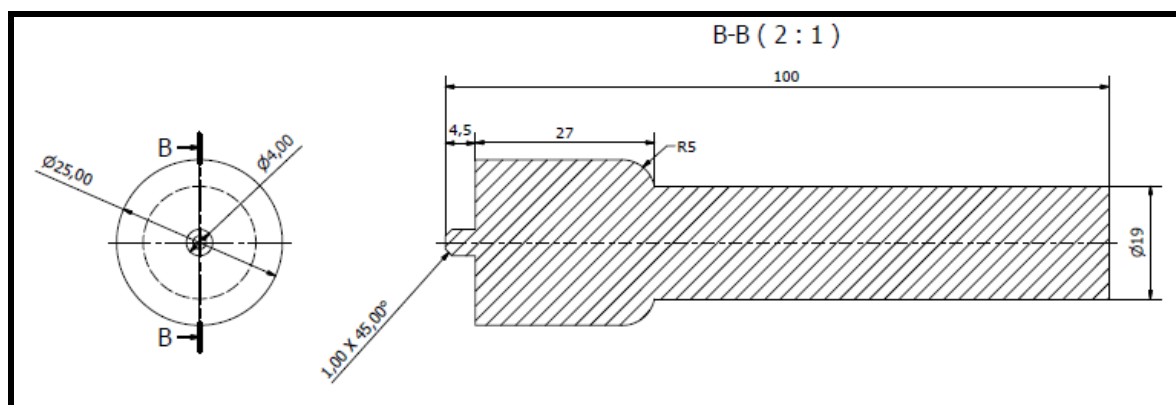
Слика 38. Технички цртеж алата бр.2

Облик трна овог алата омогућава добијање израженијег „V“ шава. Висина трна је израђена према препорукама из литературе.



Слика 39. Фотографија израђеног алата бр.2

Трећи коришћени алат (Слика 40) је највише био намењен експерименту заваривања пластике, те му је и геометрија била највише прилагођена у ту сврху.



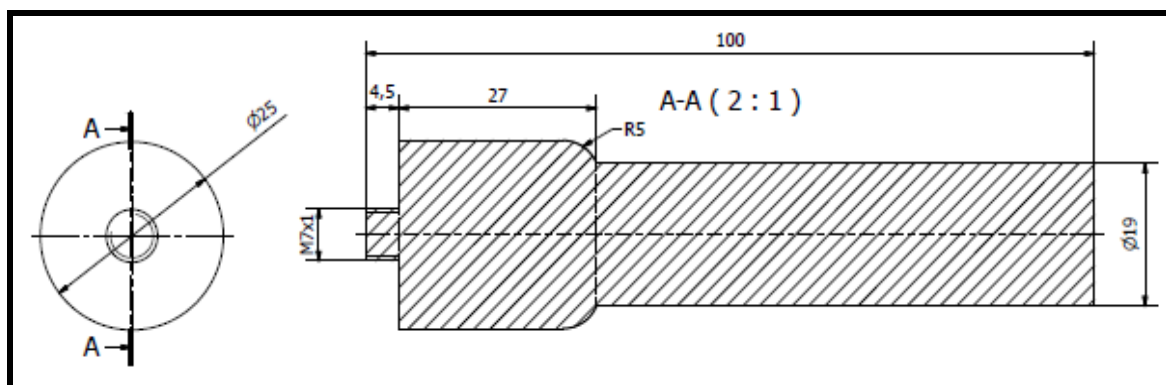
Слика 40. Технички цртеж алата бр.3

Овај алат је израђен након експримената са прва два алата. Карактерише га мањи цилиндричан трн са закошеним ивицама на врху ($1 \times 45^\circ$), израђен је од конструкционог челика и без термичке обраде. На слици 41. се може видети израђен алат.

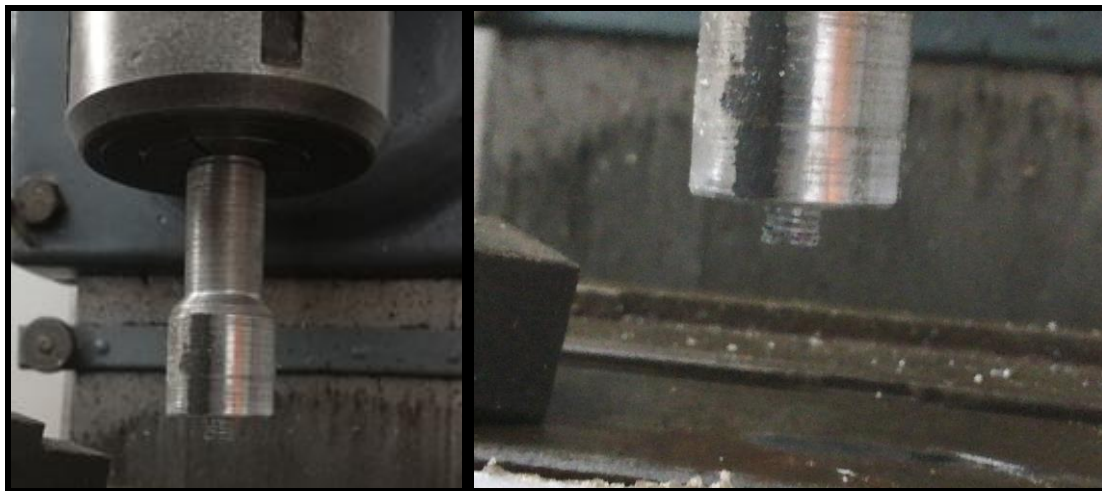


Слика 41. Фотографија израђеног алата бр.3

Четврти и пети алат који је коришћен у експерименту поседују идентичну геометрију у основи као први алат (Слика 36). На четвртом алату, у односу на први, је урађена дорада на цилиндричном трну. Израђена је лева завојница (Слика 42).

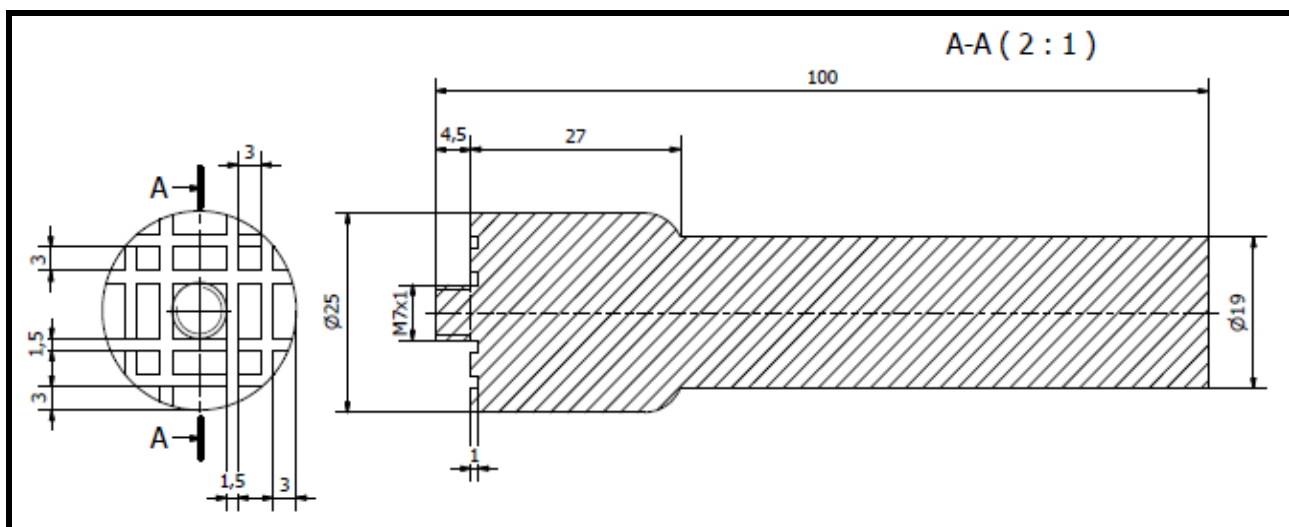


Слика 42. Технички цртеж алата бр.4



Слика 43. Фотографија израђеног алата бр.4

Пети алат као додатну дораду, у односу на четврти, има профилисано чело алата (Слика 44). Профилисано чело алата има улогу прикупљања дела истиснутог омекшаног материјала који се ствара изнад површине радног комада, односно олакшавања преноса материјала око алата.



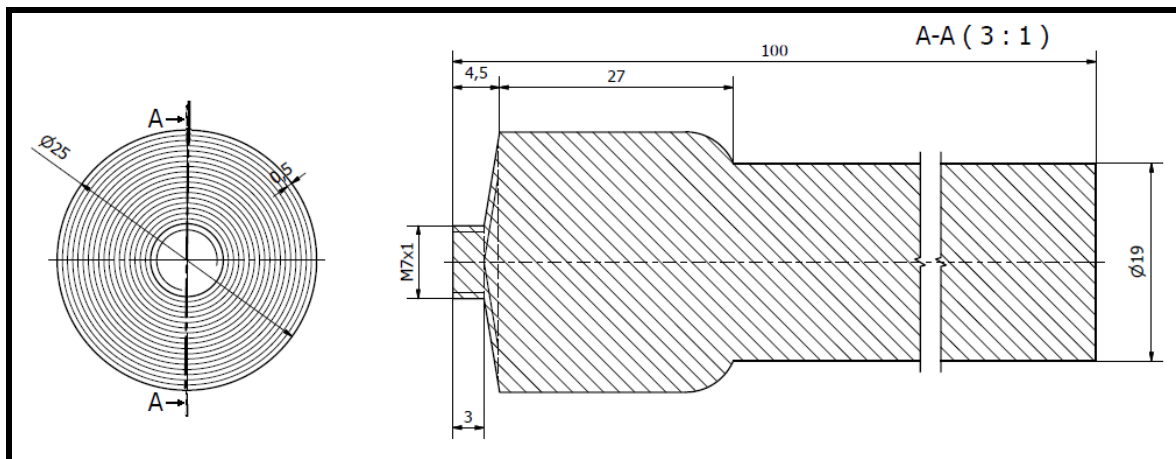
Слика 44. Технички цртеж алата бр.5

Израђен алат је приказан на слици 45. Материјал од ког је алат израђен је такође контрукциони челик, без термичке обраде. Лева завојница на трну четвртог и петог алата има задатак да поспеши мешање материјала око трна и створи бољу структуру шави.



Слика 45. Фотографија израђеног алата бр. 5

Шести алат (Слика 46) поседује комбинацију конусног чела и цилиндричног трна. Чело алата је профилисано концентричним круговима дубине 0,5 mm. Док је трн алата остао цилиндричног облика са врло кратким профилем леве завојнице.



Слика 46. Технички цртеж алата бр. 6

На слици 47. је приказан готов алат од челика за побољшање (Џ4732) са термичком обрадом (каљењем и отпуштањем). Постигнута тврдоћа је 46-48 HRC.

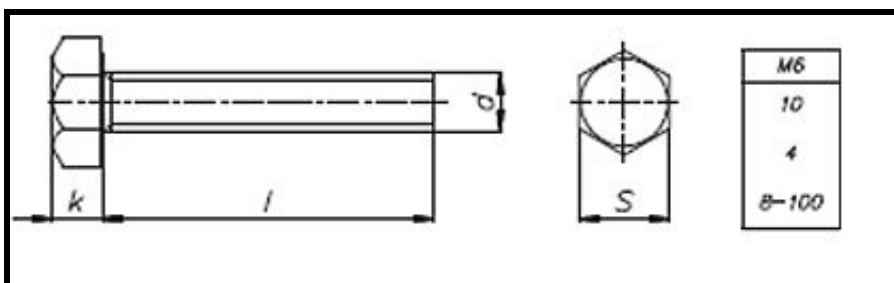


Слика 47. Фотографија израђеног алата бр. 6

Сви алати су рађени у сврху извођена екперимената, а не у сврху серијске производње. Из тог разлога нису коришћени материјали који имају већу постојаност.

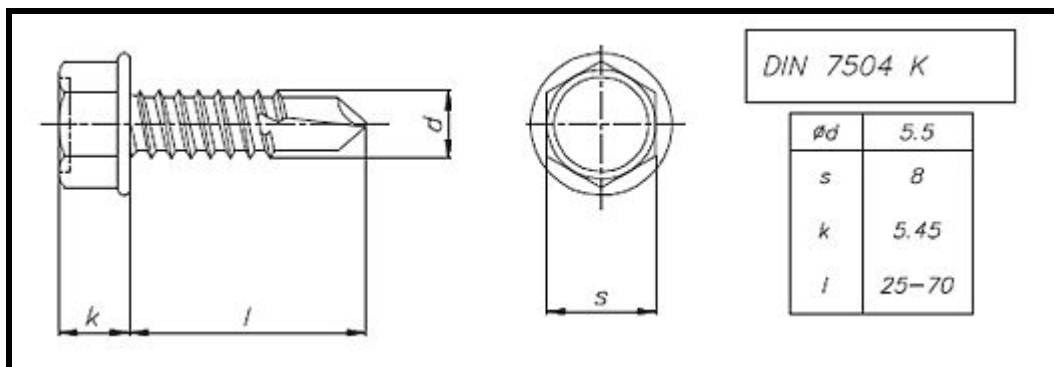
4.2.1 Екпериментално коришћени импровизовани алати

За екпериментално заваривање FSW поступком на радним комадима од пластичних маса су коришћени импровизовани алати, настали од конвенционалних стандардних навојних веза и вијака купљених у локалној продавници. Први коришћен алат је настао као навојна веза завртња и навртке. Коришћен је завртањ са метричким навојем М6 (SRPS: M.B1.053), и димензијама приказаним на Слици 48. Како би екпериментални алат имао бољи прихват на завртањ, додате су две одговарајуће навртке. Као чело алата послужила је сама навртка. Навојно стабло завртња је исечено на дужину од 4,5 mm, и оно је представљало трн алата.



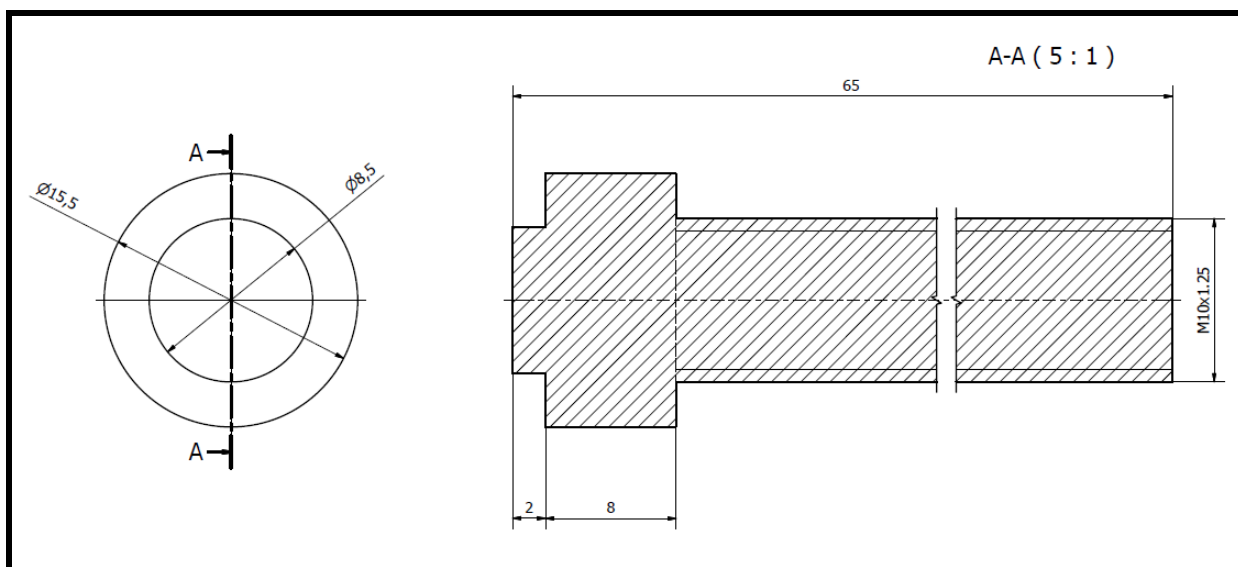
Слика 48. Технички цртеж вијка DIN 7504K

Алат бр. 2 је добијен скраћивањем навојног стабла вијка за лим DIN 7504K (Слика 49), класе чврстоће 5.5 и дужине 25 mm) на 4,5 mm- које одговара дебљини радног комада.



Слика 49. Технички цртеж вијка DIN 7504K

За алат бр.3, коришћен је завртањ M10 (SRPS: M.B1.053) и одговарајућа навртка. Навртка је заварена 2 mm од краја завртња, затим су завртањ и навртка машински обрађени на потпуно равне (завртањ је машински обрађен до језгра, тако да је изгубио профил метричке завојнице) цилиндричне површине. На слици 50. је приказан технички цртеж алата.



Слика 50. Технички цртеж импровизованог алата- Алат бр.3

4.3 Начини извођења, дискусија и резултати експеримента

Као што је већ напоменуто у овом раду, експериментално је изведено заваривање FSW поступком уз употребу различитих радних машина, параметра и геомерије алата над врстама различитих материјала. У зависности од врсте материјала над којим су извођени експерименти, ово поглавље је подељено на експерименте над пластиком и алуминијумом.

4.3.1 Експерименти над пластиком

Први експерименти фрикционог заваривања, су обављени коришћењем ручне вибрационе бушилице (поглавље 4.1). Прва врста пластике која је коришћена за екперименте је незагарантованог састава, која је купљена у локалној продавници. Друга врста је ABS пластика, чији су узорци израђени помоћу 3D технологије штампе. Дебљина радних комада у оба случаја износила је 5 mm.

Као алат за фрикционо заваривање пластичних маса коришћени су импровизовани алати. Као први је коришћен алат бр. 1 (према поглављу 4.2.1). Након стезања прихвата алата у бушилицу (Слика 51) и подешавања потенциометра брзине изведен је експеримент.



Слика 51. Фотографија експеримента са вибрационом бушилицом

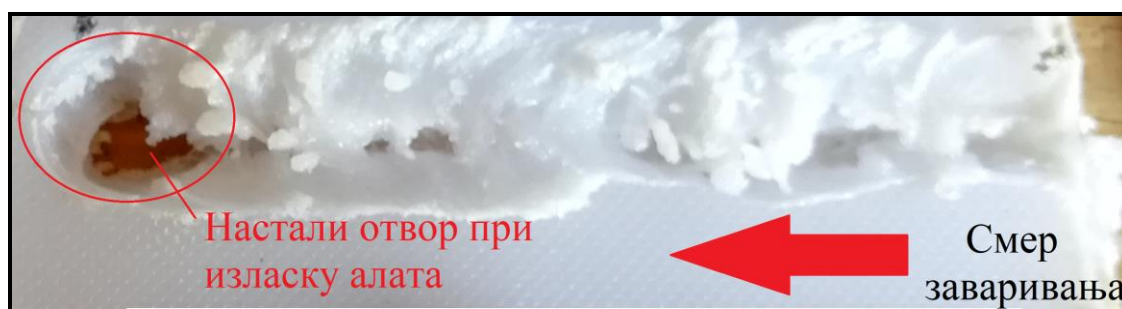
Сталак за стубну бушилицу поседује граничник спуштања бушилице, тако да је дубина продирања трна у материјал одржавана као константна током целог процеса извођења експеримента. Радни комади су причвршћени за ослонац помоћу вијака, како не би дошло до нежељеног раздвајања радног комада. Резултат екперимента је приказан на слици 52.



Слика 52. Фотографија добијеног резултата након експеримента

Као што се може видети на претходној слици експеримент заваривања није успео. Број обртаја на бушилици је износио максималних 2800 o/min. Са слике се може закључити да је експериментом направљен тунел током целе дебљине и дужине радног комада, добијена је превише зрнаста структура. Што указује, на коришћење недовољне аксијалне силе, превелики број обртаја и велике брзине транслаторног кретања. Са слике се такође може уочити да је потребно коришћење вођица радног комада. Једини параметар који се може узети у обзир током овог експеримента је време протекло од тренутка довођења у контакт чела алата и радног комада до тренутка пуштања радног комада у транслаторно кретање. Ово време је износило 4 min. Експеримент је поновљен са мањом брзином обртаја, истим транслаторним кретањем и већом аксијалном силом. Протекло време, пре пуштања радног комада у транслаторно кретање, износило је 7 min. Добијен је резултат као и код претходног експеримента.

Наредни експеримент је обухвао коришћење другог импровизованог алата, алата бр.2 (4.2.1). Брзина обртања на бушилици је смањена на средњу вредност у односу на максималну, време протекло од тренутка контакта целе површине чела алата и радног комада, па до тренутка транслаторног кретања радног комада износило је 4 min. Резултат експеримента се може видети на слици 53.



Слика 53. Фотографија добијеног резултата након експеримента са вијком DIN 7504K

Добијен је бољи спој у односу на претходне експерименте, али је спој и даље незадовољавајући. Структура споја је мање зрнаста, али је дошло до мешања материјала само у површинском слоју. Покушани су експерименти и са дужим временским размком пре почетка транслаторног кретања, али нису добијени задовољавајући резултати.

Тачни параметри заваривања у претходним експериментима, као што је јачина аксијалне силе, број обртаја и транслаторно кретање, нису познати. Транслаторна брзина (брзина заваривања) није ни прецизна нити константна вредност, на ослонац радног комада (на коме је причвршћен вијцима) се ручно деловало и на тај начин је стварана транслаторна брзина.. Потенциометар на вибрационој бушилици не поседује могућност за подешавање тачног броја обртаја. Недостатак адекватног стезног алата и вођица (за навођене радног комада) такође ствара додатни проблем. Из тог разлога је наредни експеримент изведен на стубној бушилици у браварској радионици.

Наредни експеримент је извођен коришћењем стубне бушилице „Dalmastroj”. Импровизовани алат бр. 3 (4.2.1) је се такође састоји од навојне везе. Експеримент је извођен са брзином обртаја од 1000 o/min. Након стезања импровизованог алата,

изведен је експеримент. Ова стубна бушилица не поседује могућност транслаторног кретања радног стола, па се брзина своди на ручно гурање ослонца радног комада. Време које је протекло од тренутка контакта чела алата и радног комада до тренутка транслаторног кретања радног комада износило је 5 min., у оба експеримента која су извођена на стубној бушилици. Експеримент са брзином обртаја алата од 2000 o/min. поседује успешније резултате споја од експеримента са 1000 o/min. Структура споја са 1000 o/min поседује превише зрнасту структуру и добијен је сличан спој као на слици 39. Резултат експеримента је приказан на слици 54.



Слика 54. Резултат експеримента са импровизованим алатом-лице шава

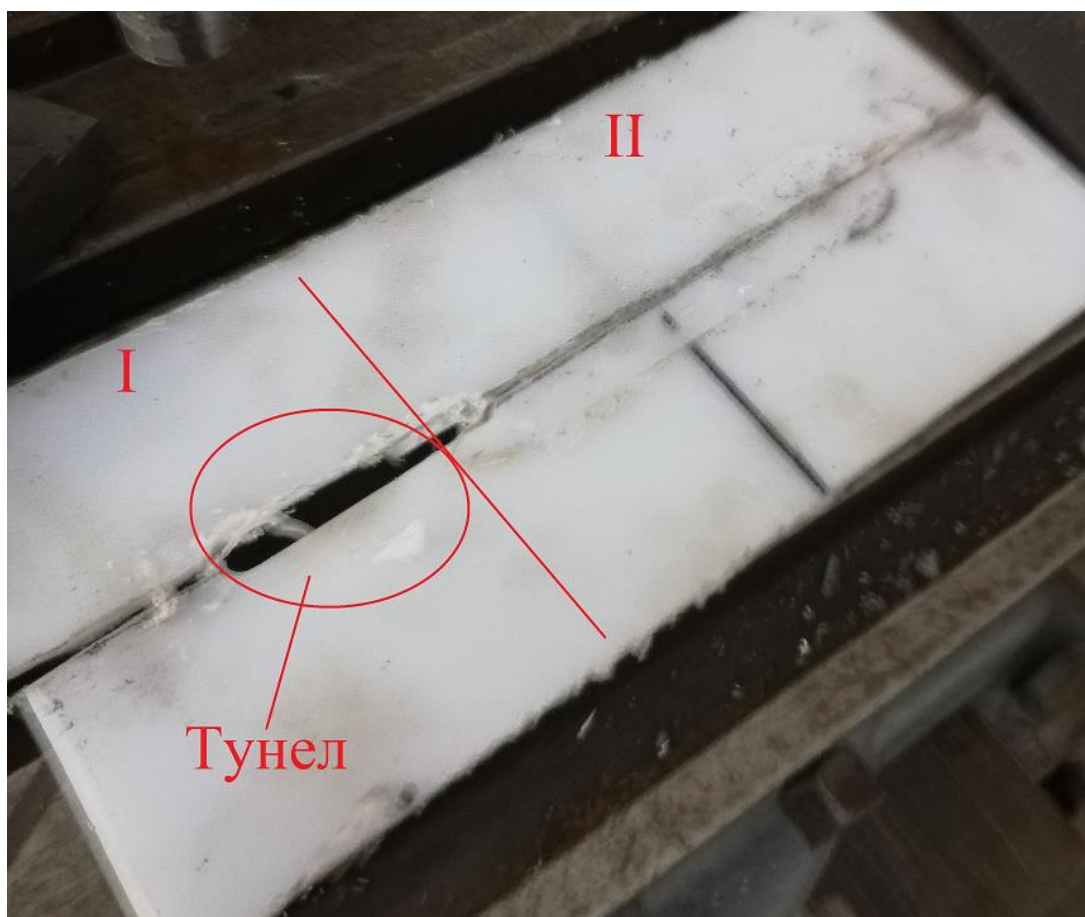
Добијен спој је визуелно најбољи (лице шава), једина мана је што је висина шава, односно остало је 2 mm непромешаног материјала (слика 55), овај проблем би се решио понављањем процеса заваривања са друге стране радног комада.



Слика 55. Резултат експеримента са импровизованим алатом-наличије шава

Овај процес није обављен, јер је параметар транслаторног кретања и даље остао непознат. Из тог разлога ће се наредни експерименти обављати на конвенционалним глодалицама, које пружају могућност кретања по x оси, подешавање транслаторног кретања, броја обртаја и већу аксијалну силу- неопходну за експерименте са алуминијумом.

Експеримент на глодалици је започет са FSW поступком заваривања такође радног комада од пластике, помоћу алата бр.1 (из поглављу 4.2 овог рада), који је цилиндричног облика без икаквих профилисаних завојница и са карактеристикама које су претходно описане. Радни комади су исечени из пластичне табле. Први експеримент се састојао из два дела. У првом делу експеримента коришћен број обртаја износио је 1280 o/min, што уједно и износи максималан број обртаја коришћење глодалице, док је транслаторна брзина кретања износила је 39,6 mm/min. У другом делу експеримента је коришћена иста транслаторна брзина (посмак), а мањи број обртаја. Уз наведене параметре је и благо повећана вертикална сила (сила притиска). Број обртаја је смањен на 427 o/min, док је транслаторна брзина остала на 39,6 mm/min. Ови параметри су уједно и најприближнији параметрима из литературе, а које може пружити коришћена глодалица. Визуелни резултат експеримента је приказан на слици 56. [12]



Слика 56. Фотографија резултата изведеног експериментра на глодалици

Са претходне слике се може уочити да се у првом делу експеримента јавља „тунел“ који се ствара захваљујући неодговарајућој (великој) брзини транслаторног кретања и недовољној сили притиска током заваривања. Отисак алата је једини од

видљивих параметра вертикално-притисног деловања глодалице посредством алата на материјал, јер тачну јачину силе не знамо. Из тог разлога се у другом делу експеримента благо повећава сила притиска, подизањем радног стола машине. Захваљујући промени наведених параметара заваривања се добија изглед шави као на слици 56. Шав, фронтално гледано, код FSW поступка заваривања је најчешће издубљеног облика. Треба напоменути да заварени радни комад има издубљен облик шави, али је незадовољавајућа испуњеност шави а самим тим и слабе затезне јачине.

Наредни експеримент је обухватао коришћење алата бр.2 (поглавље 4.2), геометријом у облику зарубљене купе, такође без профилисаних канала на челу и трну алата. За експеримент је поново коришћен радни комад од пластике, исечен из исте табле као и радни комад коришћен у претходном експерименту. Брзина обртаја алата је износила 427 o/min, док је транслаторна брзина кретања комади смањена на 21.7 mm/min. Током целог процеса заваривања овог радног комади параметри нису мењани. На слици 57. се може видети резултат овог експеримента.



Слика 57. Фотографија резултата изведеног експеримента на глодалици

Из експеримента се може закључити да је коришћена недовољна сила притиска алата на радни комад, па је из тог разлога експеримент поновљен (алат са истом геометријом) са већом силом притиска, али и на ABS узорку материјала који је добијен технологијом 3Д штампе. Добијен шав је бољег квалитета него у претходном експерименту, са цилиндричном геометријом алата. Број обртаја је смањен на 335 o/min, као и транслаторна брзина на 17 mm/min.



Слика 58. Фотографија резултата изведеног експериментра на глодалици

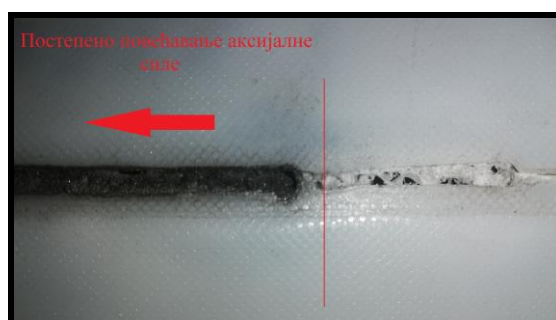
Са претходне слике се може закључити да је велика количина материјала, уместо да се промеша заправо изашла изван зоне мешања и таложила се са стране, око алата. Након даљих смањења броја обртаја и транслаторне брзине, није дошло до икаквог мешања материјала, односно задовољавајућих резултата користећи ова два алата.

Наредни експеримент је обухватао коришћење алата бр.3 (према поглављу 4.2). Одабрана брзина обртања износила је 1300 о/min, а транслаторна брзина 60 mm/min. Време које је протекло од тренутка додире целе површине чела алата и радног комада до тренутка транслаторног кретања радног комада износи 14 min. Током експеримента аксијална сила је постепено повећавана. Одабрани параметри заваривања најближе одговарају вредностима преузетим из литературе. [12]

На слици 59 и 60. је приказан резултат експеримента. Добијен спој није задовољавајући јер износи свега 1/3 дебљине материјала. Мешање површинског слоја материјала догодило се тек у зони деловања веће аксијалне силе, у односу на почетак транслаторног кретања (које има константну вредност током целог експеримента). На слици 60 је прикан изглед наличија шав, примећује се да је шав друге боје, у односу на материјал.



Слика 59. Фотографија резултата изведеног експериментра на глодалици



Слика 60. Фотографија резултата изведеног експериментра на глодалици

Експеримент је поновљен са алатом бр. 4 (према поглављу 4.2), чија се геометрија трна разликује, у односу на први алат, по профилисаној левој завојници. Експеримент је поновљен са пластичном масом чије својство материјала није загарантовано, као и са ABS радним комадом добијеним штампањем помоћу 3Д технологије. За брзину обртања одабрана је брзина од 660 o/min. Док је за брзину заваривања коришћена брзина од 40 mm/min. На слици 61. је приказан добијен резултат експеримента. Може се уочити да је алат са завојницом код ове врсте материјла направио тунел током целе дужине и дебљине материјала, или је временски период од тренутка додира целе површине чела алата и радног комада, био исувише кратак. Тако да није постигнута довољна топлота како би се материјал промешао. Време које је протекло пре почетка транслаторног кретања радног комада износило је 5 min.



Слика 61. Фотографија извођена експеримента на глодалици

Радни комад у наредном експерименту је од већ поменуте ABS пластике. Параметри који су коришћени су мањег интензитета него код претходног експеримента. За број обртаја је одабрана брзина од 427 о/мин, затим брзина кретања радног комада 21,7 о/мин. Време које је протекло пре почетка транслаторног кретања радног комада износило је 10 мин. Добијен резултат експеримента је приказан на слици 62.



Слика 62. Фотографија резултата добијеног из експеримента

Резултат је визуелно знатно бољи у односу на претходни експеримент, али је шав и даље незадовољавајућих карактеристика. Из експеримената, у којима је коришћен алат бр. 4, се може закључити да алат са оваквом геометријом ствара сувише зрнасту структуру при FSW поступку. Остављање тунела током целе дебљине и ширине алата указује на употребу неодговарајућих параметара заваривања.

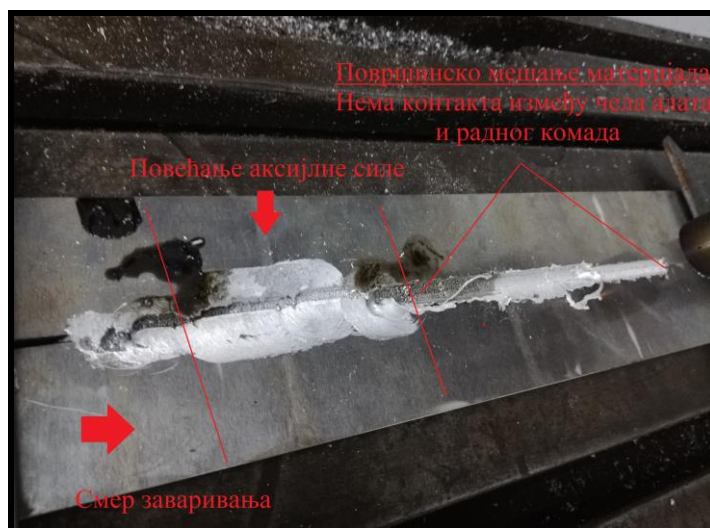
4.3.2 Експерименти над алуминијумом

У наставку рада експерименти заваривања FSW поступком биће извођени са радним коадима од алуминијума Al 5083 H111. Први експеримент (Слика 33) изведен је са алатом бр.4 (према поглављу 4.2), са профилисаним левом завојницом и карактеристика какве су већ наведене у раду.



Слика 63. Фотографија експеримента заваривања алуминијума

За параметре експеримента узета је брзина од 600 o/min, транслаторна брзина кретања радног комада од 40 mm/min, протекли временски период од тренутка додира целе површине чела алата и радног комада износио је 4 min. Аксијална сила је повећавана до тренутка када је радна машина, услед недовољне снаге почела да посустаје. Резултат експеримента је приказан на слици 64.



Слика 64. Резултат експерименталног заваривања алуминијума FSW поступком

Током овог експеримента, у другој фази FSW поступка односно фази продирања-брзина деловање аксијалне силе током продирања трна у радни комад је била исувише велика. Време које је протекло од тренутка међусобног контакта целе површине чела алата и радног комада је било исувише кратко за генерисање потребне топлоте. Током треће фазе овог поступка постепено је повећавано деловање аксијалне силе, до тренутка док није угрожен рад машине. Потом је наступила четврта фаза- фаза излачења, постепено је извлачен алат из радног комада и површински мешао материјал. На слици 65. је приказан изглед наличија шава.



Слика 65. Резултат експерименталног заваривања алуминијума FSW поступком

Са претходне слике се може видети већ поменута последица брзог продирања алата и недоварајућег деловања аксијалне силе у датом тренутку (тренутку када је силом трећа недовољно генерисана топлота). Такође, уочена грешка у експерименту је свакако подлога, радни комад је био ослоњен и причвршћен са два краја (током целе ширине и правца заваривања потпорна плоча није постојала), која би свакако ублажила количину истиснутог материјала. Висина истиснутог материјала се локално мењала и достизала је висину од 2-3 mm. Уочено је и да су се узорци алуминијума на самом почетку заваривања размакли, па је потребно додатно причврстити радни комад стегама, наредног пута са све четири стране.

На слици 66. је приказан алат бр. 4 (према поглављу 4.2) након извођења експеримента, уочавају се прилепљени остаци алуминијума на трну алата, што је за овај поступак заваривања једна од карактеристика. Као што је већ дефинисано у раду, профилисана завојница олакшава „мешање“ материјала, из тог разлога је пожељно очистити навоје на трну. На конвенционалним алатима, трн поседује спиралну завојницу са већим профилом, што омогућава ефикасније мешање и квалитетнији спој.



Слика 66. Фотографија алата након заваривања

Наредни екперимент обухвата коришћење алата бр 5. (Према поглављу 4.2). Алат поред профилисаног трна, карактерише и профилисано чело. За параметар брзине је узет најприближнији параметар у односу на препоруку из литературе, од 172 o/min. Транслаторна брзина кретања радног комада (брзина заваривања) износила је 21,7 mm/min. Временски период који је протекао од тренутка контакта између чела алата и радног комада до тренутка транслаторног кретања радног комада (III фазе заваривања) износио је 3 min. Време продирања алата, од тренутка првог контакта врха трна са радним комадом па до тренутка контакта целе површине чела алата са радним комадом износило је 7 min. Резултат екперимента је приказан на слици 67.



Слика 67. екперименталног заваривања алуминијума FSW поступком

Добијено лице шава овим експериментом је задовољавајуће, истиснут материјал је излазио на површину због геометрије коришћеног алата и бржег транслаторног кретања алата. Највећи проблем током извођења овог експеримента је триболошки проблем, термички необрађен алат и сам материјал од кога је израђен. Током експеримента трн алата се у потпуности отопио. Визуелни приказ лата након екперимента је дат на слици 68.б.



Слика 68. Фотографија алата: а) пре заваривања б) након заваривања

На слици 69. је приказано наличије шави, са слике се закључује да је створен заварен спој само у првих пар центиметара по целој дебљини материјала, након тога је стварен само само по површини радног комада. На слици је назначен почетни део (II фаза) завареног споја, која се шкартира код FSW поступка заваривања. Након узорковања завареног FSW споја, експериментално је заварен радни комад истог материјала и димензија MIG поступком заваривања. MIG заварен спој је такође узоркован према димензијама узорака добијеног FSW поступком.



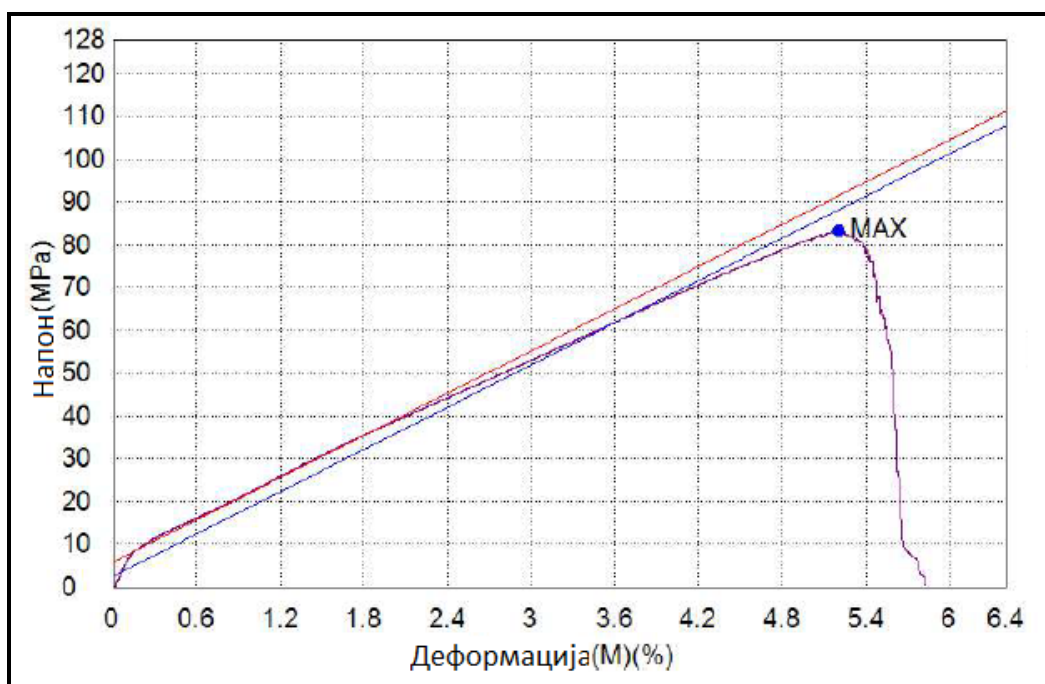
Слика 69. Резултат експерименталног заваривања FSW поступком

Испитивањем на затезање узорока MIG и FSW заварених спојева, константном брзином од 0.025 mm/sec, дошло се до резултата приказаних у табели.

Табела 4.3.1 Механичке карактеристике експериментално MIG и FSW заварених спојева

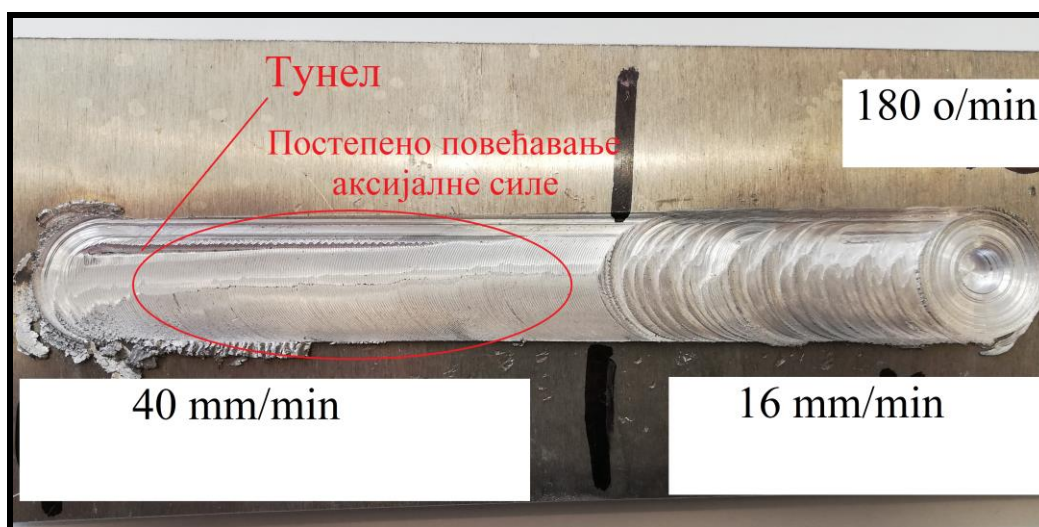
	Напон течења (Rp) 0.2 %	Затезна чврстоћа (Rm)	Напон кидања (Rk)	Деформација
Јединица	МПа	МПа	МПа	%
Узорак 1 MIG	123	289	274	40.7
Узорак 2 MIG	130	229	198	22.7
Узорак 3 MIG	116	222	208	22.0
Узорак 1 FSW	54	67	40	4.3
Узорак 2 FSW	47	64	54	3.9
Узорак 3 FSW	60	83	—	—
Просек MIG	123	247	227	28.5
Просек FSW	54	71	47	4.1

Дијаграм 4.3.1.. Дијаграм затезања узорка 3 FSW завареног споја



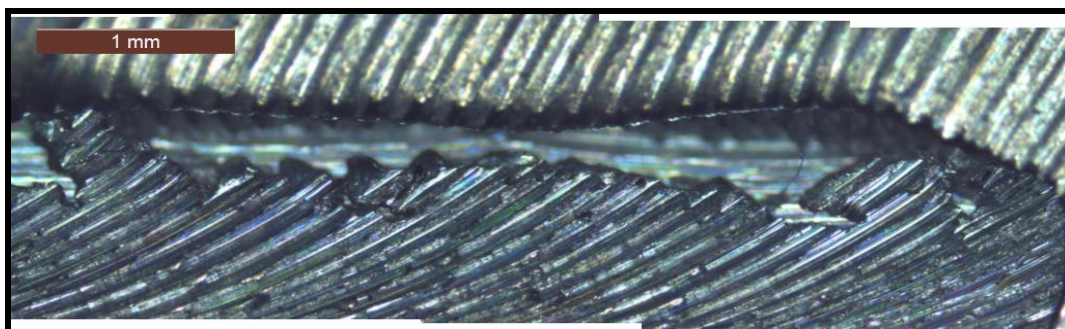
На основу добијених резултата из екперимента се може закључити да FSW заварен спој није добрих механичких карактеристика у односу на MIG, што је и очекивано јер се у структури промешаног материјала споја налази и примеса од конструкционог челика (материјал трна).

Наредни експеримент обухвата коришћење алата бр.6 (према поглављу 4.2). Параметри за извођење експеримента су брзина транслаторног кретања од 40 и 16 mm/min. и брзина обртања која је константна током извођења целог експеримента од 180 o/min. Аксијална сила је постепено повећавана у првом делу експеримента- када се примећује тунел. Временски период друге фазе (фазе продирања) износи 12 min, период од II фазе до почетка заваривања износио је 3 min. Резултат експеримента- заварен спој је приказан на слици 70.



Слика 70. Резултат експеримента заваривања FSW поступком

Експеримент је започет са брзином од 40 mm/min, са претходне слике се уочава присуство тунела које се јавља као грешка код високе брзине заваривања и недовољне аксијалне силе, у тренутку када је смањена брзина заваривања на 16 mm/min, видно се поспешује мешање материјала и лице шави добија другачији визуелни изглед. Са слике се такође може уочити (у односу на претходне експерименте) како промена геометрије алата утиче на визуелно лице шави. На слици 72. је приказан микроскопски изглед тунела, а на слици 71. наличије шави.



Слика 71. Фотографија макроскопског посматрања резултата (тунела)



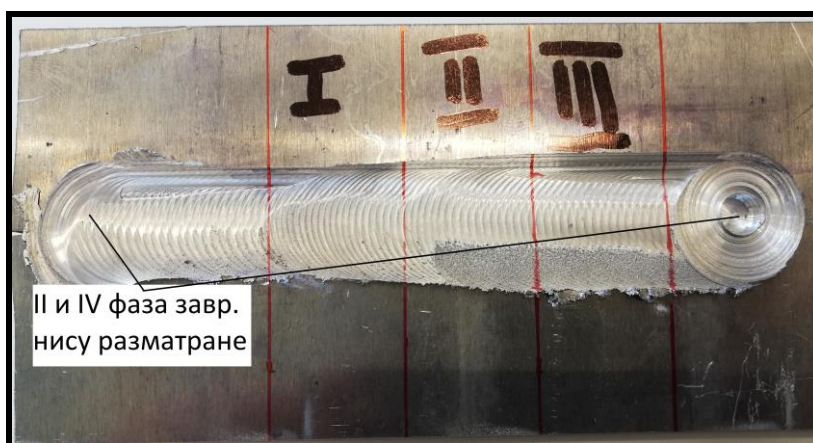
Слика 72. Фотографија завареног споја са супротне стране

Експеримент је поновљен са брзином транслаторног кретања од 11 mm/min током целог експеримента. Брзина обртања имала је исту вредност, од 180 o/min. Протекли временски период у II фази (период продирања) износи 15 min., док је време које је протекло од тренутка додира целе површине чела алата и радног комада, до тренутка транслаторног кретања радног комада износило свега 3 min. Резултат експеримента је приказан на слици 73.



Слика 73. Фотографија лица шав заварог споја

Наличије шав је визуелно истог изгледа као и шав у претходном експерименту. Током свих експеримената са алуминијумом је било потребно додатно деловање аксијалне силе, што није било могуће због прегревања и слабе снаге мотора коришћене радне машине. Након експеримента извршено је узорковање заварених комада оба експеримента. На сликама 74 и 75. је приказан начин узорковања радних комада.



Слика 74. Фотографија начина узорковања радног комада



Слика 75. Фотографија начина узорковања радног комада

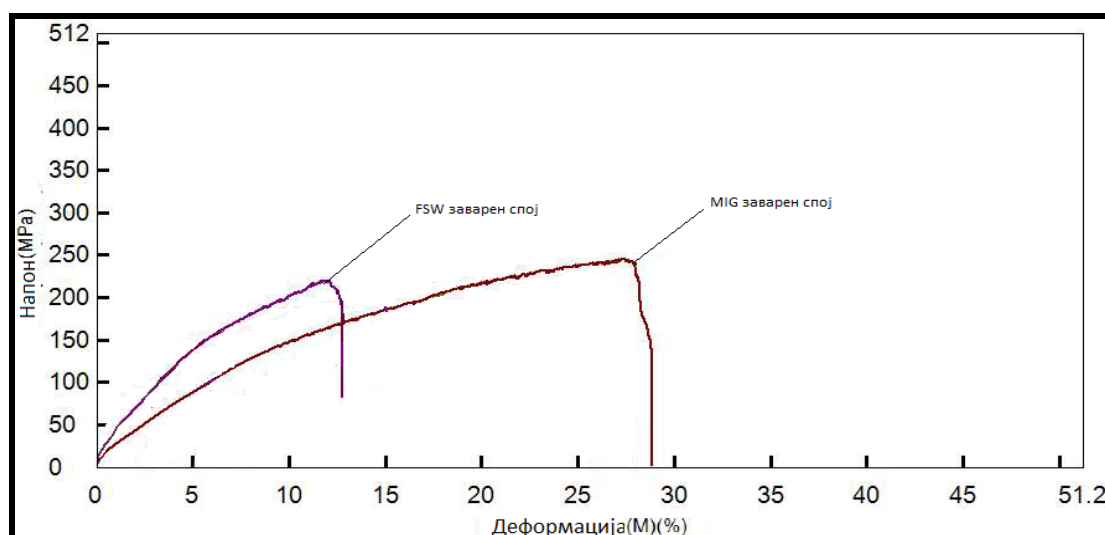
У табели 4.3.2 су приказани упоредни резултати испитивања на затезање MIG (већ приказани у табели 4.3.1) и FSW заварених спојева (узорци са слике 74 и 75). Испитивање на затезање је обављено константном брзином од 0.025 mm/sec.

Табела 4.3.2. Механичке карактеристике експериментално MIG и FSW заварених спојева

	Напон течења (Rp) 0.2 %	Затезна чврстоћа (Rm)	Напон кидања (Rk)	Деформација
Јединица	МПа	МПа	МПа	%
Узорак 1 FSW	38.5620	177.340	172.827	9,50429
Узорак 2 FSW	28.5090	148.689	148.486	7,25213
Узорак 3 FSW	18.1279	158.766	158.766	9,49717
Узорак 4 FSW	50.4737	136.249	135.550	7,13599
Узорак 5 FSW	116.238	205.694	205.694	11.0021
Узорак 6 FSW	42.1600	218.434	192.646	11.8213
Узорак 7 FSW	39.7519	153.213	122.060	6.88547
Узорак 1 MIG	123	289	274	40.7
Узорак 2 MIG	130	229	198	22.7
Узорак 3 MIG	116	222	208	22.0
Просек MIG	123	247	227	28.5
FSW макс.вред.	116.238	218.434	205.694	11.8213

Из добијених резултата се закључује да узорак под редним бр.6, поседује најбоље механичке особине добијене на затезање у односу на све изведене експерименте. Добијен спој је изведен користећи FSW параметре: брзина трансляторног кретања од 16 mm/min и брзину од 180 o/min. На слици 87. је приказан дијаграм затезања просечне вредности MIG узорака и FSW узорка бр.6, добијен на кидалици.

Дијаграм 4.3.2. Дијаграм затезања FSW и MIG завареног споја



За FSW изведен експеримент са највећом добијеном вредношћу је коришћен алат бр.6 са конусним челом алата који поседује концентрична профилисана удубљења. На слици 76 је приказана епрувета са најбољим карактеристика, док на слици 77. епрувета бр. 4 са најлошијим механичким карактеристикама и њен визуелни приказ лома.



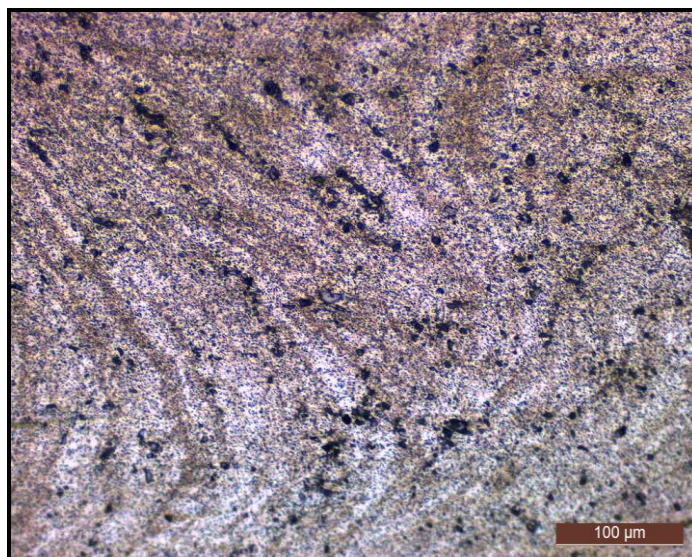
Слика 76. Фотографија епрувете са експериментално најбољим мех. карактеристикама



Слика 77. Фотографија епрувете са експериментално најлошијим мех. карактеристикама након лома

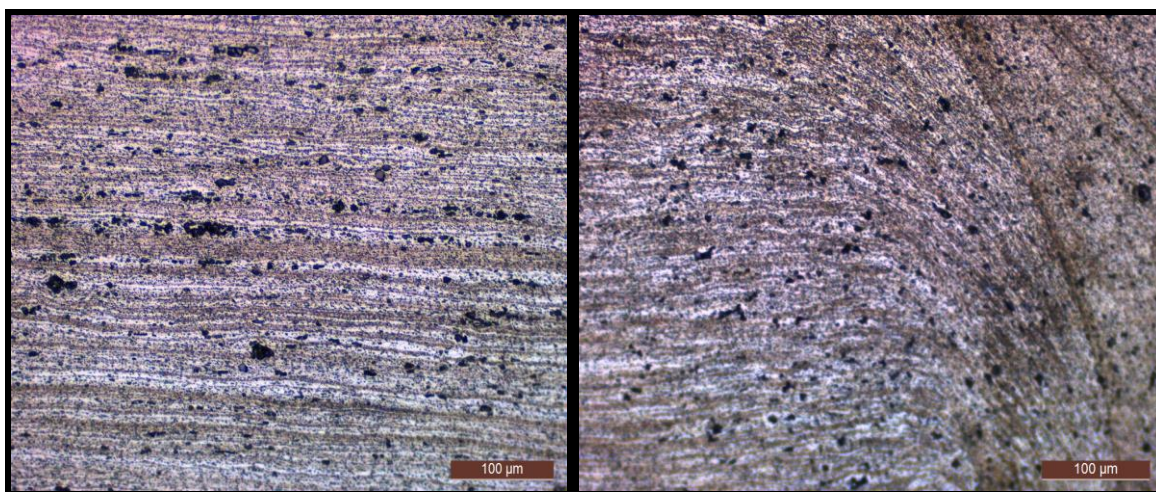
Током извођења експеримента коришћена је радна машина недовољне снаге, па се из тог разлога често мењала динамика јачине деловања аксијалне силе. Визуелни приказ микроструктуре завареног споја узорка бр.6 је приказан на слици 78.

Са слике се могу уочити настале пластичне деформације при мешању материјала. У зависности од конфигурације параметара заваривања и геометрије алата се добија разређена или гушћа микроструктура.



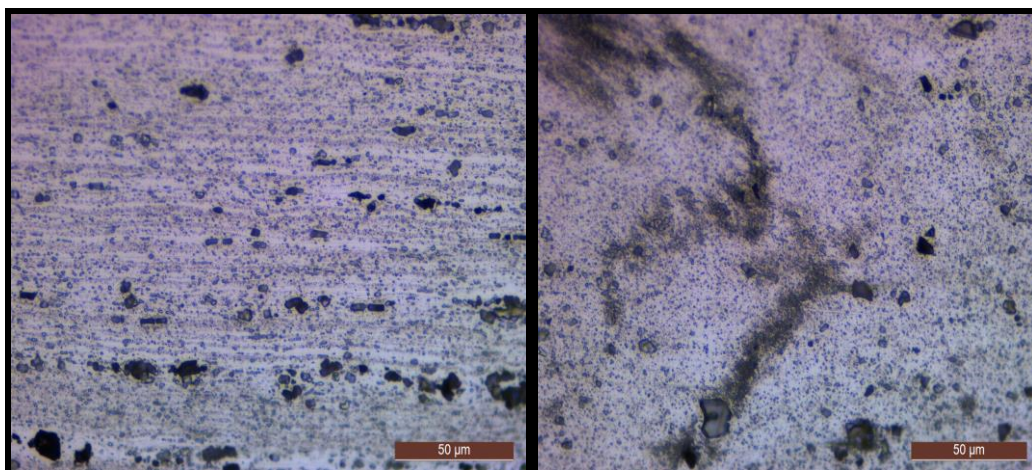
Слика 78. Фотографија микро структуре завареног споја узорка бр.6,

На слици 79. а) је представљена микроструктура основног материјала радног комада, док је на слици 79. б) приказан прелаз зоне мешања и основног материјала. Са слика се уочава разлика, на слици а) постоје праволинијске бразде карактеристичне за ову врсту материјала, док се на слици б) уочава зона основног материјала (са леве стране) и прелазна зона-зона мешања материјала.



Слика 79. Фотографија а) Микро структура основног материјала б)микро структура завареног споја узорка бр.6

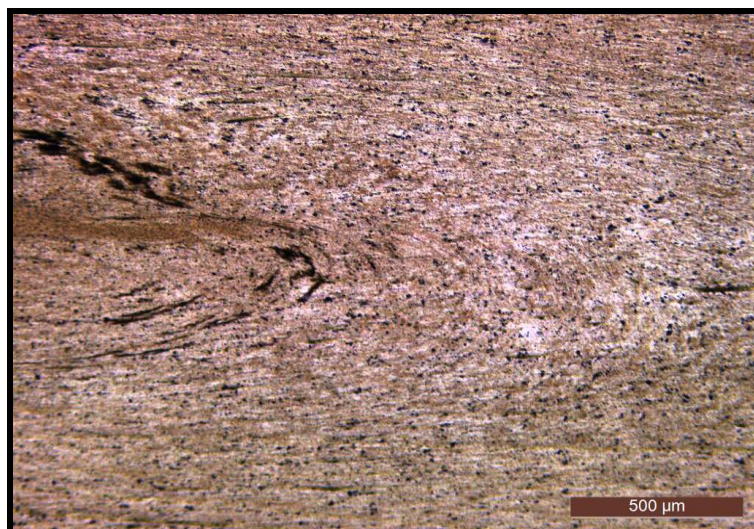
На слици 80. су приказане структуре основног материјала и завареног споја под увећањем од 50х, на слици б) се уочавају црна структура у облику танких линија, ова зона представља заправо ЗУТ зону завареног FSW споја.



а)

б)

Слика 80. Фотографија микро структуре основног материјала б) микро структура завреног споја узорка бр.6



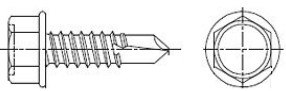
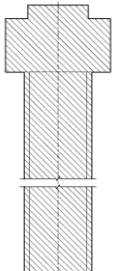
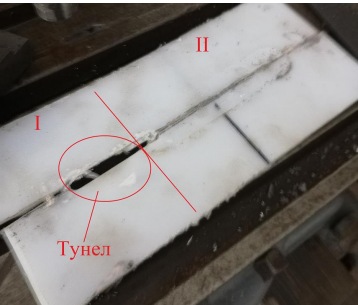
Слика 81. Фотографија микро структуре зоне изласка алата из материјала

Слика 81. представља фотографију структуре материјла у зони изласка алата из радног комада.

4.3.3 Визуелни резултати FSW поступка применом различите геометрије алата

На основу изведених екперимената са различитим геометријама алата, може се закључити на који начин одређена геометрија алата утиче на добијен визуелни спој применом FSW поступа. У наставку је дата табела са сумираним резултатима, где су приказани добијени FSW резултати у зависности од геометрија алата.

Табела 4.3.3. Резултати FSW поступка у зависности од геометрија алата

Геометрија алата	Добијени резултати
Алат бр.1 (4.2.1) 	
Алат бр.2 (4.2.1) 	
Алат бр.3 (4.2.1) 	
Алат бр.1 (4.2) 	

Алат бр.2 (4.2) 	
Алат бр.2 (4.2) 	
Алат бр.3 (4.2) 	
Алат бр.4 (4.2) 	

Алат бр.4 (4.2) 	 Превише зрнаста структура
Алат бр.5 (4.2) 	 Размакнуте плоче Истиснут материјал Смер заваривања
Алат бр.6 (4.2) 	

На основу изведених експеримената и добијених резултата може се потврдити утициј деловања вертикалне силе, брзине обртаја алата, транслаторног кретања (брзине заваривања) и геометрије алата, током FSW поступка заваривања, на квалитет и визуелни изглед добијеног споја.

4.4 Грешке у спојевима при FSW заваривању

Грешке које настају унутар споја применом поступка заваривања трењем са мешањем су:

- Тунели, који се јављају услед недовољног транспорта материјала у области око трна алата. Најчешће се јавља као последица велике брзине заваривања или недовољног деовања притисне (аксијалне) силе. Може доћи до отварања тунела и на самој површини радног комада, па се може и визуелно уочити. Грешке овог типа се испитују макроскопски, микроскопски и радиографским испитивањем [6] [8]

- Непроварен корен, јавља се услед недовољне пенетрације алата. Најчешће је последица недовољне висине трна, самим тим се материјал радног комада у пределу корене стране споја не меша довољно. Ова грешка претставља иницијалну прслину. [6] [8]

-Линије везивања, представља такође иницијалну прслину. Настаје као последица транспорта оксидних честица са површине радног комада у унутрашњост споја. Уочљив је радиографским испитивањем као танка кривудава линија. [8]

5. Место ERP софтвера у производном процесу

ERP (Enterprise Resource Planning) софтвер претставља софтвер који обухвата целокупно планирање ресурса предузећа. Захваљујући овом софтверу могу се врло лако аутоматизовати активности везане за: финансије, процес производње, ланац набавке, продаје, маркетинга, управљање залихама, управљање људским ресурсима, управљање пројектима, као и подршка клијентима. Овакви софтвери се најчешће примењују у пословању средњих и великих предузећима. Microsoft Dynamics NAV је ERP софтвер који пружа све наведене могућности. Овај софтвер поседује јединствену и безбедну комуникацију са централном базом података, која пружа ефикасан рад и приступ великог броја корисника истовремено. [4][14]

Софтвер омогућава и једноставно прилагођавање потреби фирме, језику и законима државе. Исплативост оваког софтвера се може огледати у податку да огроман број корпорацијских фирми своје пословање успешно води захваљујућу баш овом софтверском пакету. Захваљујући коришћењу ERP софтвера у производном процесу може се пратити, управљати и анализирати пословање целокупне компаније. За FSW поступак заваривања се могу пратити потребни параметри са аспекта финансија, као што је потребно време заваривања, разлика између планираног и оставреног времена, или трошкови, количина шкарта и исплативост поступка. [4]

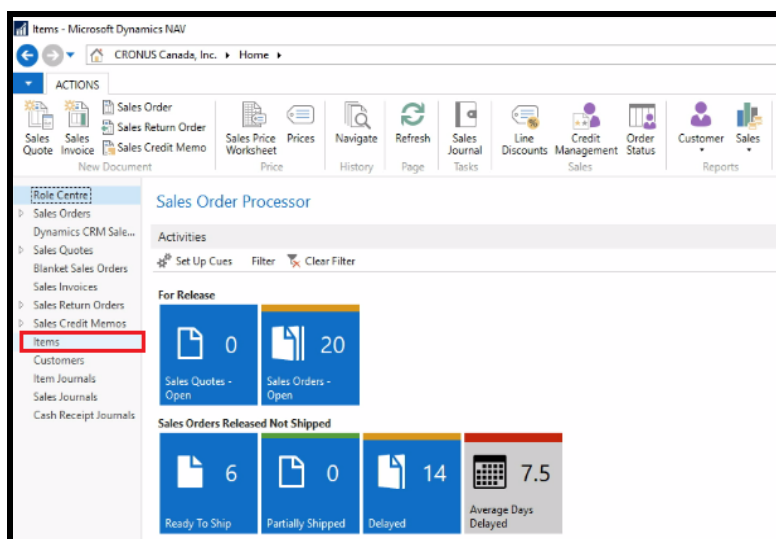
5.1 Артикал, саставница и производног поступак

Свака компанија која се бави производњом индустријском или других врсти добара поседује дефинисан и јасан садржај производног програма производа. Microsoft Dynamics NAV обједињује сваку врсту коначног производа, полупроизвода, стандардне робе и материјал у артикал. Артикал дакле може бити производ, полупроизвод, стандардна роба и материјал. Производ представља коначан производ који се продаје купцу. Полупроизвод представља део или компоненту која улази у коначан производ. За пример се може посматрати склоп као коначан производ, док је његов подсклоп полупроизвод. Стандардна роба подразумева робу која се набавља од добављача, као пример се може посматрати куповина готове шрафовске робе. Материјал представља основну сировину од ког је израђен полупроизвод или производ. Саставница представља збир свих компонената које улазе у коначан производ или полупроизвод. Производни поступак представља врсту и редослед производних операција које треба извршити над неком сировином како би се дошло до коначног производа. У наставку рада ће бити објашњен поступак креирања артикла, саставнице и производног поступка. Затим ће бити демонстриран начин праћења финансијских извешатаја и пословања фирме. За потребе рада биће коришћен „Microsoft Dynamics NAV“ тест верзија са тестним подацима.

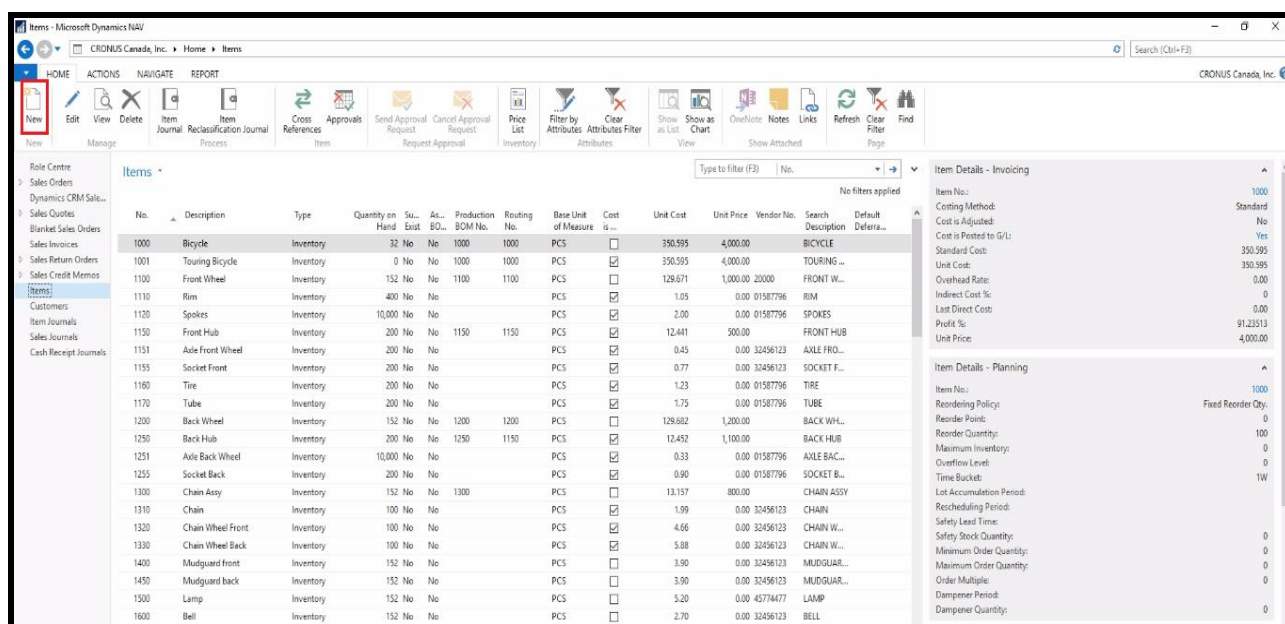
5.2 Креирање артикла

Артикал се креира сваког пута када је потребно унети у ERP систем неки (нов) од већ наведених врсти артикла. Сваки артикл који је већ направљен и коришћен се налази у бази, тако да се аутоматски учитава у листу коришћених артикала... Артиклима се приступа кликом на „Items“ (Слика 82), и том приликом се отвара база

са свим постојећим артиклима. Постојећи артикли се могу мењати или брисати означавањем одговарајућег артикла са листе и кликом на одговарајућу опцију Edit/Delete. У случају да је потребно додати нови артикл кликне се на опцију „New“, а што је приказано на Слици 83.

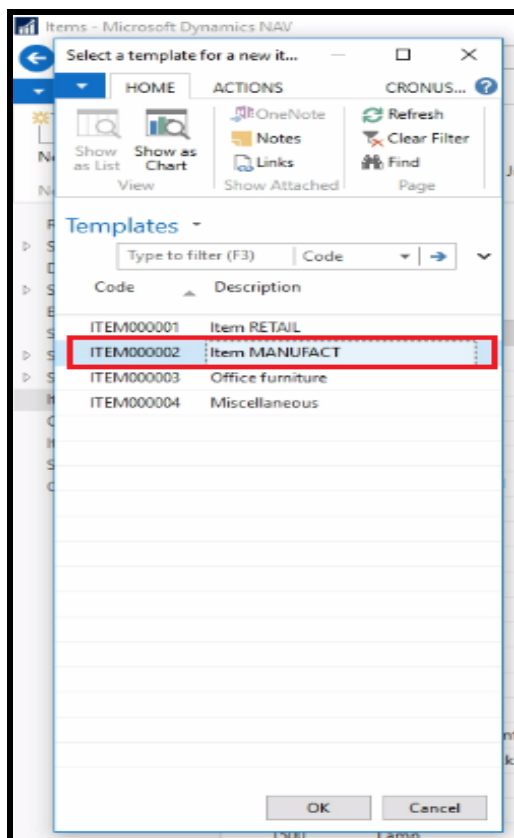


Слика 82. Приступање категорији „Items“ - MD NAV



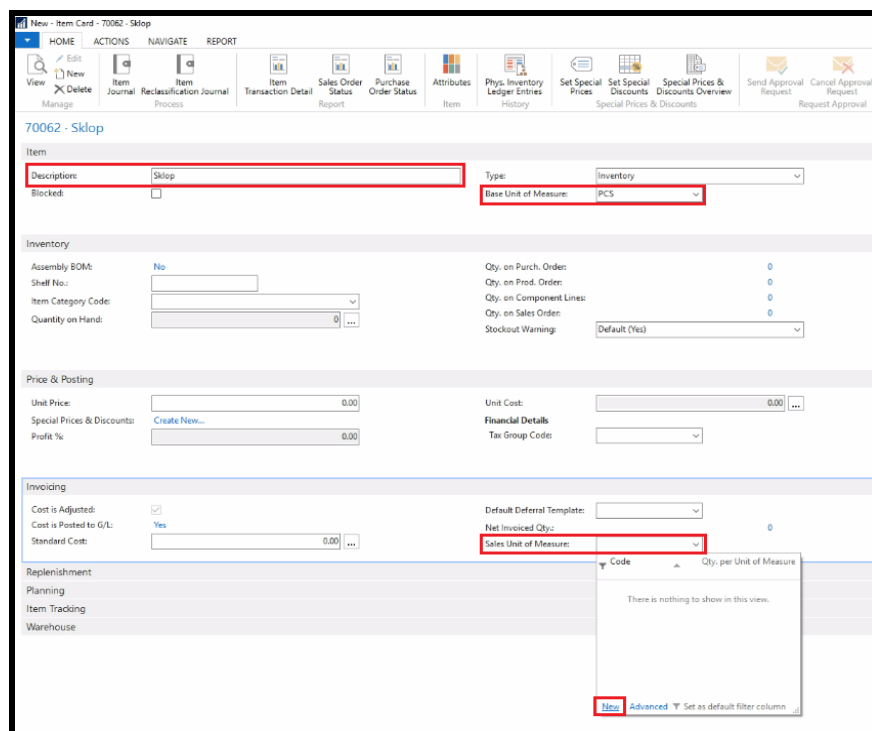
Слика 83.. Креирање новог артикла и листа постојећих-MD NAV

Када се одабере опција „New“ отвара се нови прозор (Слика 84) у коме је неопходно дефинисати категорију артикла, у овом случају бирамо „Item MANUFACT“.



Слика 84. Одабир категорије (одговарајућег обрасца)-MD NAV

Након овог корака отвара се нови прозор, у овом прозору се треба унети основне информације о артиклу, као што је назив, јединица мере, одабир складишта (магацина артикла), добављача, саставница и производни поступак.



Слика 85. Прозор „Item“-MD NAV

5.3 Креирање саставнице

Саставница сваког артикла садржи количине и информације о елементима од којих се састоји тај артикул. Уколико у систему већ постоји предвиђена саставница може се одабрати, или у случају да не постоји, креирати се нова. У делу „Production BOM No.“ из падајућег менија се за креирање ново саставнице одабере „New“, као што је приказано на Слици 86.

The screenshot shows the 'Replenishment' form in MD NAV. The 'Production' section is active, showing 'Manufacturing Policy' as 'Make-to-Order' and 'Routing No.' as 'R00010'. The 'Production BOM No.' dropdown is open, showing a list of items: 1000 Bicycle, 1100 Front Wheel, 1150 Hub, 1200 Back Wheel, 1250 Hub, 1300 Chain assy, and 1700 Brake. The 'New' button at the bottom of the dropdown is highlighted with a red box.

Слика 86. Дефинисање потребног времена операције контроле-MD NAV

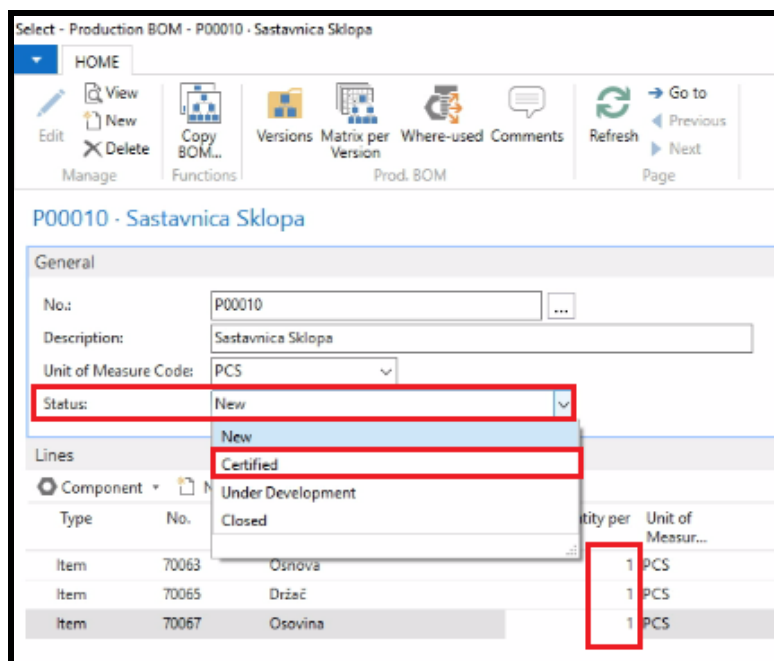
Избором за креирање нове саставнице отвара се прозор приказан на Слици 87, у коме се врши подешавање саставнице артикла.

The screenshot shows the 'P00010 - Sastavnica Sklopa' form in MD NAV. The 'General' section is active, showing 'No.' as 'P00010', 'Description' as 'Sastavnica Sklopa', 'Unit of Measure Code' as 'PCS', and 'Status' as 'New'. The 'Lines' section is also visible, showing a table of components with columns for 'Type', 'No.', 'Description', 'Quantity per', 'Unit of Meas...', 'Scrap %', and 'Routing Link Code'. The 'New' button at the bottom of the 'Lines' section is highlighted with a red box.

Слика 87. Креирање саставнице-MD NAV

Као што је приказано на слици 88, у пољу „Description“ уноси се назив саставнице, поље „Unit of Measure Code“ дефинише јединицу саставнице, одабиром PCS дефинисано је да се ради о комадима. У делу „Type“ дефинише се тип елемента саставнице и одабран је тип „Item“. У колони „No.“. Може се изабрати већ постојећи

елемент или се може креирати нови кликом на „New“, чиме се отвара нови прозор у коме кликом на „Item MANUFACT“ (одабира категорије) отвара наредни прозор где се врши креирање елемента саставнице (прво се креира артикал, затим саставница-осим за материјал, он не поседује саставницу). Након креирања потребног артикла и његове саставнице кликне се на „Ok“, и враћа на отворен први прозор (са слике 88.) где се сада помоћу претраге може пронаћи артикал.



Слика 88. Креирање саставницеи промена статуса-MD NAV

Након овог корака се завршава процес креирања саставнице и коначно је дефинисан производ у ERP (Microsoft Dynamics NAV) софтверу.

5.4 Креирање производног поступка

Производним или технолошким поступком се прописују операције које су потребне извршити на одређеном материјалу како би се дошло до коначног производа. У случају да је већ креиран производни поступак, он се може изабрати из падајуће листе. Дакле у прозори који је већ отворен (за креирање артикла) се одабере поље под називом „Routing No“ и одабере опција „New“. Након наведеног корака се добија прозор приказан на слици 89. У овом прозору се прво унесе назив и опис операције. У пракси се користе скраћенице за називе, као што је нпр. „PP FSW3 K10“, што би значило следеће:

PP – Производни поступак;

FSW 3 – Заваривање FSW поступком у трајању од 3 минута;

K10 – Контрола завареног споја 10 минута.

Select - Routing - R00010 - PP Z10 K20

HOME

Edit View New Routing Sheet Copy Routing... Versions Where-used Comments Refresh Go to Previous Next Page

R00010 - PP Z10 K20

General

No.: R00010 Description: PP Z10 K20 Search Description: PP Z10 K20

Type: Serial Version Nos.: Active Version: Last Date Modified: 5/29/2019

Status: New

Lines

Operation No. Type No. Description Setup Time Run Time Wait Time

Operation No.	Type	No.	Description	Setup Time	Run Time	Wait Time
10	Work Centre			0	0	0

No. Name

- 100 Assembly department
- 200 Packing department
- 300 Painting department
- 400 Machine department

New Advanced Set as default filter column

Слика 89. Прозор за дефинисање производног поступка („Routing No“)-MD NAV

Колона „Operation No.“ на слици 100. се односи на број операције и он најчешће почиње са бројем 10 и наставља се низом 20, 30, 40 итд. Такође редослед операција се може писати и као низ: 10, 15, 20, 25, 30 итд. Из падајуће листе „Type“ бира се тип производног процеса, односно да ли је у питању ручна („Work center“) или машинска обрада („Machine center“). У делу „No.“ врши се одабир производне операције, одабиром постојеће, или кликом на „New“ ради креирања нове. Даљи поступак креирања операције приказан је на Слици 90. У делу „Name“ уноси се назив производне операције. Део „Work Center Group Code“ дефинише о ком одсеку се ради:

- „Inventory department“ – складиште;
- „Production department“ – производни одсек

Приликом креирања производне операције бира се „Production department“, а потом се све то потврди кликом на дугме „ОК“. У овом делу могуће је подесити друге параметре, ради праћења и анализе креираног процеса, попут директних и индиректних трошкова и сл. Када је креирана нова производна операција у систему, може се приступити њеном одабиру и дефинисању потребног времена.

Слика 90. Креирање производне операције „FSW“заваривање-MD NAV

Када је изабрана производна операција уноси се време које је потребно за припрему „Setup time“ – време потребно да се радни комад постави на радну површину машине, центрирање и сл., и време обраде комада-„Run time“.

Clear Filter		
Description	Setup Time	Run Time
Zavarivanje FSW	5	3

Слика 91. Дефинисање потребног времена „FSW“заваривања-MD NAV

Након сваке производне операције потребно је извршити контролу. Потребно је напоменути, када се ради о контроли уноси се само време рада (Run time).

Select - Routing - R00010 - PP Z10 K20

HOME

Edit View New Delete Routing Sheet Copy Routing... Versions Where-used Comments Refresh Go to Previous Next

R00010 - PP Z10 K20

General

No.: R00010 Search Description: PP Z10 K20

Description: PP Z10 K20 Version Nos.:

Type: Serial Active Version:

Status: New Last Date Modified: 5/29/2019

Lines

Operation

Operati... No.

				Setup Time	Run Time	Wait
10	Work Centre	W00010	Završavanje FSW	5	3	
20	Work Centre	W00020	Kontrola	0	10	

Слика 92. Дефинисање потребног времена операције контроле-MD NAV

Последња операција у сваком производном поступку јесте контрола, након чега се врши потврђивање производног поступка у делу Status се из падајућег менија бира „Certified“, као што је приказано на Слика 92, а потом се кликне на дугме ОК, чиме се потврђује креирање производног процеса.

Након уношења производа, производних операција, у ERP софтвер и његовим ажурирањем од стране других корисника (нпр. руководиоца сектора, када је нека операција завршена), може се пратити и створити реална слика која се тренутно производна операција извршава над радним комадом, према плану (времену обраде и подешавања) може се срачунати колико је потребно времена да се обрада радног комада потпуно заврши. Комерцијална верзија овог софтвера поседује могућност динамичког праћења производње, тако да се нпр. купац аутоматски обавештава након завршетка одабраних операција. Такође овај софтвер нуди решења и за сектор набавке, након подешавања, пружа могућност управљања залихама. Нпр. уколико залихе одређеног артикла падну испод одабране границе, софтвер ће обавестити добављача унапред дефинисаном поруком да пошаље одређену количину робе. Прегледом поруџбенице („Sales orders“) се може видети да ли је производ послат купцу, или једноставним генерисањем извешатаја (филтрирањем података) преко картице „Report“ видети статус пошиљке или преглед купаца и зарађеног новца.

Коришћењем свих ових података може се доћи до тачних и детаљних информација, које се могу узети и побољшати пословање у будућности. Филтрирањем прорачуна зарада на производима се долази до увида реалне исплативости производа.

6. Правци даљег истраживања

Даљи развој рада би обухватао извођење екперимената са осмишљеним новим геометријама алата, али и са комбинацијом геометрије већ коришћених. Наставак екперимената би морао да се изводи на радним машинама веће снаге од коришћених у овом раду. Након додатних извођења екпримената са алатом управним на радни комад, посветио бих се проучавању и анализи FSW процеса заваривања под углом, као и његовим утицајем на квалитет оствареног споја.

Нумеричка симулација FSW поступка заваривања је свакако правац којим би се наставак овог истраживања требао кретати. Симулацијом процеса заваривања се може брже и ефикасније доћи до потребних параметара и података везаних за овај процес. Детаљна анализа резултата пружа увид у понашање радног комада и алата у односу на одабране технолошке параметре. Посматрањем температурне расподеле, напона и добијених деформација се може осмислити начин очувања топлоте у радном комаду (у току заваривања), као и поступак за додатно смањење деформација током овог процеса заваривања.

Након извођења експеримената и симулације процеса, треба се бавити предикцијом параметара, резултата механичких карактеристика споја и геометрија алата, управо ту вештачка интелигенција налази своје место. Сваки изведени заварен спој се треба употребити као улазни параметар за тренирање вештачке неуронске мреже, јер ће на тај начин резултат који даје неуронска мрежа сваког пута бити све прецизнији.

Ово истарживање, након освајања претходно наведених елемената се не треба окренути само заваривању истородних, већ екперимнтално покушавати и заваривање разнородних материјала FSW поступком заваривања.

7. Закључак

Фрикционо заваривање FSW поступком претставља релативно нову технологију заваривања која уз одабир потребних параметара и радних машина даје невероватне резултате. Према наведеној литератури, заварен спој добијен овим поступком поседује чак и боље механичке карактеристике од основног материјала. Циљ рада тежи добијању експериментално завареног FSW споја. Експерименти су извођени над материјално истородним радним комадима. За заваривање пластике је коришћена пластика добијена 3Д штампом и пластика незагарантованог састава, купљена у локалној продавници. За заваривање алуминијума су коришћени радни комади од леуре алуминијума Al5083 H111. Дебљине радних комада су износиле 4.5 mm у свим експериментима. Коришћени су различити импровизовани и конструисани алати за заваривање. Радне машине су мењане током експеримената, најбоље механичке карактеристике је поседовао спој донијен на глодалици „Wilheem“ групе, модела „VF20“. Током извођења експеримената долазило је до великог прегревања и кратких застоја радних машина, због неадекватног одвођења топлоте и недовољне снаге машине. Заварен спој са најбољим механичким карактеристикама добијен помоћу параметара: брзине обртаја од 180 о/min и транслаторне брзине од 16 mm/min. Макро и микро структура завареног споја потврђује присутност пластичног мешања материјала у зони контакта чела и трна алата са материјалом радног комада од алуминијума. Недостатак извођених експеримената је свакако недостатак потребних инструмената за мерење и праћење температуре и аксијалне (притисне) силе. Уз праћење ових параметара би се сигурно дошло до бољих резултата. Најприближнији изглед лица шава, у поређењу са лицем шава добијеним помоћу конвенционалних алата и машина, је успешно добијен помоћу алата са специјалном геометрији.

Механичке карактеристике, визуелни и структурни резултати завареног споја добијени у овом раду се са сигурношћу могу унапредити уколико би се наставили експерименти са радном машином веће снаге, неопходним инструментима за праћење основних параметара заваривања, што потврђује и стручна литература.

Microsoft Dynamics NAV представља врло функционално софтверско решење са могућношћу имплементације у различитим врстама и сегментима пословања. Овај ERP софтвер повезује производни процес, финансије, динамику пословања у једну целину. Захваљујући овој особини он је применљив у свим аспектима индустрије, са могућношћу анализе и праћења реалних података. Примена је могућа при имплементацији сваког производног процеса (поступка), самим тим и FSW поступка заваривања. Уз редовно ажурирање процеса операција, времена, потрошње материјала може се доћи до увида у финансијске добити пројекта или неког процеса.

8. Литература

- [1] Стаменковић Д., Ђурђевић М., Митић Д. (2006): Заваривање поступком „FSW“, Међународна конференција „Заваривање 2006“, Златибор
- [2] Радисављевић И., Живковић А., Милчић Д., Мијајловић М. (2010): Утицај параметара FSW поступка заваривања на квалитет завареног споја алуминијумске легуре 5052, Двадесет шесто саветовање са међународним учествовањем „Заваривање 10“, Тара, 02.06-04.06.2010
- [3] Pantelis D.I (2014): „Friction stir welding“, Naval Architecture and Marine, Engineering Технички универзитет Athens
- [4] Microsoft Official Training Materials for Microsoft Dynamics (2013): Microsoft Dynamics NAV 2013 as an ERP system, модул 1
- [5] Patel P., Patel S., Shah H. (2017): „Alloy for optimization of welding parameters by using Lathe Machine“, Експериментална студија случаја заваривања алуминијума AA6061, Универзитет Bardoli, Surat, Индија
- [6] WBC-Vmnet (2012): „Заваривање трењем“, студија случаја, бр. пројекта: 144684-TEMPUS-2008-RS-JPHES
- [7] Жиивојиновић Д. (2013), „Примена механике лома на процену интегритета заварених конструкција од легура алуминијума“, докторска дисертација, Машински факултет, Београд
- [8] Ђурђевић А. (2015): „Технологија заваривања трењем са мешањем Т-спојева од легуре алуминијум“, докторска дисертација, Машински факултет, Београд
- [9] FSW производни програм компаније „Esab“, приступљено 10.09.2019: <https://www.esabna.com/us/en/automation/process-solutions/fsw/index.cfm>
- [10] FSW производни програм компаније „Fooke“, приступљено 10.09.2019: https://www.fooke-portalfraemaschinen.de/en_US/fsw-machines.html
- [11] FSW производни програм компаније „PTG-Holroyd precision“, приступљено 10.09.2019: <http://www.holroyd.com>
- [12] Pirizadeh M., Azdast T., Ahmadi S., Shishavan S., Bagheri A. (2013): „Friction stir welding thermoplastics using a newly design tool“, Mechanical Engineering Department, Универзитет Urmia, Iran
- [13] Khourshid A., Sabry I. (2016): „Analysis of welded joints using friction stir welding, metal inert gas and tungsten inert gas“, истраживачки рад, Engineering and technology in India, Индија
- [14] Kaur J. (2016): „Customer Relationship Management: A Study of CRM Policies of Different Companies“, часопис: Global Journal of Finance and Management, ISSN 0975-6477 Volume 8, Research India Publications
- [15] Narges D., Cervera M., Chiumenti M., (2018): „Effect of the Tool Tilt Angle on the Heat Generation and the Material Flow in Friction Stir Welding“, CIMNE, Технички факултет, Барселона, Шпанија
- [16] Sibalic N., Vukcevic M. (2019): „Numerical Simulation for FSW Process at Welding Aluminium Alloy AA6082-T6“, Faculty of Mechanical Engineering, University of Montenegro, st. Džordža Vasiingtona bb, 81000 Podgorica, Montenegro
- [17] Zhu Z., Wang M., Zhang H., Zhang X., Yun T., Wu Z. (2017): „Finite Element Model to Simulate Defect Formation during Friction Stir Welding“, научни рад, State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China
- [18] Maleki E. (2015): „Artificial neural networks application for modeling of friction stir welding effects on mechanical properties of 7075-T6 aluminum alloy“, Mechanical

- Engineering Department, Sharif University of Technology-International Campus, Kish Island, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering paper
- [19] Yousif Y. K., Daws K. M., Kazem B. I. (2008): „Prediction of Friction Stir Welding Characteristic Using Neural Network“, Department of Mechatronics Engineering, Baghdad University, Baghdad, Iraq
- [20] Mishra R.S, Ma Z.Y (2005): „Friction stir welding and processing“, Center for Friction Stir Processing, Department of Materials Science and Engineering, University of Missouri, USA and Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China
- [21] Madanhirea I., Mbohwa C. (2016): „Enterprise resource planning (ERP) in improving gggoperational efficiency: Case study“, School of Engineering Management, University of Johannesburg, Auckland Park 2006, Johannesburg, 0027, South Africa
- [22] Rai R., De a., Bhadeshia H.K D.H., D. T. (2011): „Friction stir welding tools“, научни часопис, „Science and Technology of Welding and Joining“