

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу
Војна академија Универзитета одбране у Београду



Назив студијског програма: Војноиндустријско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Пројектили и упаљачи

Предмет: Производне технологије

Број индекса: 502/2013

Милош З. Савић

Фрикционо заваривање

Дипломски рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. др Нада Ратковић, доцент - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру дипломског рада кандидат треба да опише суштину процеса ЗТ, са приказом фаза процеса заваривања, као и преглед основних поступака фриксионог заваривања и то од конвенционалних до савремених поступака, какав је FSW, који посебно треба да анализира.

Кроз приказ процеса FSW, кандидат треба да спроведе одговарајућу анализу општег карактера. У самој анализи да прикаже релевантне технолошко-металуршке параметре везане за заваривање мешањем, да покаже основне врсте спојева, као и заварљиве материјале. Да детаљно објасни и прикаже структуру завареног споја.

Такође, треба да наведе основне предности и недостатке овог поступка и да представи примену у различитим областима индустрије.

Препоручена литература:

- 1) Нада Ратковић, Моделирање процеса заваривања трењем машинских делова различитих облика и материјала, докторска дисертација, Машински факултет Крагујевац, 2009.
- 2) Мирослав Б. Ђурђановић, Перспектива примене топлоте генерисане трењем у обради метала, научни рад, Машински факултет Ниш 2003.

Крагујевац, септембар 2017

ментор:

др Нада Ратковић, доцент

Резиме

На основу истраживања и анализе расположиве литературе у овом раду је приказан поступак фрикционог заваривања, са посебним освртом на фрикционо заваривање мешањем – FSW. У посебном поглављу описани су технолошки и металуршки параметри процеса, као и алати и уређаји за FSW. Овај рад такође пружа увид и у материјале заварљиве овим поступком. На крају, представљена је примена фрикционог заваривања мешањем кроз призму индустрије.

Кључне речи: фрикционо заваривање мешањем, трење, заварени спој, параметри заваривања, алат.

Resume: Based on research and analysis of the available literature in the final paper is presented friction welding process, with a special emphasis on frictional still welding – FSW. Special chapter summarizes the technological and metallurgical parameters of the process, as well as tools and equipment for FSW. This study also provides insight into the materials who are weldable with this procedure. At the end, application of friction stir welding is presented through the prism of industry.

Keywords: friction stir welding , friction, weld joint, welding parameters, tool.

Садржај

1. Увод.....	1
2. Основе заваривања трењем.....	2
2.1. Основне фазе при заваривању трењем	2
2.1.1. Континуално заваривање трењем	4
2.1.2. Инерцијално заваривање трењем.....	7
2.1.3. Аксијално заваривање трењем (вибротрење).....	8
2.1.4. Орбитално заваривање трењем.....	8
3. Заваривање трењем са мешањем – FSW.....	10
3.1. Фазе процеса FSW	10
3.2. Метал шава.....	13
3.3. Структура завареног споја.....	14
3.4. Течење материјала у процесу FSW	16
3.5. Грешке у завареном споју.....	19
3.6. Карактеристике завареног споја.....	20
3.6.1. Тврдоћа заваара.....	20
3.6.2. Чврстоћа и замор материјала	21
3.7. Врсте заварених спојева	22
3.8. Предности и недостаци поступка FSW	24
4. Технолошки и метарлушки параметри процеса FSW	27
4.1. Брзина ротације алата	28
4.2. Брзина заваривања	28
4.3. Силе заваривања	29
4.4. Угао нагиба и дубина продирања чела алата.....	30
4.5. Алат за заваривање	32
4.5.1 Облик рамена и чела алата.....	33
4.5.2. Облици трна алата	35
4.5.3. Материјал алата	38
5. Материјали заварљиви FSW поступком	40
6. Примена FSW	42
6.1. Бродоградња.....	42

6.2. Авио и космичка индустрија	43
6.3. Аутомобилска индустрија	45
6.4. Производња шинских возила	45
6.5. Остале области примене	46
7. Машине за FSW	48
8. Закључак	49
9. Литература	50

1. Увод

Од савремених конструкција се захтева да испуне високе стандарде у погледу квалитета, како би задовољиле експлоатационе функције, а то изискује потребе спајања делова и елемената конструкције, између осталих и чврстом нераздвојивом везом (заварени спој), како од истих тако и од различитих материјала. Заваривање трењем је метода која задовољава ове захтеве.

Имајући у виду ту чињеницу да метода заваривања трењем припада тзв. напредним технологијама, то је један од разлога да се овај рад посвети тој методи спајања метала. Напредна технологија у области заваривања трењем је заваривање трењем са мешањем.

Заваривање трењем са мешањем, скраћено ЗТМ (на енглеском језику Friction Stir Welding - FSW) је релативно нов поступак заваривања настао крајем 1991. године од стране Wayne M. Thomas-а из Института за заваривање TWI (The Welding Institute, Cambridge, UK), који је успешно заварио лимове од легуре алуминијума. Поступак је веома брзо, већ 1994. године, добио своју комерцијалну примену и изазвао велику пажњу [4].

Прва примена FSW поступка везује се за производњу железничких возила и заваривање алуминијума и њихових легура, али данас има веома широк опсег. Данас се овим поступком успешно заварује велики број чистих метала, легура метала, као и неметала. Овај поступак заваривања се користи у производњи шинских возила, аутомобилској индустрији, авиоиндустрији, бродоградњи.

Заваривање трењем је поступак спајања притиском, при чему се чврст спој остварује пластичном деформацијом трењем загрејаних контактних површина основних материјала. Загревање при заваривању трењем је последица преображаја механичке енергије у топлотну, при чему количина развијене топлоте зависи од снаге потребне да се савлада торзиони момент силе трења. Концентрисано издвајање топлоте и пластична деформација приконтактних слојева основа су за процес заваривања трењем.

2. Основе заваривања трењем

Заваривање је процес израде нераздвојивог споја успостављањем међуатомских веза између делова који се заварују, при коме се појединачно или комбиновано користи топлотна и механичка енергија, а по потреби и додатни материјал. Заваривањем је могуће спајање метала са металом, неметала са неметалом и метала са неметалом.

Сви поступци заваривања најчешће се сврставају у две групе: **заваривање топљењем** и **заваривање притиском**, тј. на заваривање у течnoj и чврстоj фази. Односно постоје видови заваривања код којих доминирају топлотни циклуси и они код којих доминирају деформациони циклуси [1].

Заваривање топљењем се изводи топљењем материјала који се заварује, уз додатни материјал или без њега. Код заваривања притиском, заваривање се одвија у чврстом или омекшаном стању на месту споја помоћу притиска или ударним оптерећењем углавном без додатног материјала. Међутим у пракси ови процеси спајања нису увек јасно разграничени тако да се поједини поступци сврставају у трећу групу термомеханичког заваривања. Трећој групи припадају поступци код којих се јавља делимично топљење, а истовремено је неопходно и дејство притиска ради остваривања споја.

2.1. Основне фазе при заваривању трењем

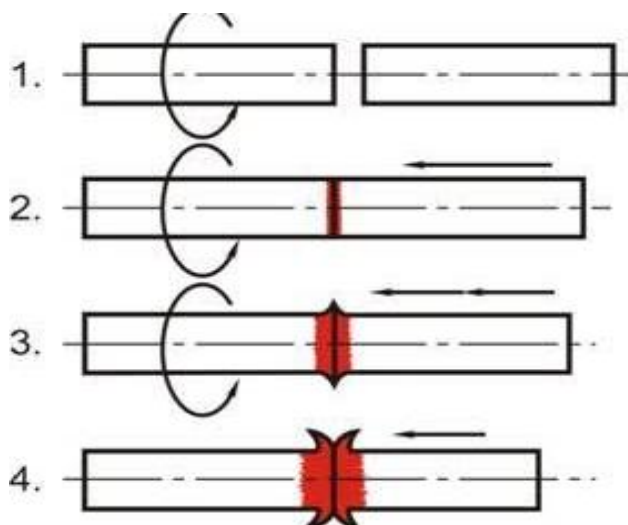
Код заваривања трењем начин загревања материјала, тј. начин довођења топлоте на месту спајања у физичком смислу потпуно је другачији од осталих видова заваривања. Материјал се не загрева неким спољашњим извором топлоте (ковачка ватра, електрична струје и сл.), већ се то остварује топлотом која се трансформише из механичке енергије као резултат процеса трења и то директно на месту спајања. Извор топлоте је унутрашњи, генерисање топлоте је строго локализовано и одвија се у танким површинским слојевима метала. Спајање метала се одиграва у чврстом стању, јер се шав формира при температури нижој од температуре топљења основног материјала.

При заваривању трењем танак слој материјала се загрева и прелази у пластично стање, а уз деловање силе притиска остварује се заваривање. Количина ослобођене топлоте зависи од снаге потребне да се савлада сила трења. Загревање је неравномерно по пресеку, али захваљујући кондукцији, постиже се равномерно загревање.

Металне површине реалних тела нису идеално глатке и чисте, па се контакт на почетку заваривања остварује само на врховима неравна површина. Повећање контакте површине се остварује пластичном деформацијом микрозапремина слојева површине. За

то је неопходан спољни притисак, односно рад који ће да истисне оксиде и разне нечистоће путем пластичног течења макрозапремина метала на површини контакта. Услови за почетак пластичне деформације се побољшавају снижавањем напона течења, који код већине метала опада са повећањем температуре. Најпре долази до физичког контакта по готово целој површини трења, а затим између површина приближених на удаљење реда величине параметра кристалне решетке, те настаје везе које имају хемијску природу. Главну улогу за формирање заједничких кристалних решетки има пластична деформација под дејством спољњег притиска.

Основне фазе при заваривању трењем приказане су на слици 2.1.



Слика 2.1 Основне фазе при заваривању трењем [1]

У првој фази (слика 2.1-1) један део се обрће док други мирује.

У другој фази, када се постигне довољна обимна брзина, делови се доводе у контакт аксијалном силом и почиње трење (слика 2.1-2).

У трећој фази долази до интензивног трења, које доводи до ослобођања топлоте и уз довољан притисак стичу се услови за остваривање споја (слика 2.1-3). Ротација у четвртој фази престаје, а услед дејства максималног притиска постиже се максимална пластична деформација. Затим долази до истискивања упластиченог материјала, тако да се по ободу споја формира венац.

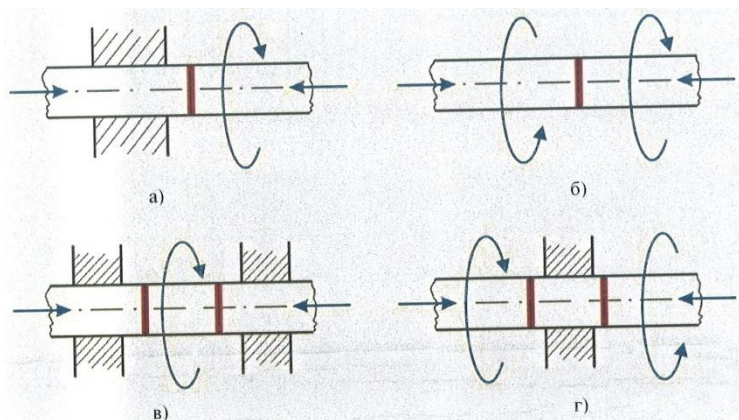
Класификација заваривања трењем се врши на основи релативног кретања заварених делова као и на основу погона који обезбеђује одговарајуће кретање делова који се заварују.

Разликују се следеће методе заваривања трењем:

- 1) континуално (конвенционално),
- 2) инерцијално (процес са замајцем),
- 3) комбиновано,
- 4) вибротрење,
- 5) орбитално заваривање трењем.

2.1.1 Континуално заваривање трењем

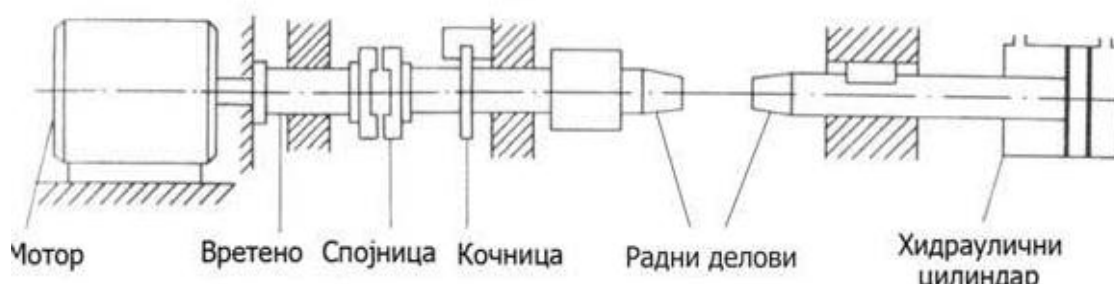
При заваривању трењем са континуалним погоном, енергија се у зони трења ослобађа ротирањем једног или оба заварена дела (слика 2.2 а, б), после чега се ротација прекида, а делови сабијају. Постоје различите варијанте ротационог кретања узорка: може један део да ротира а други не (слика 2.2 а), могу оба дела да ротирају у истом или супротном смеру (слика 2.2 б), различитим угаоним брзинама или оба дела мирују а трећи између њих ротира (слика 2.2 в). Такође, могуће је да оба дела ротирају, а трећи уметнути део је непомичан (слика 2.2 г).



Слика 2.2: Континуално заваривање трењем:

а) један део роти а други не, б) оба дела ротирају, в) заваривање са обртним уметком, г) заваривање са непокретним уметком [1]

Континуално (конвенционално) заваривање трењем захтева одговарајућу машину и опрему са системом „вретено–кочиони систем“, затим опрему за контролу аксијалног притиска, као и прецизну временску контролу процеса.



Слика 2.3 Шема континуалног заваривања трењем [1]

Принцип рада је следећи: радни део који ротира причвршћује се у чељусти вретена, неротирајућа компонента се такође поставља у чељусти или у хидраулични држач (слика 2.3).

Да би се делови загрејали до пластичног подручја, тј. температуре заваривања непокретни део се доводи у контакт са обртним делом уз повећање аксијалног притиска до граничне вредности. Затим се делује великом силом кочења чиме се нагло зауставља обртање уз истовремени пораст притиска да би се комплетирао шав.

Сам процес заваривања састоји се од три фазе и то:

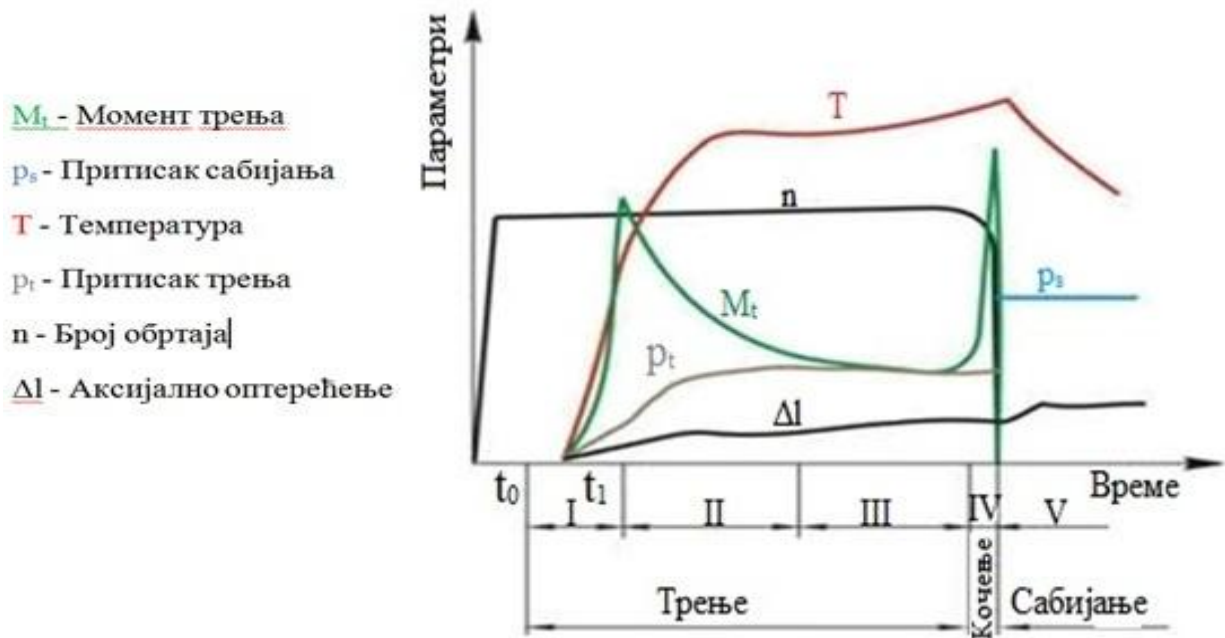
1. Фаза трења

- Фаза I: фаза почетног трења;
- Фаза II: фаза нестабилног трења;
- Фаза III: фаза стабилног трења;

2. Фаза кочења

3. Фаза сабијања

Фазе заваривања као и параметри представљени су на слици 2.4, у функцији времена заваривања.



Слика 2.4 Фазе у процесу заваривања трењем и промена параметара заваривања по фазама у току времена [1]

Фаза I процеса заваривања трењем траје неколико десетих делова секунде до неколико секунди. На трајање ове фазе утичу притисак трења, храпавост површине, паралелност површине, коефицијент трења.

У фаза II долази до мешања честица оба ОМ. У веома уској зони, ширине од неколико микрометара, долази до дифузионе прерасподеле појединих легирајућих елемената. У зони трења може доћи до појаве течне фазе, појава је могућа само у случајевима када у споју настају интерметалне фазе, чија је температура топљења нижа од температуре у зони споја, што неповољно утиче на спој. У фази нестабилног трења, оба ОМ трпе велику пластичну деформацију и загревају се до високих температура. На површини трења се формира слој високе пластичности. Дебљина овог слоја је око 2 mm. Ова фаза је нешто дужа од осталих и може да траје неколико секунди, што зависи од својства ОМ и режима заваривања.

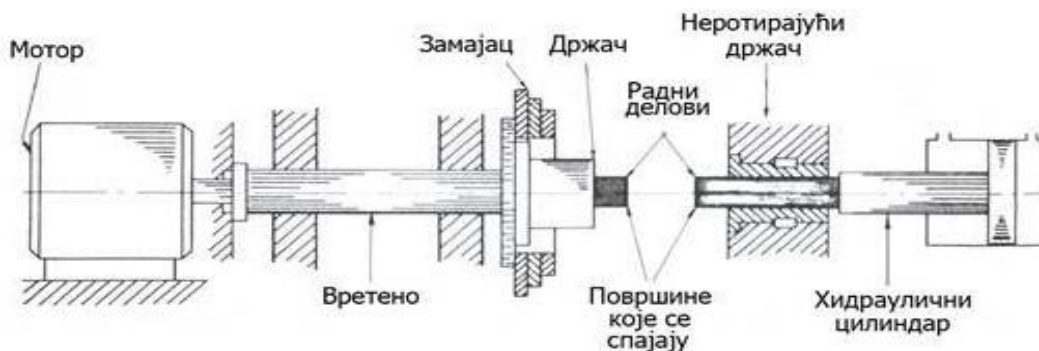
Фаза III – фаза пластичног течења када се пластична деформација повећава у плитким површинским слојевима, уместо до тада равномерног деформисања по целој дубини. Ову фазу карактерише динамичка топлотна равнотежа, између количине развијене топлоте и топлоте проведене кондукцијом у ОМ и конвекцијом у околну средину преко истиснутог метала.

Завршни стадијум фазе трења је фаза кочења. У овој фази се мења карактер, облик и величина пластичне деформације а све због смањења брзине трења. Смањује се количина ослобођене топлоте, деформација се помера ка периферији, па се продужавањем фазе кочења повећава количина метала истиснутог ван споја.

Последња фаза процеса заваривања трењем је сабијање. У овој фази нема обртања заварених делова, па се сабојање одвија без дејства момента трења. Долази до померања метала у аксијалном и радијалном правцу, уз развијање мање количине топлоте услед пластичне деформације. Заварени делови се приближе на растојање реда величине параметра кристалне решетке, активира се метална веза између два основна материјала и формира се заједничка кристална решетка на граничним површинама.

2.1.2. Инерцијално заваривање трењем

Инерцијално фрикционо заваривање се заснива на томе да се предодређена количина енергије, нагомилана у слободно ротирајућем замајцу, претвори у фрикциону топлоту, неопходну за остваривање шавца. Ротирајући делови машине (склоп замајац-вретено) се убрзавају до жељене брзине која одговара специфичном енергетском нивоу (слика 2.5). Када се постигне потребна брзина, успоставља се слободан обртни систем.

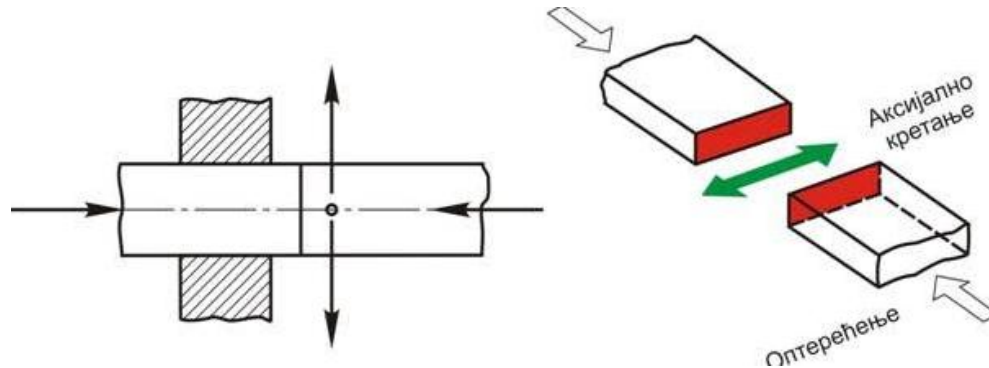


Слика 2.5 Шема инерцијалног заваривања трењем [1]

Површине које се заварују се довољно проближе, а кинетичка енергија слободног замајца брзо се трансформише у топлоту током трења на контактним површинама радних делова, изазваног аксијалним притиском помоћу хидрауличног цилиндра. Величина момента инерције замајца подешава се додавањем или скидањем замајних дискова.

2.1.3. Аксијално заваривање трењем (вибротрење)

Суштина овог начина заваривања јесте у следећем: један заваривани елемент је непокретан, а други изводи попречно осцилаторно кретање (слика 2.6).

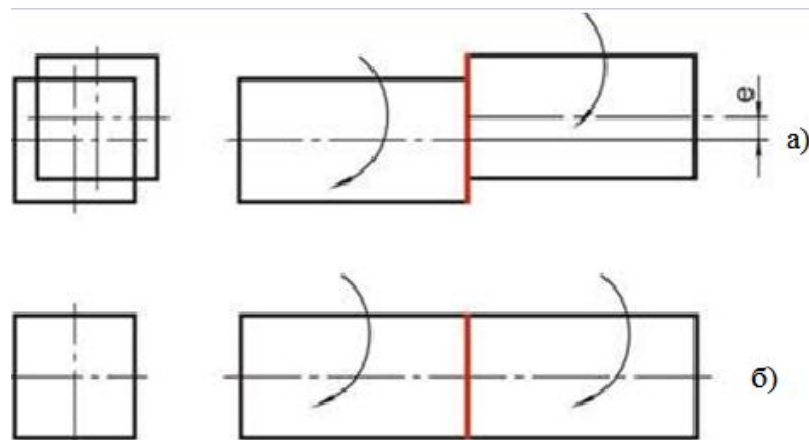


Слика 2.6 Шема заваривања вибротрењем [1]

Осцилаторно кретање се одвија са малом амплитудом а великом фреквенцијом. Заварени делови су притиснути извесном силом притиска. На контактним површинама, као последица трења, генерише се топлота која довољно загрева материјал, тако да се у тренутку постизања саосности образује спој.

2.1.4. Орбитално заваривање трењем

Код орбиталног заваривања делови који се спајају могу бити не само кружног већ и другачијег попречног пресека. За разлику од конвенционалног заваривања, делови који се спајају нису постављени коаксијално. Најчешће оба дела ротирају, али тако да описују кружну путању – орбиту (слика 2.7).



Слика 2.7 Шема орбиталног заваривања: а) период загревања, e – радијус орбите, б) период прокивања [1]

Процес заваривања се одвија у две фазе од којих је прва загревање, а друга прокивање. Делови ротирају толико времена колико је потребно да се материјал довољно загреје услед дејства трења на додирној површини радних делова.

Радијус обртања се у току фазе загревања непосредно мења од $e_{\max}$ до нуле. Свака тачка на завариваној површини једног елемента извршава кружно кретање у односу на супротну тачку која лежи на површини другог завариваног елемента; радијус тих кружних путања једнак је величини ексцентрицитета (e).

При постизању узајамне саосности, односно када ексцентрицитет буде једнак нули (слика 2.7 б), релативно кружно кретање заварених делова престаје, тако да је материјал довољно загрејан за фазу прокивања, са којом се завршава просец формирања завареног споја.

3. Заваривање трењем са мешањем – FSW

У свим технологијама заваривања трењем, топлота може да се генерише на два начина: директно и индиректно. Директно генерисање топлоте, постоји када њено деловање има задатак да промени својства материјала оба тела фрикционог пара и да их истовремено доведе у стање погодно за реализацију предвиђене технолошке операције. Топлотни ефекти трења могу да се искористе само у једном технолошком циклусу у коме учествују истовремено оба тела. Овакав начин генерисања топлоте је карактеристичан за највећи број варијанти фрикционог заваривања (13 варијанти) [1].

Индиректан или посредан начин генерисања топлоте постоји код оба облика заваривања трењем и у свим видовима термо-фрикционе обраде. Дејство топлоте овде има задатак да изразито промени својства материјала само једног од тела фрикционог пара. Својства и геометријске карактеристике другог тела у контакту треба да остану непромењене.

„Друго тело“ код индиректног начина генерисања у ствари представља специјалан алат који истовремено служи да индукује топлоту и да реализује предвиђену технолошку операцију.

Friction stir welding (FSW) – Фрикционо заваривање мешањем је типичан пример индиректног начина преношења топлоте. Назива се још „заваривање трењем помоћу алата“. Физичка суштина самог процеса формирања споја је иста као и код конвенционалног заваривања трењем.

3.1. Фазе процеса FSW

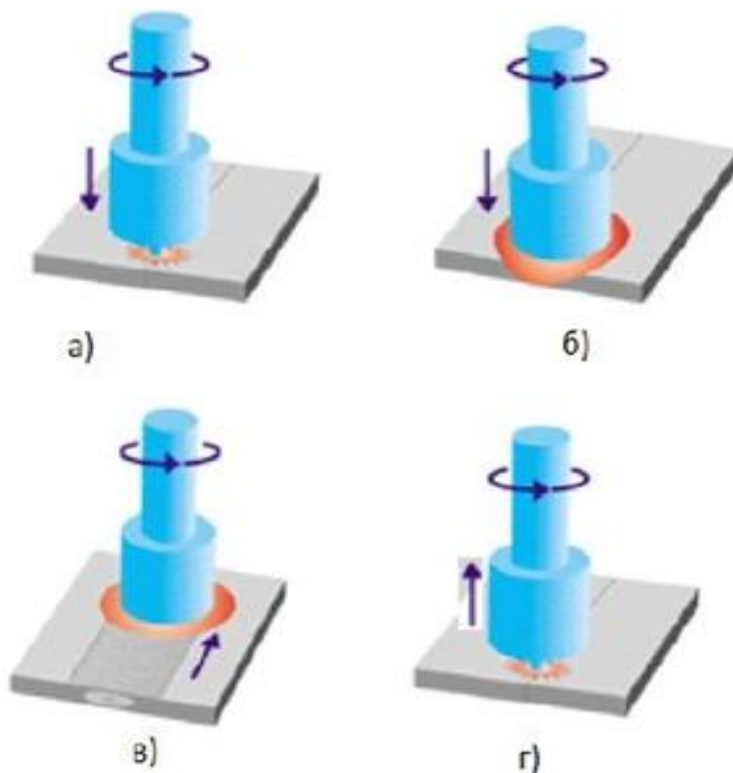
Процес заваривања трењем помоћу алата се може поделити у три фазе:

1. Фаза продирања алата у метал.
2. Фаза заваривања.
3. Фаза извлачење алата из метала.

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

радних материјала не повећа на температуру која доводи до омекшавања радних материјала.

Омекшани материјал приморан је да се креће око трна алата услед његовог обртања и услед продирања у материјал. Долази и до непосредног контакта рамена алата који се обрће и површина радних плоча (слика 3.1 а, б).



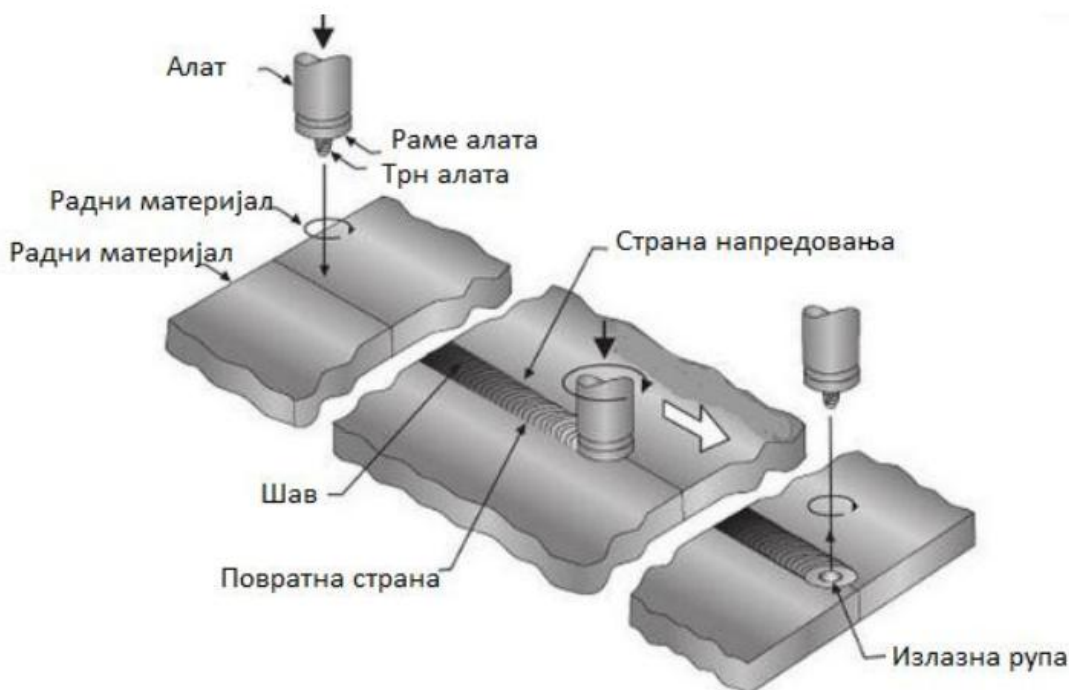
Слика 3.1 Фазе процеса FSW: а), б) - ротациони алат у контакту са радним комадом, в) релативно кретање ротационог алата у односу на радни комад, г) извлачење алата из радног комада [5]

На крају прве фазе заваривања алат врши само обртно кретање у материјалу радних плоча, задржава се неко време изазивајући повећање температуре до вредности потребне за омекшавања радних материјала, тј. за заваривање. Топлота настаје и услед трења чела алата и горњих површина радних плоча, изазивајући да материјал плоче у непосредном контакту омекша.

Након ове фазе, следи фаза заваривања (слика 3.1 в). Радна температура је достигнута и износи око 0,8 од температуре топљења, материјал је довољно мекан да би се мешао и транспортовао. Алат уз константно обртање креће се дуж линије заваривања,

односно дуж линије спајања радних материјала. Омекшали материјал се принудно транспортује око трна алата, а и дуж осе алата, односно између чела алата и чврстих зидова материјала. Од омекшалога материјала који се налази на крајњим ивицама трна алата у слојевима формира се грумен.

Сваким трансверзалним померањем алата који ротита, транспорт размекшалога радног материјала биће на 10 задњих ивици алата, а предњом ивицом ће захватати и уводити нов радни материјал ниже температуре [19].

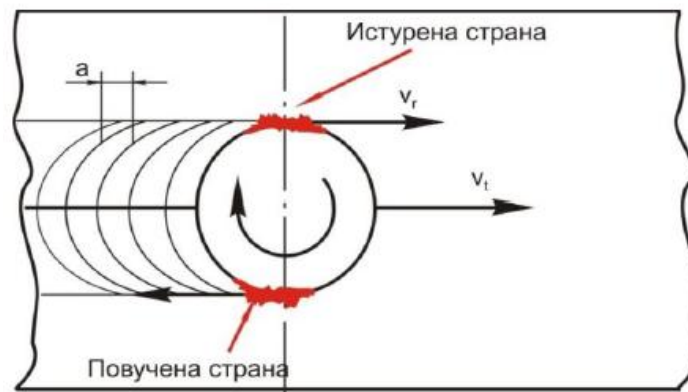


Слика 3.2 Фазе код поступка FSW при формирању сучеоног споја [19]

Током последње фазе заваривања, (слика 3.1 г) алат који се обрће престаје да се креће дуж линије спајања материјала, извлачи се из радних материјала остављајући за собом цилиндричну рупу (слика 3.2). Из естетских разлога цилиндрична рупа може бити испуњена додатним материјалом на крају процеса заваривања. Најчешће се врши одсецање дела заварене плоче где је излазна рупа, а потом се изврши обрада ивица на жељену димензију.

3.2. Метал шава

Код процеса FSW, заварени спој (метал шава) је асиметричан, па су дефинисане истосмерна и супротносмерна страна заваривања. Истосмерна страна метала шава је дефинисана као страна на којој се поклапају смерови вектора угаоне брзине окретања алата и вектора брзине праволинијског кретања алата (слика 3.3). Супротносмерна страна метала шава је дефинисана као страна где је правац кретања супротан вектору брзине окретања алата. Водећа ивица је предњи део алата, а пратећа ивица је задњи део алата. Лице (слика 3.4) метала шава је горња површина заварених лимова која се формира после проласка чела алата, а корен (слика 3.5) метала шава је доња површина.



Слика 3.3 Приказ положаја вектора брзине ротације алата (v_r) и вектора брзине транслације (v_t) код FSW [6]

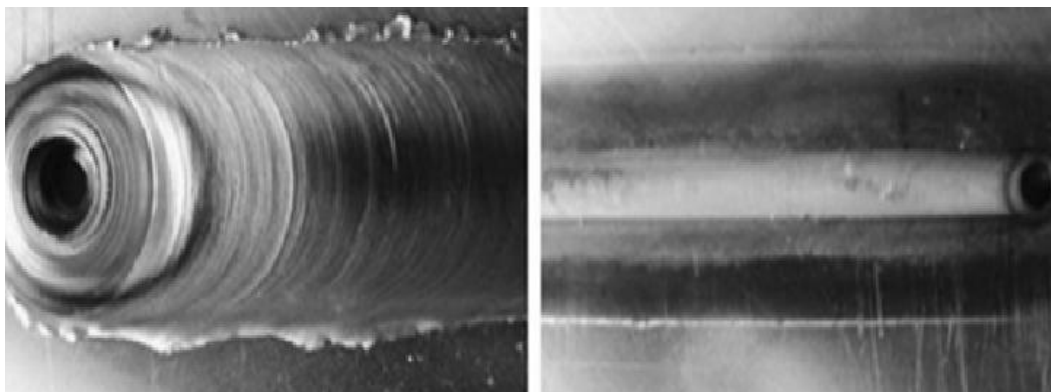


Слика 3.4 Изглед завареног споја са горње стране заварених комада [8]



Слика 3.5 Изглед завареног споја са доње стране заварених комада [8]

На лицу метала шава се налазе карактеристични отисци од алата у облику полукружних рубова (слика 3.6). Размак између два руба одговара путу који пређе алат праволинијским кретањем по радним комадима у смеру заваривања за време једног обртаја. У зависности од врсте легуре и параметара заваривања ови рубови могу бити више или мање уочљиви.



Слика 3.6 Изглед шави добијеног FSW поступком [19]

На супротносмерној страни лица метала шави, формира се ивица од материјала који је текао преко основног метала. Ова ивица се често назива “бљесак”. Правилним избором параметара заваривања и дизајна алата “бљесак” може бити минимизиран.

На крају процеса FSW у металу шави појављује се отвор “keyhole” који остаје пошто се алат одвоји од заварених радних комада. Отвор има облик и величину која је приближна облику и величини трна алата који се користи у процесу FSW.

3.3. Структура завареног споја

Облик метала шави је асиметричан односно постоји страна напредовања и повратна страна. Страна напредовања се још назива и истосмерна страна (поклапају смерови вектора брзине ротације алата и вектора брзине заваривања). Повратна страна метала шави је страна на којој су ова два смера вектора брзине супротна. Код завареног споја постоји још и лице метала шави које представља горњу површину метала шави (површину која је била у контакту са челом алата током заваривања) и корен метала шави који представља доњу површину. На повратној страни метала шави формира се ивица која се назива бљесак, што је неповољна појава. Бљесак правилним избором параметара заваривања може бити минимизиран али не и елиминисан. На крају метала шави налази се рупа која остаје при извлачењу алата из радних материјала.

Прва подела макроструктуре завареног споја поступком FSW изведена је 1997. године у TWI-у и важила је само за алуминијумске легуре. Сачињавају је четири зоне, што је шематски приказано на слици 3.7 [1]:

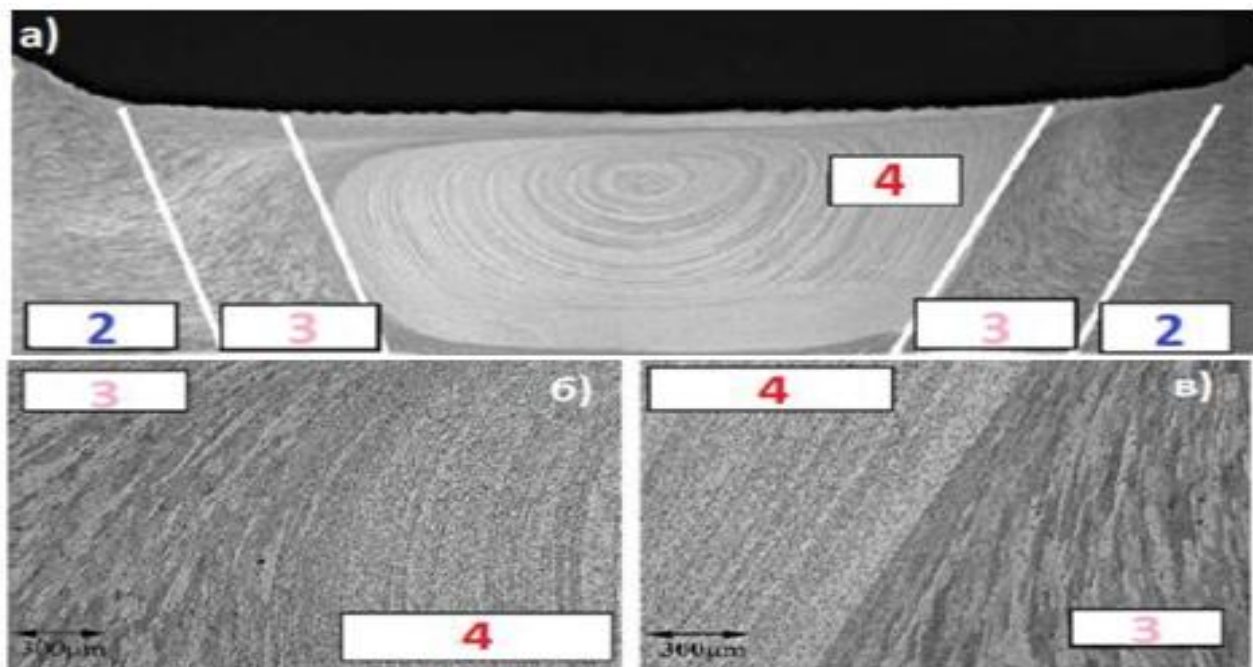
- 1- зона основног метеријала (ОМ),

- 2- зона утицаја топлоте (ЗУТ) (Heat Affected Zone - HAZ),
- 3- зона термо-механичког утицаја (ТМАЗ) (Thermo – Mechanically Affected Zone - TMAZ),
- 4- зона мешања, тзв. грумен.



Слика 3.7 Структура завареног споја поступком FSW [9]

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



Слика 3.8 Макроскопски снимци пресека сучеоног споја од легуре алуминијума: а) структурне зоне (2- ЗУТ, 3-ЗТМУ, 4-грумен), б) граница ЗТМУ-грумен на повратној страни, и в) граница ЗТМУ-грумен на страни напредовања [19]

Зона утицаја топлоте (ЗУТ) је ближа металу шава. Тај део материјала је изложен температурском утицају током заваривања и долази до промене микроструктуре и

механичких својстава у односу на основни материјал. Али у овој зони не долази до деформација. Величина ЗУТ-а зависи од унете топлоте током процеса, јер се алат у металу шава понаша као извор топлоте. Температуре у овој зони су ниже од температура у ЗТМУ, али ипак имају значајан утицај.

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

Рекристалисана област у зони термо-механичког утицаја, посебно код легура алуминијума има уобичајени назив **грумен**. Грумен се може посматрати одвојено, иако је саставни део ТМАЗ-а. Термин "грумен" усвојен је као описни за део шава највише изложеном термо-механичком утицају. То је област која је претрпела најинтензивније пластичне деформације. Позната је по финозрнастој структури. Величина зрна у грумену у зависности од врсте легуре и услова заваривања креће се од 2 до 10 μm . Ова област се формира непосредно испод ваљка алата. Ширина грумена је незнатно већа од пречника трна алата. Поменуте структурне зоне завареног споја дате су на макроскопским снимцима на слици 3.8.

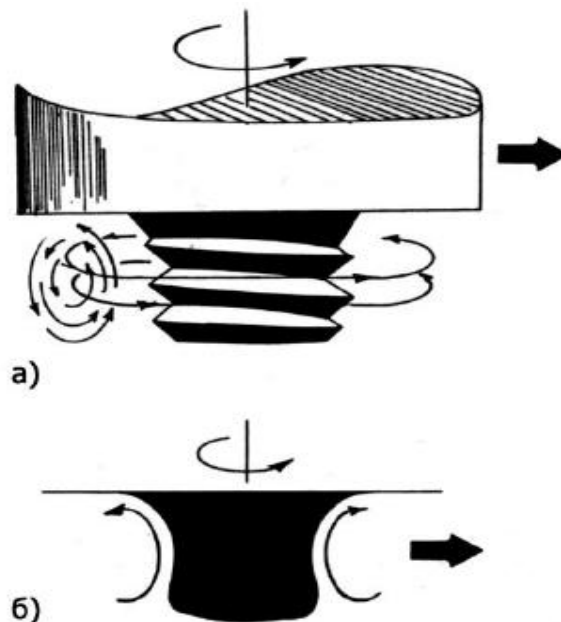
3.4. Течење материјала у процесу FSW

FSW процес се карактерише комплексним тродимензијалним течењем материјала (транслација, ротација и вертикално течење). Код процеса FSW постоји примарно и секундарно течење материјала.

Примарно течење односи се на течење, тј. транспорт омекшалога материјала око трна алата. Ово течење је аналогно ламинарном струјању течности око ротирајућег цилиндра.

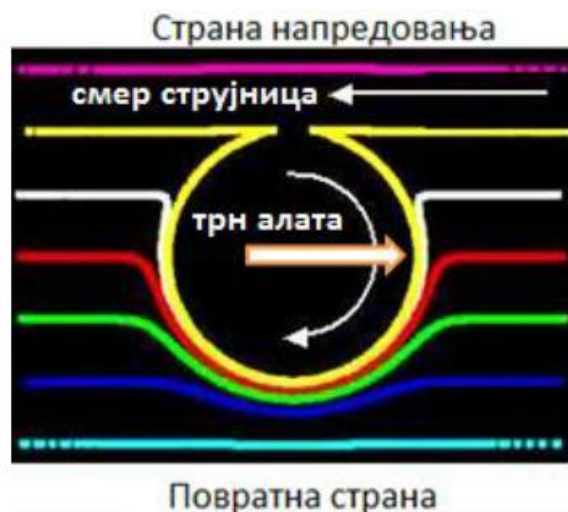
Облик трна алата одређује ток струјања, како у подужном тако и у вертикалном правцу (слика 3.9). Због ротације трна алата одређена количина материјала се око трна

преноси од повучене стране према истуреној страни шави. На слици 3.10 приказана је шема течења материјала око трна алата у процесу заваривања трењем помоћу алата.



Слика 3.9 Упростијена шема течења материјала око трна алата при FSW:
а) турбулентно струјање, б) ламинарно [1]

Навој трна алата је дизајниран тако да потискује материјал вертикално на доле према корену шави, проузрокујући на тај начин вертикалну компоненту тока материјала. Додатно вертикално померање материјала настаје ротацијом ваљка алата. Део материјала непосредно испод алата ротира око врха алата више пута.

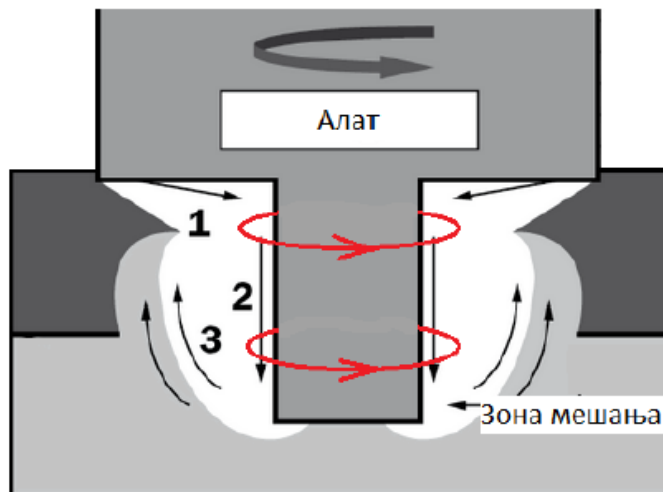


Слика 3.10 Приказ дводимензионалног течења материјала око трна алата у току процеса заваривања трењем помоћу алата [11]

Секундарно течење настаје када се материјал који се првобитно налазио на повученој страни шави у близини лица шави, помера и остаје на истуреној страни лица

шава. А материјал који се првобитно налазио близу лица шави на истуреној страни шави креће се у вертикалном правцу на доле, према средњој равни плоче која се заварује. Ово секундарно течење материјала је значајно код тањих материјала. Са повећањем дебљине плоче, значај секундарног течења материјала опада. Тако код веома дебелих плоча течење материјала је готово потпуно завршено у доњој зони око трна, осим за уску област близу лица шави.

Примарно и секундарно течење материјала шематски је приказано на слици 3.11.



Слика 3.11 Приказ примарног (црвене стрелице) и секундарног (црне стрелице 1,2,3) течења материјала [12]

Због јако сложеног течења материјала јављају се грешке, које су последица компликованог процеса, недовољног течења и деформација.

Будући да се ради о потпуно нелинеарном карактеру процеса, тешко је дати свеобухватну, јасну дефиницију течења, јер по својој конфигурацији FSW не дозвољава геометријско упрошћавање, јер се јавља комплексно тродимензионално течење материјала око врха алата, које је различито на предњој и задњој страни као и у односу на тело алата. То указује на чињеницу да не постоји ни линија, нити раван симетрије која би се могла разматрати.

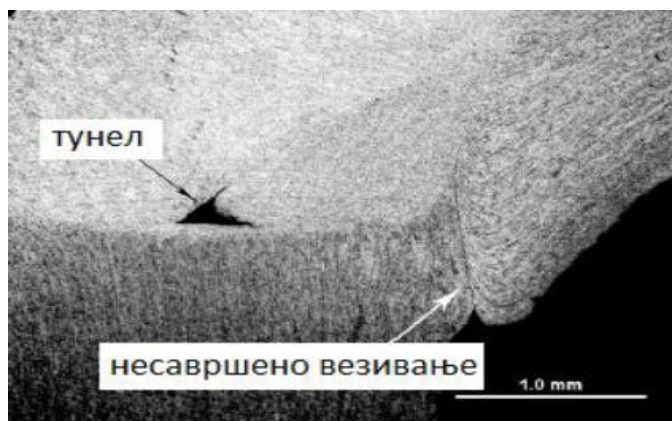
3.5. Грешке у завареном споју

Типичне грешке које се јављају унутар споја насталог поступком заваривања трењем са мешањем су:

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

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

Грешка типа тунела јавља се на страни напредовања завареног споја услед недовољног транспорта материјала од повратне ка страни напредовања. Јавља се у непосредној околини трна алата. Недовољни транспорт материјала, самим тим и појава тунела најчешће је последица превелике брзине заваривања и смањене притисне силе алата. При неадекватним параметрима заваривања тунел се може отворити, односно постаје јасно видљив на лицу метала шави. Најчешће се тунел идентификује током испитивања макроструктуре на микроскопу (слика 3.12). Овај тип грешке спада у запреминске, па се и радиографским испитивањем може уочити.



Слика 3.12 Микроскопски приказ грешке типа тунела и непровареног корена код Т-споја [19]

Непроварени корен јавља се услед недовољне пенетрације алата, на кореној страни споја у близини грумена. Ако је трн алата краћи него што би тебао да буде, радни материјал који се налази са корене стране споја се не меша довољно. Овај тип грешке представља иницијалну прслину и тиме је смањена затезна чврстоћа споја. Уочава се при макроскопском испитивању структуре завареног споја.

Грешка типа линија везивања назива се још и укључци оксидног слоја по линији споја (слика 3.13). Настаје услед транспорта оксидних честица са површине радних материјала у унутрашњост споја. Лако се уочава, изражена је танком кривудаваом линијом, односно „оксидном линијом“. Смицање материјала од стране трна алата који ротира у великој мери подстиче примарно течење материјала, али јако ретко у вертикалном правцу (секундарно течење материјала). Ток материјала око трна алата на страни напредовања и повратној страни је асиметричан, и јако је тешко описати феномен течења материјала код FSW. Присутност ове грешке на страни напредовања указује на то да је ток материјала на тој страни тежи. Линија везивања представља иницијалну прслину у споју и тиме су му смањене механичке карактеристике, а може се избећи већим уносом топлоте у процес, избором одговарајуће геометрије алата и уклањањем оксидног слоја са површине радних материјала.



Слика 3.13 Простирање грешке типа линије везивања у Т-споју [19]

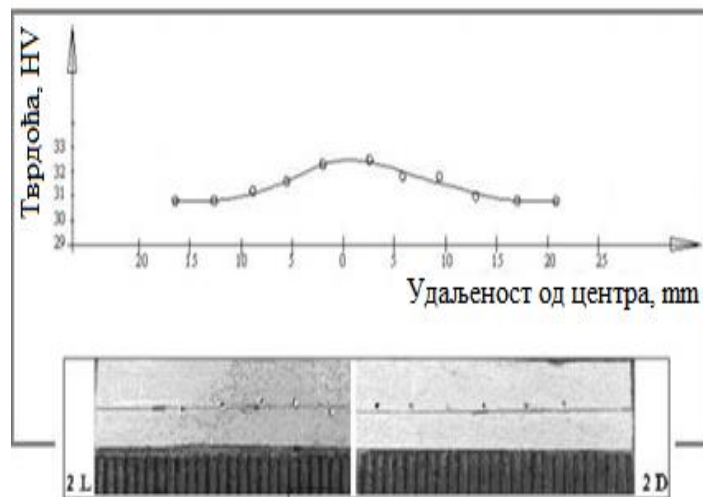
3.6. Карактеристике завареног споја

Код заваривања поступком FSW јављају се зоне у којима се повећава температура материјала. Она се повећава услед трења насталог између алата за заваривање и материјала који се заварује. Приликом тога мења се микроструктура материјала заваривања, његова тврдоћа, чврстоћа и друга механичка својства.

3.6.1. Тврдоћа завара

Код термички необрадивих легура, долази до малог повећања тврдоће у зони утицаја топлоте (ЗУТ), зони термо-механичког утицаја (ЗТМУ) и грумену, у односу на основни материјал (ОМ). Као последица уситњавања зрна услед интензивног механичког мешања и повишене температуре, у самом грумену јавља се највећа тврдоћа материјала.

У зони термо-механичког утицаја материјал је изложен деловању механичког мешања, али и температури, што има за последицу нешто већу тврдоћу у односу на остале зоне. Док је материјал у зони утицаја топлоте изложен само дејству повишене температуре, тако да је структура веома измењена у односу на основни материјал (слика 3.14).



Слика 3.14 Тврдоћа код легуре алуминијума [14]

3.6.2. Чврстоћа и замор материјала

Зона грумена и ЗУТ-а, имају велику способност пластичног деформисања. Углавном чврстоћа алуминијумских легура се повећава са порастом параметара заваривања, пре свега брзине заваривања. При томе, постигнути квалитет завара веома зависи од типа легуре [14]. Додатна топлотна обрада завара повећава квалитет споја, али смањује еластичност, што је последица повећања зрна у ЗТМУ.

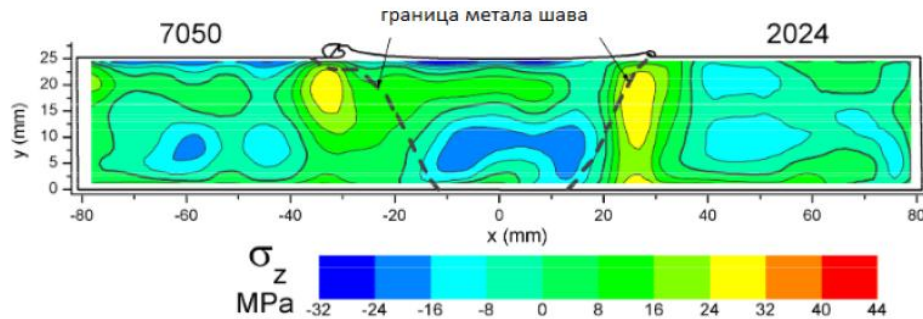
Испитивањем на замор узорака оптерећених у попречном и уздужном правцу, утврђено је да отпорност завара на замор износи свега 50 % од отпорности основног материјала. Међутим, ако се са лица завара накнадном обрадом скине слој дебљине 0,1 до 0,15 mm, отпорност материјала завара на замор је приближно једнака основном материјалу [1]. Мале неравнине лица завара, као и трагови чела алата на страни заваривања су места на којима се стварају и развијају пукотине.

Уколико се код поступка FSW примењује већа брзна заваривања настали спој има већу отпорност на замор.

У завареним спојевима добијеним FSW поступком јављају се заостали напони и деформације, настали као последице неједнаког хлађења и загревања материјала. Ове

разлике изазивају неједнако ширење материјала и појаву локалних пластичних деформација. Током хлађења материјал се скупља и ствара заостале напоне. При томе се јављају асиметричност у расподели заосталих напона у односу на кратање алата. Ове негативне последице су далеко мање од оних које се јављају у завареним спојевима добијеним класичним поступцима заваривања.

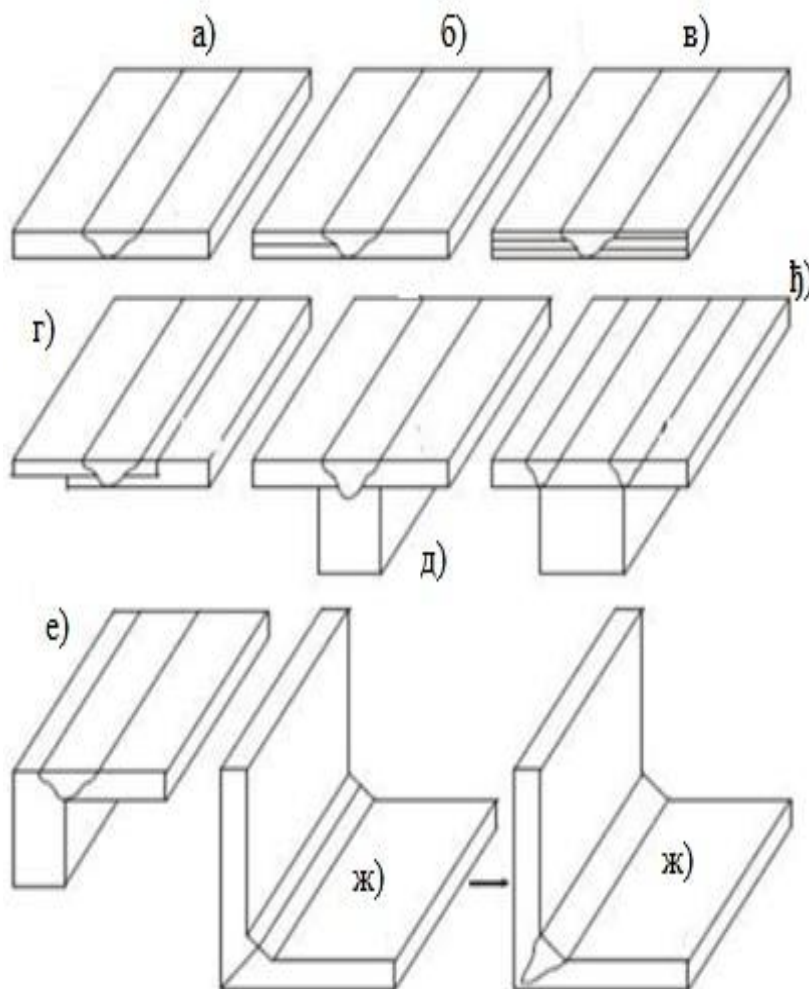
На слици 3.15 приказан а је расподела уздужних заосталих напона код различитих легура алуминијума.



Слика 3.15 Уздужни заостали напони мерени на узорку исеченом из завареног споја [19]

3.7. Врсте заварених спојева

Поступком FSW могу се спајати лимови и плочасти делови практично у свим положајима, у дијапазону дебљина од 0.5 mm до 75 mm од легура алуминијума и до 25 mm од легура титана и челика. Овим поступком најчешће се израђују сучеони и преклопни, а много ређе угаони спојеви (шавови) који су приказани на слици 3.16.

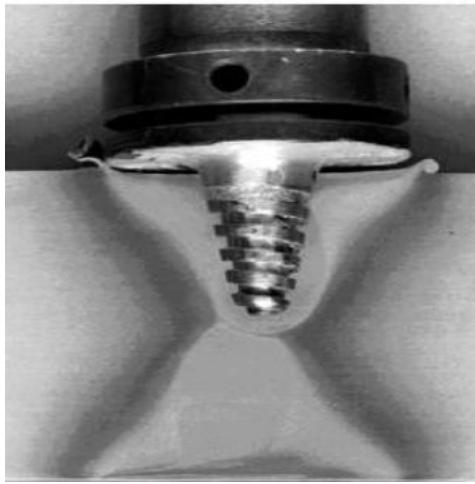


Слика 3.16 Врсте заварених спојева добијених поступком FSW:

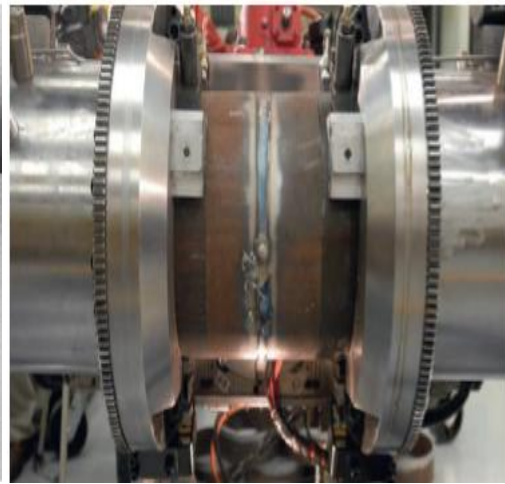
а) сучеони спој, б) комбиновани сучеони и преклопни спој, в) вишеструки преклопни спој, г) упуштени преклопни спој, д) Т спој два елемента, ђ) Т спој три елемента, е) угаони-сучеони спој, ж) угаони спој [8]

Најчешће се сучеоно спајају радни комади дебљине од 1.2 mm до 50 mm. Заваривање може да се изведе једнострано или двострано (слика 3.17). Оптимално је заваривање сучеоних спојева дебљине 1.6 mm до 10 mm, а преклопних, дебљине 1.2 mm до 6.4 mm. Заваривање може да се изводи са једним или са више алата истовремено, са једне или са обе стране лимова, тако да се у једном пролазу добија већи број спојева. Помоћу процеса FSW могу да се реализују не само равни праволинијски, већ и криволинијски спојеви (слика 3.18) различите конфигурације у различитим положајима, укључујући и тзв. над главом. У том, погледу, практично нема великих ограничења. Поред тога, развој тачкастог заваривања трењем FSW омогућава још ширу примену, чак и у условима монтаже специфичних делова. Дужина споја може да буде ограничена једино величином постоља и за сада се креће до приближно 20 метара. Поред високих механичких својстава, заварени спој има глатку површину и додатна механичка обрада у великом броју случајева

није потребна. Истовремено, код поступка FSW, уопште нема губитка материјала, што је важна карактеристика и предност у односу на многе друге поступке заваривања. Са тог аспекта поступак FSW је врло економичан. Поступак FSW је прво тестиран на алуминијуму као материјалу који се у савременој индустрији веома много користи али код кога се традиционалним поступцима тешко добијају квалитетни спојеви због изражене појаве порозности шави и дисторзије делова. Обе појаве су веома штетне, захтевају скупу додатну обраду којом не могу потпуно да се отклоне, а посебно су изражене код лимова.



Слика 3.17 Приказ двострано завареног споја [17]



Слика 3.18 Кружно заварена челична цев [16]

3.8. Предности и недостаци поступка FSW

Поступак FSW, је развијен са циљем да се превазиђу проблеми који се јављају при заваривању где долази до топљења материјала. Ови проблеми су превазиђени посебно код заваривања алуминијума и његових легура. Поступак FSW се углавном користи за заваривање лимова веће дебљине, мада се може користити и за заваривање лимова мање дебљине. Дебљина алуминијумског лима који се може заваривати овим поступком зависи од снаге машине и креће се од 0.5 mm до 50 mm у једном пролазу или једностраном шаву. У двостраном шаву могуће је заваривати и лимове до 75 mm дебљине. С обзиром на то да се FSW одвија у чврстом стању, то одмах упућује на одређене предности у односу на методе заваривања топљењем. Хлађење течне фазе је избегнуто а тиме и неповољне пратеће појаве које доводе до настанка прслина. У принципу поступак FSW је нашао своју примену, има мали број недостатака. Исто тако велика је погодност у ширини избора

параметара и материјала. Једна од значајнијих предности у односу на електролучне поступке заваривања је што нема дисторзије односно кривљења лима (слика 3.19).



Слика 3.19 Лимови заварени електролучно и поступком FSW [8]

Поред наведених, поступак FSW поседује својства која су веома ретко присутна код других поступака: формирање завареног споја са занемарљиво малим унутрашњим напонима, добијање спојева који су отпорни на корозију и појаву кртог лома, али све то код материјала код којих до сада то није било могуће, или је било изузетно тешко и скупо остварити. Због тога је у економском погледу поступак FSW, убедљиво најефикаснији, а еколошки је апсолутно чист.

Као што је већ речено FSW спада у групу поступака заваривања у чврстом стању. Дакле не долази до топљења материјала, тако да шавови имају изразито добре карактеристике. Генерално, предности поступка FSW су:

- Могућност потпуне аутоматизације процеса. Лако се процес аутоматизује на глодалицама.
- Добијање хомогене ситнозрнасте структуре споја са високим механичким и другим својствима.
- Могућност заваривања различитих материјала.
- Додатни материјал није потребан.
- Добра механичка својства завареног споја.
- Побољшана сигурност због одсуства отровних гасова или прскања од растопљеног материјала.
- Нема потрошног материјала (конвенционални челични алат може да завари 1000 метара легуре алуминијума).
- Нижи трошкови обуке заваривача.
- Нема испаравања штетних гасова.
- Минимална сакупљања и кривљења материјала током процеса заваривања.

- Нема порозности.
- Нема прскања.
- Није потребан заштитни гас за заваривање алуминијума.
- Велика уштеда енергије.
- Може да се заварује у свим позицијама (хоризонтално, вертикално, орбитално итд.) јер нема просипања материјала из шава.
- Може се користити за извођење линеарних, нелинеарних, обимних и тродимензионалних заварених спојева.
- Добијени заварени спој не садржи нечистоће.
- Једнака ширина метала шава по дужини.
- Генерално добар изглед шава и минимална дебљина испод и изнад завареног споја, чиме се смањује потреба за скупим обрадама после завршеног процеса заваривања.

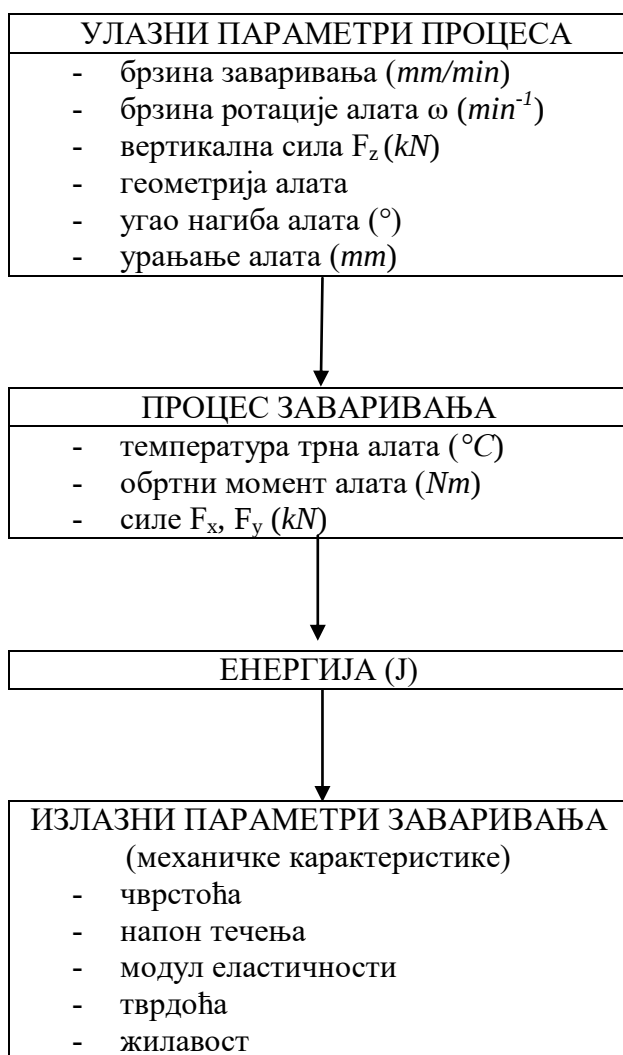
Ипак, процес FSW је повезан са извесним бројем недостатака. Недовољна температура заваривања, због мале брзине обртања алата или велике брзине уздужног кретања, што значи да је материјал примио велику пластичну деформацију током процеса заваривања. Ово може довести до "тунел" ефекта дуж шава током читавог процеса, а недостаци се могу јавити и на површини. Мала температура може ограничити утицај алата и тако смањити континуитет везе између материјала са сваке стране шава.

Генерално, недостаци поступка FSW су:

- Постојање рупе на крају процеса заваривања, када се алат извуче из радног комада.
- Потребна велика вертикална (аксијална) сила.
- Потребно је добро стегнути плоче које се заварују, да током процеса не би дошло до њиховог раздвајања.
- Мање флексибилан од мануелних лучних процеса (проблеми са варијацијама дебљине и нелинеарни шав).
- Често спорије уздужно кретање од других техника процеса заваривања.
- Не може се изводити заваривање код кога се захтева додавање материјала.
- Мора се користити плоча за ослањање.

4. Технолошки и метарлушки параметри процеса FSW

Квалитет завареног споја одређује се контролом и мерењем параметара заваривања као што су: брзина ротације алата, притисна сила, обртни момент, брзина заваривања, геометрија алата и температура алата. Слично као код конвенционалних метода за заваривање, топлотна енергија такође одређује квалитет споја. На слици 4. дата је веза између улазних и излазних параметара заваривања.



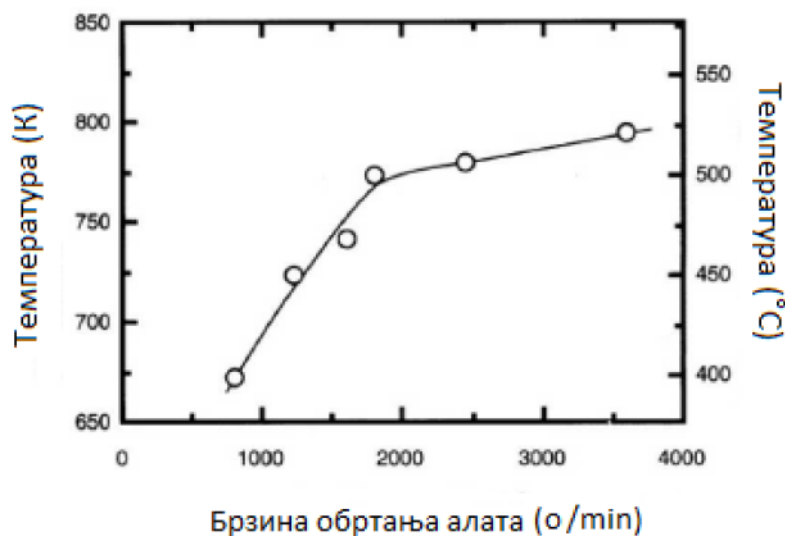
Слика 4. Веза између улазних и излазних параметара заваривања

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

температурна поља, стопа хлађења, силе у правцу x и y оса, обртни момент алата и температура алата зависе од датих главних параметара заваривања. На пример, температура процеса расте при повећању броја обртаја алата, а смањује се благо при повећању брзине заваривања.

4.1. Брзина ротације алата

Брзина ротације алата се сматра најутицајнијим фактором. Брзина ротације алата одређује унос топлоте и температуру током заваривања (слика 4.1). Већом брзином ротације алата повећава се топлота и смањује брзина хлађења у подручју заваривања, што доводи до неповољне микроструктуре. Према томе, она утиче на микроструктуру и механичка својства завареног споја. Она је константна током заваривања и може износити од $100\div 4000$ o/min .



Слика 4.1 Веза брзине обртања алата и температуре при заваривању легуре алуминијума 6063 поступком FSW [19]

4.2. Брзина заваривања

Брзина заваривања (брзина транслаторног кретања) константна је током заваривања и зависи од механичких својстава и дебљине радних материјала. Одређује се најчешће из односа $\frac{v}{\omega R}$, где је v брзина заваривања, R полупречник трна алата и ω угаона брзина алата. Однос се креће од $0,01\div 0,02$. Ако је брзина заваривања превисока, долази до грешака споја типа тунела и непровареног корена споја.

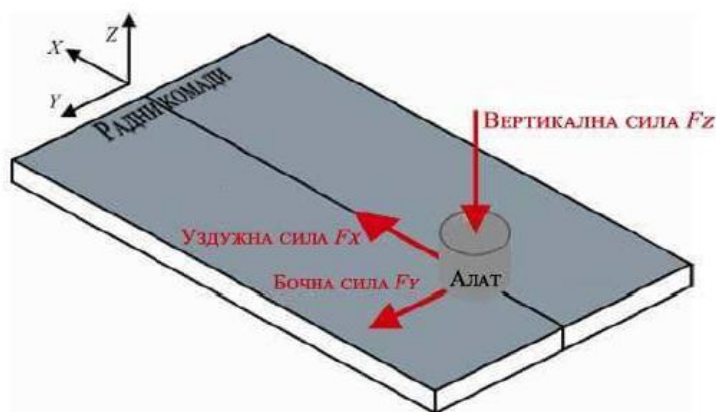
Већа температура процеса јавља се услед веће брзине обртања алата и мање брзине заваривања и зато је веома важно наћи одговарајућу равнотежу између ова два параметра. Другим речима, када температуре нису довољно високе радни материјал нема довољну температуру да потпуно омекша у зони заваривања, и то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

4.3. Силе заваривања

Силе које делују на алат током поступка FSW су:

- вертикална или аксијална сила (F_z),
- уздужна сила (F_x),
- бочна сила (F_y).

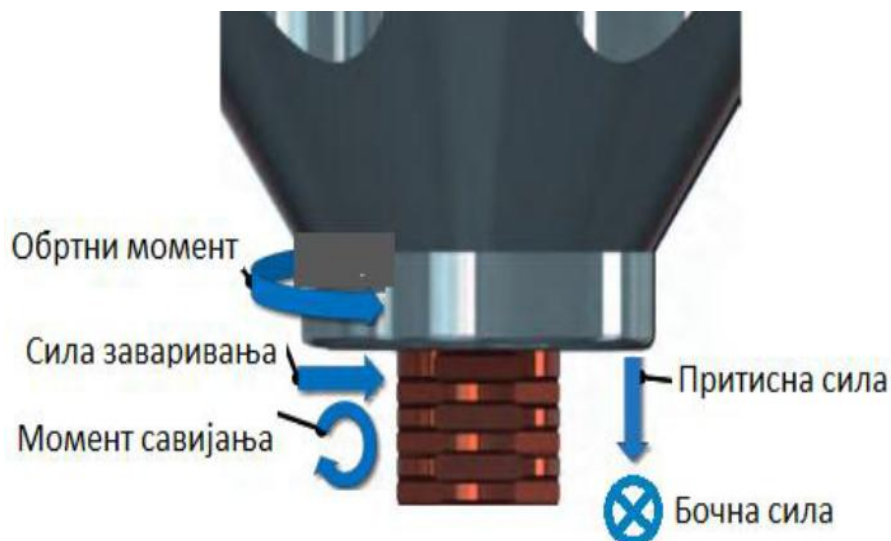
На слици 4.2 приказане су силе које делују током поступка FSW.



Слика 4.2 Приказ сила и њихових компонената дуж x, y и z осе [8]

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

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

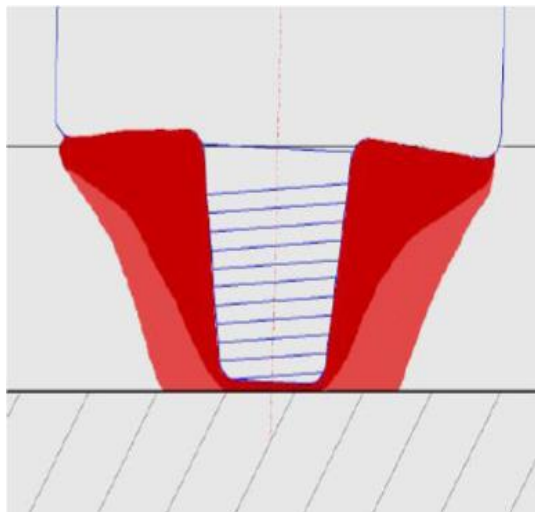


Слика 4.3 Оптерећење алата током процеса заваривања [9]

Бочна сила F_y делује нормално на правац кретања алата, а позитиван смер се дефинише ка страни напредовања споја. На слици 4.3 приказани су правци и смерови сила F_x , F_y и F_z .

4.4. Угао нагиба и дубина продирања чела алата

Дубина продирања је дефинисана као дубина најниже тачке чела алата испод површине завариваних плоча и утврђено је да је овај параметар критичан за обезбеђивање квалитета шави. Продирање испод површине материјала повећава притисак испод алата, а то може довести до закривљења осе алата, као што је приказано на слици 4.4. Дубина продирања мора бити правилно подешена, јер мора да се обезбеди неопходни силазни притисак, али и да се обезбеди да алат не продире превише у материјал који се заварује. Са друге стране претерано продирање може да доведе да трн алата продре кроз радне комаде у основну плочу, што може довести до лома трна алата или до лошег квалитета шави. Овај проблем је превазиђен тако што су конструисане машине са хидрауличним подешавањем положаја чела алата, којима се остварује одговарајући притисак на плоче које се заварују. На овај начин се контролише дубина продирања у материјал и спречава се појава деформација испупчења плоча у близини метала шави.



Слика 4.4 Продирање чела алата у материјал [1]

На институту за заваривање TWI (Енглеска), дизајниран је механички систем управљања за контролу и одржавање положаја чела алата у односу на површину материјала. Систем се састоји од два ваљка која су постављена поред алата, а они обезбеђују да алат не продре превише у материјал и на тај начин омогућавају квалитетно заваривање. На слици 4.5 дат је приказ система за контролу дубине продирања чела алата.

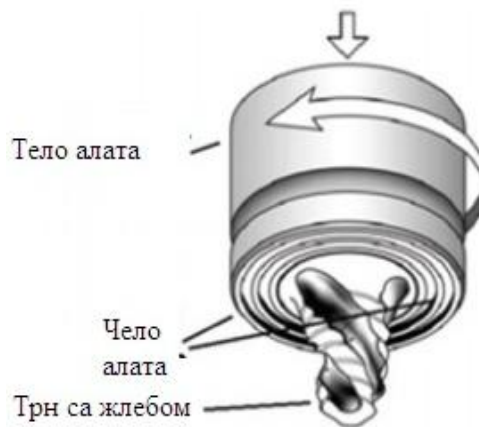


Слика 4.5 Систем за контролу дубине продирања чела алата у материјал који се састоји од два помоћна ваљка [1]

Угао нагиба алата у односу на вертикалну осу износи обично од 0 до 4 степена. Повећањем угла нагиба смањује се хоризонтална сила јер бочна површина чела алата не задире у материјал приликом заваривања. Превелика вертикална сила у комбинацији са нешто већим углом нагиба алата доводи до лица шав са гребенастом површином.

4.5. Алат за заваривање

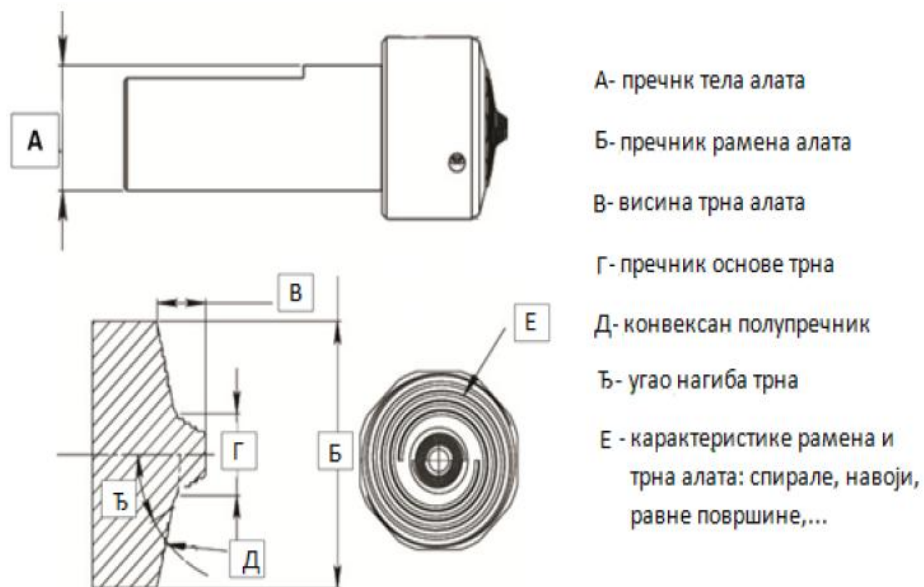
Специјални алат који се користи за заваривање је цилиндричног облика и састоји се из тела алата и радног дела алата којег сачињавају два концентрична дела: чело и трн алата. Облици чела и трна алата могу бити различити. Тело алата служи да се он причврсти у стезне чељусти машине. Висина трна је обично већа од половине дебљине материјала, али увек је мања од укупне дебљине материјала које заварујемо (неколико десетих делова милиметра висина трна је мања од дебљине материјала).



Слика 4.6 Алат за заваривање [11]

Површина алата која узрокује настанак трења и развијање топлоте у додиру са површином материјала назива се чело алата. Трн алата задужен је за пластну деформацију материјала што омогућује његово мешање. Алати без трна са равном површином чела такође се примењују за заваривање тањих лимова.

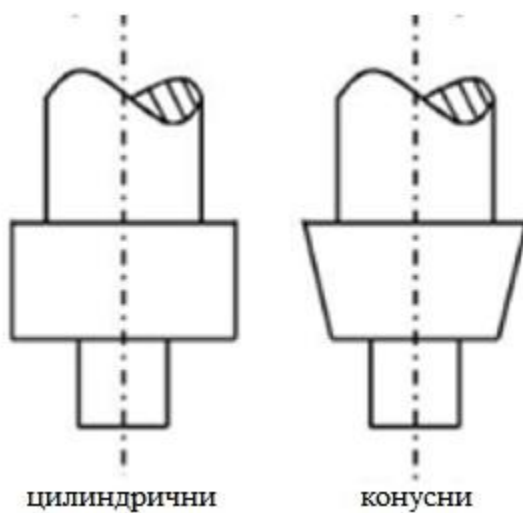
На слици 4.7 дата је геометрија и део радионичког цртежа алата са називима основних димензија.



Слика 4.7 Димензије и геометрија алата [19]

4.5.1 Облик рамена и чела алата

Облици **рамена** (слика 4.8) могу да буду различити. Рамене алата је обично цилиндричног облика, али се повремени користе и конусни облик. Генерално, облик рамена има безначајан утицај на квалитет заваривања.

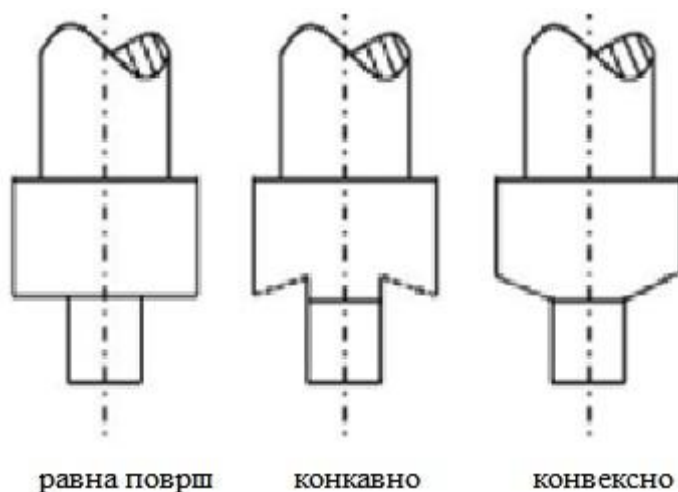


Слика 4.8 Облици рамена алата [6]

Облик **чела** алата утиче на довођење топлоте трењем, утискивање материјала и обликовање лица зава. Чело алата може имати раван, конкаван или конвексан уздужни пресек (слика 4.9).

Алат са равним уздужним пресеком чела није делотворан у заустављању излаза омекшаног материјала из подручја заваривања. Завари израђени оваквим алатом имају савијене рубове због истискивања материјала. Предност алата са равном површином чела је једноставност израде.

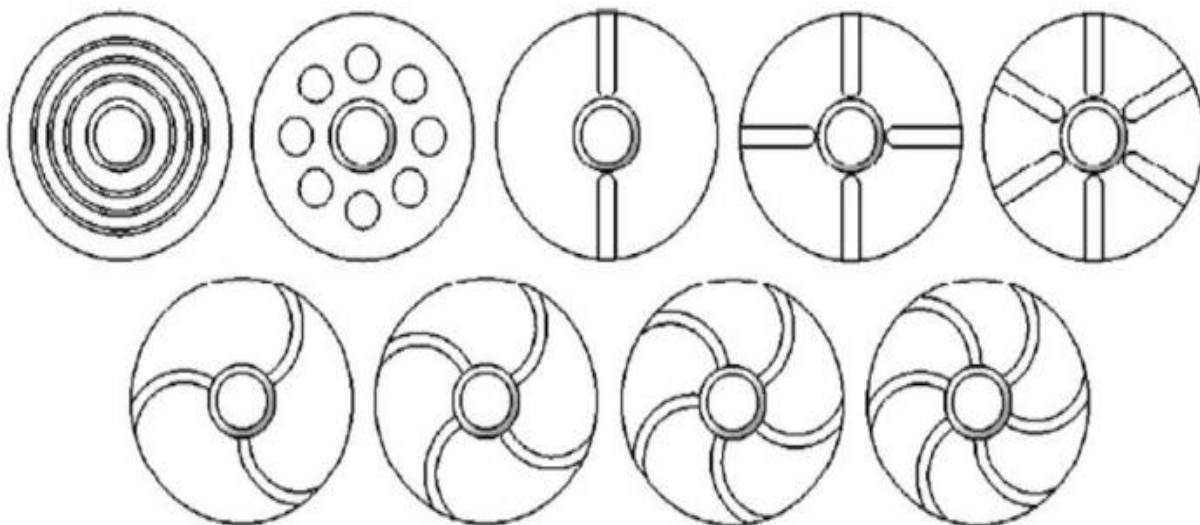
Конкаван пресек чела алата са углом од 6° до 10° спречава излаз омекшаног материјала. При утискивању алата на почетку заваривања део материјала улази у конкавну шупљину и служи као „залиха“ уједно стварајући притисак на преостали материјал у пресеку. Помицањем алата у смеру заваривања материјала из залихе континуирано излази и остаје у завару иза алата док нови материјал, испред алата, поново улази у конкавну шупљину и даље служи као залиха све до завршетка зава.



Слика 4.9 Уздужни пресек чела алата [6]

Алати са конвексим пресеком чела нису значајно у употреби пре свега ради повећаног истискивања омекшаног материјала и губитака материјала. Предност оваког алата је могућност заваривања елемената различитих дебљина постављених у сучеони спој.

Површина чела алата може бити глатка или са различитим облицима жлебова односно гравура (слика 4.10). Сви облици попречног пресека чела алата могу садржати жлебове. При заваривању омекшани материјал улази у жлебове и повећава трење. Алат са жлебовима на челу даје лицу зава лошији изглед. Најчешће се израђују жлебови у облику завојница. Овакви жлебови побољшавају течење метала од руба ка средини зава.



Слика 4.10 Изглед површине чела алата [6]

4.5.2. Облици трна алата

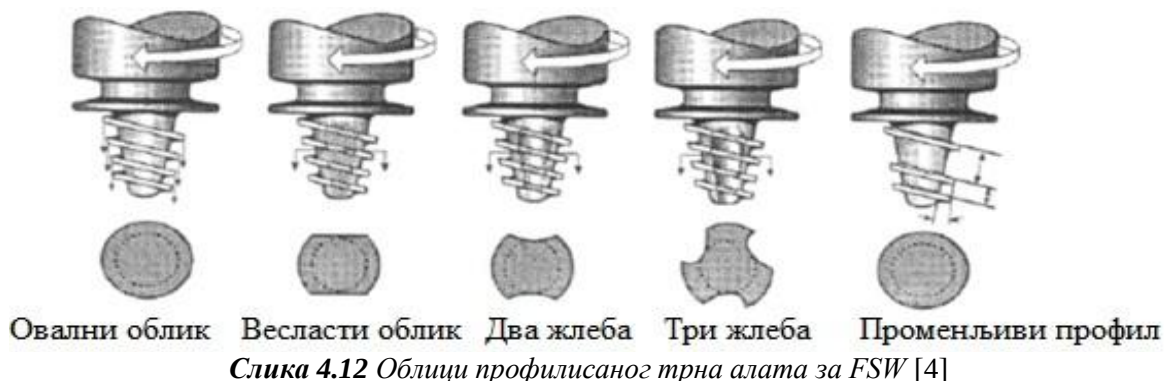
Алати за заваривање трењем разликују се према изгледу трна од једностанвијег цилиндричног трна равног дна до сложених конусних трнова са завојницама и израђеним навојима на бочним површинама. Трн омогућава смицање материјала са предње стране алата на задњу мешајући материјал двају елемената и у мањој мери служи за довођење топлоте трењем.

Сам врх трна алата може бити раван или са куполом (слика 4.11). Трн са равним завршетком је једноставнији за производњу и најчешће се користи. Главни недостатак равног завршетка трна је што је потребна велика притисна сила за урањање алата у радни материјал. Супротно томе, трн са куполом може смањити притисну силу, смањује хабање алата приликом урањања у материјал, повећава радни век алата елиминисањем локалне концентрације напона и повећава квалитет корена споја. Ове предности се посебно уочавају када купола има полупречник 75 % од пречника трна алата.



Слика 4.11 Врх трна алата: а) цилиндрични трн са равним врхом , б) цилиндрични трн са куполом на врху и в) трн конусног облика са равним врхом [11]

Спољашња површина трна алата може бити равна или са навојем, а при том различитих облика (слика 4.12). Трнови са навојем се користе код легура високе чврстоће. Добро мешање материјала се постиже коришћењем трна са левим навојем који ротира у смеру казаљке на сату. Материјал може да циркулише више пута око алата пре него што буде потиснут иза алата.



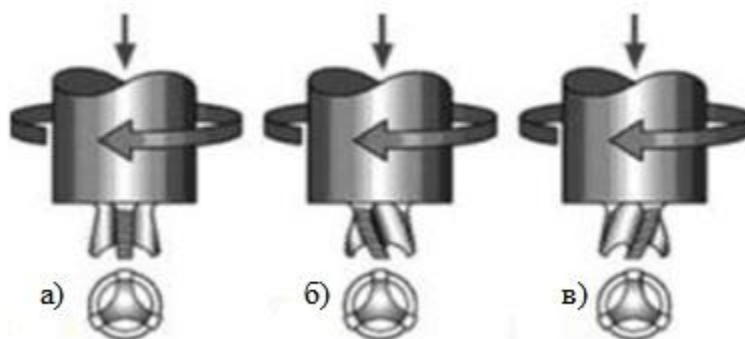
Whorl (спирални) и MX-Triflute (MX-трожлебни) трнови алата развијени су од стране TWI и могу заварити алуминијумске легуре дебљине од $50\div 60\text{ mm}$. Типични изгледи површина трнова алата дати су на слици 4.12. Овим алатима се производе спојеви са добрим механичким својствима и квалитетом површине при великим брзинама заваривања. Омогућавају лакши проток омекшаног материјала према корену шав и повећана површина контакта трна алата и омекшаног материјала.

Спирално профилисани алати обезбеђују добро трење и мешање материјала, потискујући га на доле тако да се добија шав високог квалитета, посебно ако се примени алат са три спирална гребена (слика 4.13).

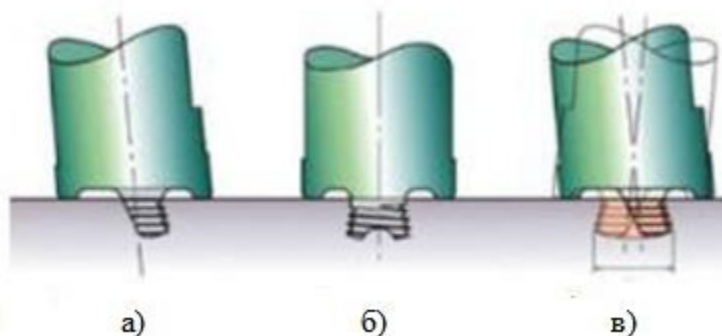


Слика 4.13 Мулти спирални алат за FSW [1]

Преклопне спојеве је теже остварити него сучеоне из разлога што су потребни шири шавови за равномеран пренос оптерећења у структури, долази до стањивања горњег радног материјала и долази до заробљавања оксидног слоја између преклопљених површина. За превазилажење ових проблема користе се две релативно нове геометрије за трнове алата Flared-Triflute (ширећи тројлебни, слика 4.14) и A-skew (А-закошени, слика 4.15), настали у TWI. Алат A-skew има трн који је благо нагнут у односу на вретено машине. Ови алати су развијени због побољшања квалитета шавова и коришћењем њих се удвостручила брзина заваривања, 20% се смањила сила у аксијалном правцу и значајно проширила зона заваривања (више од 150% од пречника трна у поређењу са 110% конвенционалног пречника трна са навојем) чиме се остварује боље мешање материјала.



Слика 4.14 Flared-Triflute алат са а) неутралним, б) левим и в) десним навојем [6]

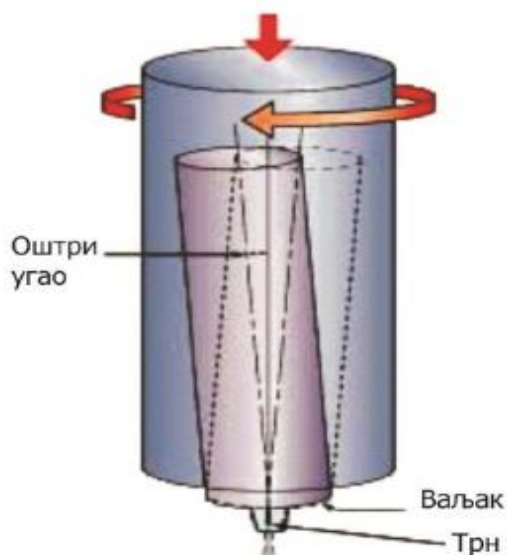


Слика 4.15 A-skew алат: а) поглед са стране, б) поглед с'преда и в) област обухваћена трном алата током заваривања [6]

Код примене FSW алата неопходна су извесна геометријска подешавања у циљу ефикаснијег заваривања. На пример алат треба подесити на мали водећи угао у односу на осу вретена машине. Захваљујући асиметричном положају трна одвија се боље мешање материјала.

Шема асиметричног алата приказана је на слици 4.16. Исто тако је неопходно правилно подешавање чела ваљка у односу на површину елемената који се заварују. У пракси се примењују машине са уређајима за хидраулично подешавање положаја ваљка, којим се остварује одговарајући притисак на површину завариваног елемента, чиме се

контролише дубина продирања алата у материјал и спречава појава деформација типа испупчења плоча у близини шави.



Слика 4.16 Шема асиметричног алата за FSW [1]

4.5.3. Материјал алата

FSW је термо-механички процес код кога температура алата прелази солидус линију материјала који се заварују. Производња квалитетног завареног споја захтева одговарајући материјал алата. Треба избећи да алат промени димензије и облик, односно да се похаба и поломи. Алати морају имати следеће карактеристике материјала:

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

Постоји неколико врста материјала алата за заваривање који се користе у зависности од материјала који се заварује;

- **алатни челици**- најчешће коришћени материјал за алате код FSW поступка, доступан и једноставан за обраду, отпоран на замор материјала, отпоран на хабање, посебно се користи за заваривање легура алуминијума, легура магнезијума и легура бакра,

- **легуре никла и легуре кобалта**- висока чврстоћа, добра жилавост, стабилност чврстоће, отпор на пузање, радна температура је типично од 600÷800 °C,
- **ватростални метали (W, Mo)**- висока температурска постојаност (између 1000÷1500 °C им је радна температура), цена им је висока, тешка обрадљивост, крти су,
- **легуре волфрама**- добра чврстоћа, висока радна температура, доста су скупи,
- **композити**- карбидне честице ојачане металом (WC, WC-Co, TiC) - добра отпорност на хабање, одговарајућа жилавост лома
- **челик обложен поликристалним кубним бор нитридом (препознатљиви под називом PCBN)**- одлична отпорност на хабање, ниска жилавост лома, доста је скуп алат. Термичка препрека између PCBN трна алата и волфрам- карбидне дршке алата користи се за смањење преноса топлоте настале услед трења на тело алата.

У табели 4.1 је дат преглед материјала алата који се користе за одговарајуће радне материјале.

Табела 4.1 Најчешће коришћени материјали алата за радне материјале различитих дебљина [19]

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

5. Материјали заварљиви FSW поступком

Поступак FSW се може применити за спајање како истих (слика 5.1) тако и различитих материјала (слика 5.2), уз услов да материјал алата може радити на температурама ковања материјала који се спајају.

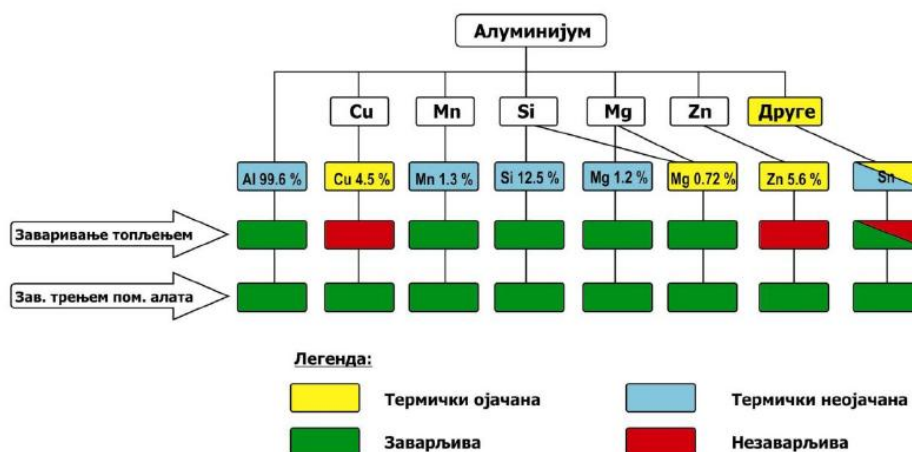


Слика 5.1 Спајање истих материјала FSW поступком – месинг [18]



Слика 5.2 Спајање различитих материјала FSW поступком – бакар и алуминијум [18]

FSW је посебно погодан поступак за спајање легура алуминијума. Слика 5.3 даје упоредни приказ заварљивости алуминијумских легура поступком заваривања топљењем и FSW поступка односно заваривања трењем помоћу алата.



Слика 5.3 Упоредни приказ заварљивости алуминијумских легура FSW поступком и заваривања топљењем [1]

Легура алуминијума се поред истородних, веома добро заварују са другим несродним материјалима; на пример са нерђајућим челицима. Слика 5.4 даје пресек споја легура алуминијума (Al 6013-T4) и нерђајућег челика (X5CrNi18-10).

Механизам дифузије одвија се постепено почевши од граничне површине где алуминијум мало дифундује у гвожђе. С обзиром на то да грумен садржи оба материјала показало се да је процес дифузије у самом грумену везан за легирајуће елементе челика Cr и Ni који до извесне мере дифундују у Al-легуру.



Слика 5.4 Макроскопски изглед пресека FSW споја легуре Al 6013-T4 и нерђајућег челика X5CrNi18-10 [18]

Поред алуминијума и његових легура поступком FSW могу се заварити следећи материјали:

- бакар и његове легуре,
- олово,
- титан и његове легуре,
- легуре магнезијума,
- цинк,
- меки челик,
- аустенитни и мартензитни нерђајући челик,
- легуре никла,
- полимерни материјали (пластика).

Нискоугљенични (≤ 0.25 % C), средњеугљенични челици могу се заварити у широком опсегу услова заваривања. Високоугљенични (≥ 0.6 %) и високолегирани (> 5 % легирајућих елемената) челици се лако спајају али услови заваривања морају бити контролисани у ужем опсегу. На пример притисак мора бити повећан да би се компензовала погоршана ковност.

Бакар и легуре бакра – Висока термичка и електрична проводљивост бакра смањује његову заварљивост. Како се поступком FSW не топи предмет обраде, већ се топлота локално механички генерише то представља главну предност FSW-а у односу на конвенционалне поступке при заваривању бакра и његових легура.

6. Примена FSW

Имајући у виду да су заварени спојеви добијени FSW поступком високог квалитета, да је сама технологија процеса релативно једноставна и са економског аспекта повољна, то је FSW широко примењен у техници и многим гранама индустрије. Највише се примењује у:

- бродоградњи,
- авиоиндустрији,
- аутомобилској индустрији,
- производњи шинских возила,
- производњи космичких летелица итд.

6.1. Бродоградња

Примена заваривања поступком FSW у индустрији је почела најпре у фабрици "SAPA" у Шведској и то за израду једноставних платформи од алуминијума код бродских уређаја за замрзавање рибе. Касније је у овој фабрици развијена читава серија аутоматизованих машина за процес FSW. У овој области индустрије, FSW поступком спајају се: трупови и подови бродова, бокови, преграде, плоче за палубе, платформе за слетање хеликоптера, поморске и транспортне конструкције, приобална складишта, јарболи, чамци за једрење, расхладни уређаји итд.



Слика 6.1 Спајање монтажних, алуминијумских плоча поступком FSW, у производњи бродова [1]

Собзиром на то да су основни захтеви у производњи бродова ниска цена, већа брзина и већа носивост брода, потребно је смањити масу брода. Ово је могуће извести израдом плоча са профилисаним ојачањима од одређених врста алуминијума с обзиром на

потребну крутост (слика 6.1). Применом нове технологије производње бродова, поступком заваривања трењем помоћу алата делова бродских конструкција од алуминијумских легура скраћено је време израде и олакшан процес монтаже. Захваљујући малим деформацијама у току заваривања, поједини делови се одлично уклапају са другима, па је процес монтаже поједностављен. Пракса је да се више произвођача делова бродова ангажује, а онда се сви ти елементи склапају код главног произвођача. Данас монтажне алуминијумске плоче чине око 25 % бродске конструкције, тако да је укупна цена коштања снижена за око 5 %.

FSW примењују велики светски произвођачи бродова као што је: Hydro Aluminium (Норвешка) – за прекоокеанске бродове, Marine Aluminium (Норвешка) – за производњу брзих ферибота. На слици 6.2 приказан је путнички брод за чију израду је примењен FSW поступак.

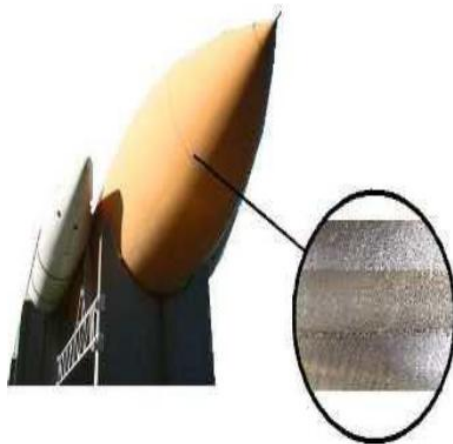


Слика 6.2 Путнички брод који је израђен применом заваривања трењем [1]

6.2. Авио и космичка индустрија

Добре карактеристике и висока поузданост заварених спојева добијених поступком FSW дошле су до изражаја у изради великог броја различитих делова у авио и космичкој индустрији.

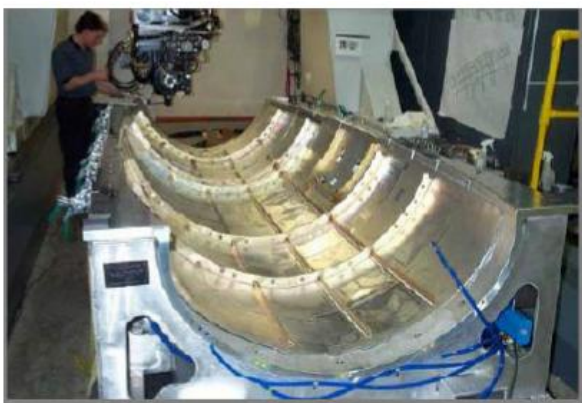
У космичкој индустрији код Space Shuttle-а спојеви спољашњих резервоара за гориво од недавно се раде искључиво поступком FSW (слика 6.3). Ово омогућује да се ови резервоари раде од специјалних легура Al-Li 2195 чиме се њихова маса смањила за више од три тоне.



Слика 6.3 Резервоар ракете заварен коришћењем поступка FSW [19]

У авио индустрији преко 40000 закивака замењено је спојевима изведеним поступком FSW, са тенденцијом даљег раста. Када су у питању високо одговорни спојеви, обично се користи поступак FSW. Како је поступак FSW високо продуктиван, време израде резервоара за гориво код Delta програма у фабрикама Boeing је скраћено са 23 на 6 дана, а укупни трошкови су смањени за 60 %.

На слици 6.4 приказани су панели који се користе за подове товарног дела авиона, као и заваривање странице авиона (слика 6.5), а слика 6.6 приказује употребу FSW поступка при изради резервоара за беспилотне летелице.



Слика 6.4 Панели за подове товарног дела авиона заварени FSW поступком [4]



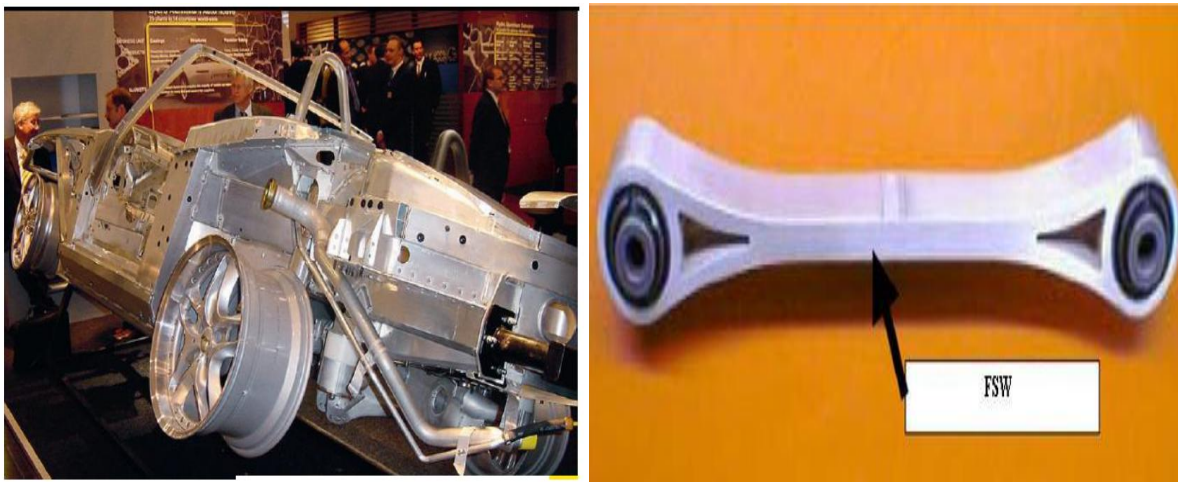
Слика 6.5 Странице авиона заварене FSW поступком [4]



Слика 6.6 Употреба FSW при изради резервоара за беспилотне летелице [4]

6.3. Аутомобилска индустрија

Заваривање поступком FSW, користи се и у неколико водећих светских аутомобилских компанија. Циљ је да се произведу возила мање тежине, чиме се повећава њихова носивост и смањује потрошња горива, па се смањује и загађење животне средине. Овај поступак заваривања се користи при изради: мотора и шасија, фелни, везе са хидрауличним цевима, каросерија, тела камиона, цистерни за гориво, приколица, аутобуса и возила за превоз на аеродромима, оквира мотоцикала и бицикала, при поправци аутомобила израђених од алуминијума (слика 6.7).

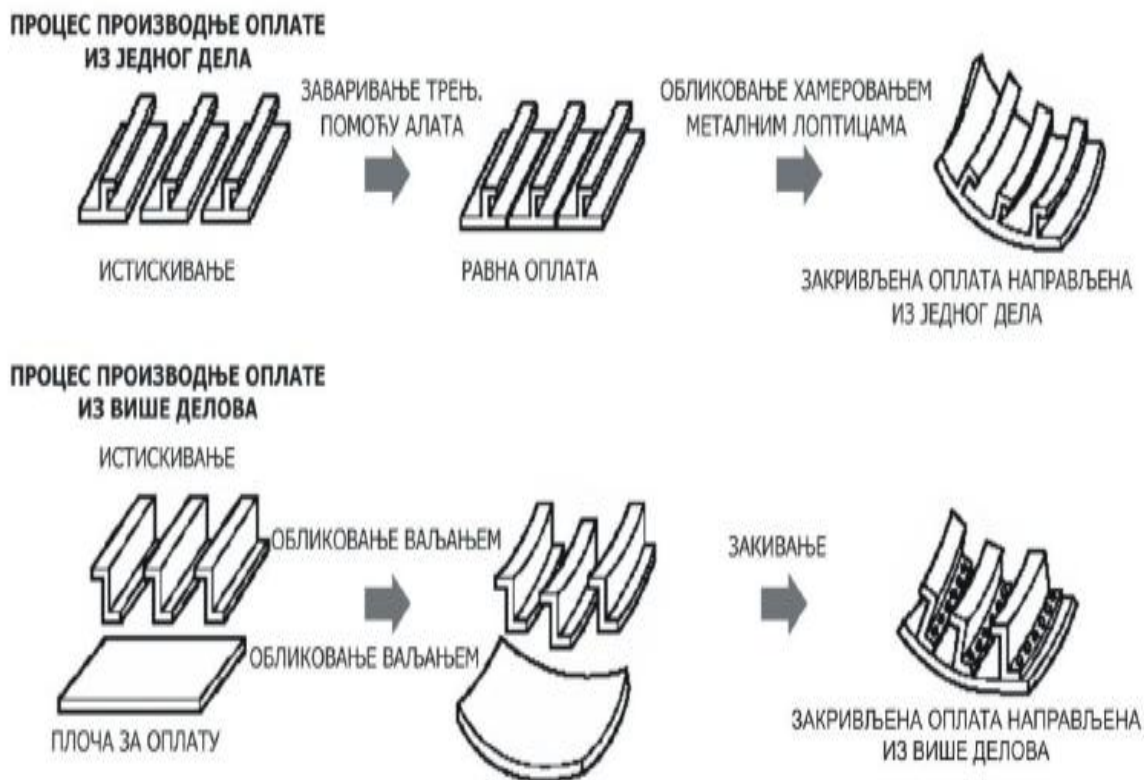


Слика 6.7 Елементи аутомобила израђени од алуминијума FSW поступком [4]

6.4. Производња шинских возила

Увођењем поступка заваривања трећем помоћу алата у процес производње железничких превозних средстава постигнути су економски и еколошки ефекти. Данас се овим поступком израђују широке, профилисане плоче од легуре алуминијума које се

примењују у вагоноградњи. Плоче се добијају спајањем профилисаних сегмената добијених истискивањем (слика 6.7) и даље за производњу саћастих сендвич панела како за равне тако и за криве површине. Широке, профилисане плоче се производе од легуре алуминијума (Mg - 0.7; Si - 0.6), прерадом на топло.



Слика 6.7 Профилисана плоча од алуминијумске легуре 6N01; (димензије 1300x5000 mm) за производњу супер брзог воза – шема спајања сегмената [1]

6.5. Остале области примене

Зваривање поступком FSW, користи се и при производњи: кућишта електромотора, расхладних плоча, кухињске опреме, беле технике, бензинских резервоара и плинских боца, медицинске опреме (слика 6.8) намештаја итд.



Слика 6.8 Делови за скенер направљени FSW поступком [6]

Применом поступка FSW, једнако добри резултати добијени су и при спајању лимова од бакра, цинка, магнезијума и њихових легура, затим код многих врста челичних лимова али и код комбинација различитих метала, као што је титан и челик, као и код појединих композитних материјала на бази металне матрице. Алуминијум, бакар, угљенични и ниско легирани челици и многи други метали заварују се овим поступком у нормалним спољашњим условима. Али код заваривања високолегираних челика, препоручује се употреба неког од заштитних гасова у циљу спречавања штетног утицаја спољашње атмосфере. Лимови од ниско угљеничног челика и челика са 12 % хрома дебљине од 3 *mm* до 12 *mm*, могу се успешно заваривати само са једне стране. Лимове дебљине веће од 25 *mm* треба заваривати обострано.

7. Машине за FSW

Поступак FSW, се изводи тако да се на радном столу машине налазе елементи (лимови) које је потребно спојити. Елементи морају бити чврсто стегнути за радни сто машине, који може хоризонтално транслаторно да се креће. Прва машина за заваривање трењем са мешањем била је модификована глодалица у Институту за заваривање *TWI* у Великој Британији. То је било 1991. године када је нова техника заваривања откривена и патентирана [4]. Данас, *TWI* користи широк спектар машина и додатне опреме за истраживање и развој заваривања трења са мешањем. Успешно се заварују материјали дебљине од $0,3 \div 75 \text{ mm}$. Неке од компјутерско управљаних *ESAB*-ових машина (*ESAB-Laxa*, Шведска) су:

- *SuperStir*– има вакуумско стезање радног материјала за сто машине. Прва је произведена 1996. године. Распон дебљина лима је од $1 \div 25 \text{ mm}$. Радни простор машине је $5 \times 8 \times 1 \text{ m}$. Максимална притисна сила је 60 kN , док је максимална брзина обртања 5000 o/min .
- *PowerStir*– једна од највећих FSW машина у свету са више од 130 KW снаге обртања вретена. Максимална притисна сила је 15 t , а радни простор је $6 \times 3 \text{ m}$. Машина може да изврши 3D заваривање. Испод горњег вретена има и доње тако да може да се изврши заваривање са две стране истовремено и постиже се дебљина вара и до 100 mm у једном пролазу.
- *Precision Spindle*– јединствена карактеристика ове машине је велика брзина обртања вретена. Из тог разлога добра је за заваривање материјала са већим температурама омекшавања као што су: челик, нерђајући челик, легуре титанијума и легуре никла. Притисна сила је до 10 t , а радни простор стола машине је $2 \times 0,6 \text{ m}$.

На слици 7. је приказана машинска ЗТМ опрема *ESAB SuperStir* постављена у бродоградилишту „*Marine Aluminium*“ у Норвешкој за заваривање дугих шавова бродских панела. Панели могу бити дужине $6 \times 16 \text{ m}$ и висине и до 155 mm .



Слика 7. *ESAB SuperStir* у бродоградилишту „*Marine Aluminium*“, велики бродови као типични примери на којима се заварују панели поступком FSW [19]

8. Закључак

У овом раду је представљен поступак фриксионог заваривања, са посебним освртом на фриксионо заваривање мешањем (Friction Stir Welding - FSW) као и његова широка примена у савременој индустрији (аутомобилској, железничкој, космичкој, бродоградњи).

Поступак FSW је могуће аутоматизовати, што доводи до повећања продуктивности и смањења трошкова производње. FSW је еколошки чист поступак, без загађивања животне средине, што у последње време представља додатни мотив за његово унапређење и већу примену у индустрији.

Овим поступком се добија изузетно квалитетан спој, добрих механичких карактеристика. Када би се упоређивало, FSW заваривање даје знатно боље резултате код чврстоће споја, тврдоће, еластичности, отпорности према замору материјала и отпорности према лому. С обзиром на карактер овог поступка заваривања, исти налази примену како код спојања различитих материјала тако и при спајању нових врста материјала. С обзиром на све већу примену овај нискоенергетски поступак, код кога се користи чиста механичка енергија, све више замењује друге високоенергетске поступке који су по својој природи штетни по околину. Због енергетске ефикасности, остварују се значајне уштеде енергије на глобалном нивоу.

Недовољна истраженост самог процеса изискује потребу за истраживањем технолошких параметара, првенствено за легуре разних материјала које се не могу спајати конвенционалним поступцима заваривања.

9. Литература

- [1] Нада Ратковић, Моделирање процеса заваривања трењем машинских делова различитих облика и материјала, Машински факултет Крагујевац, Србија 2009.
- [2] Милорад Јовановић, Вукић Лазић, Драган Адамовић, Нада Ратковић : Гасно заваривање – приручник, Машински факултет, Крагујевац 2006.
- [3] Милорад Јовановић, Вукић Лазић, Технологија ливења и заваривања, Факултет инжењерских наука, Крагујевац 2015.
- [4] W.M. Thomas, E.D. Nicholas, J.C. Needham, M.G. Murch, P. Templesmith, C.J. Dawes, G.B. Patent Application No.9125978.8 (December 1991).
- [5] Jason B. Elliot: Friction Stir Welding, www.enrgku.edu
- [6] G. Zacharias, *Analysis of material flow around a retractable pin in a friction stir weld*, PhD Thesis, Faculty of Engineering, Port Elizabeth Technikon University, South Africa, 2003.
- [7] Website:http://www.wbc-vmnet.kg.ac.rs/pub/download/13813386651_up_case_study.pdf
- [8] CTC Kragujevac, Studija slučaja: Zavarivanje trenjem , Naziv projekta: WBC Virtual Manufacturing Network – Fostering an Integration of the Knowledge Triangle, Podgorica, Crna Gora, 2012.
- [9] R. S. Misra, M. W. Mahoney, *Friction stir welding and processing*, pp. 6 – 19, 2007
- [10] <http://www.me.sc.edu/research/fsw/research/process/mflow.html>
- [11] <http://www.metalworkingworldmagazine.com>
- [12] <https://ru.scribd.com/doc/109271936/Friction-Stir-Welding-Fsw-Final-Report>
- [13] Danijela D. Živojinović: Primena mehanike loma
- [14] Y. N. Zhang, X. Cao, S. Larose, P. Wanjara: Review of tools for friction stir welding and processing, Canadian Metallurgical Quarterly, Vol. 51 (3), str. 250-261, 2012
- [15] M. B. Prime, R. J. Sebring, J. M. Edwards, J. A. Baumann, R. J. Lederich, *Contour method determination of parent part residual stresses using a partially relaxed FSW test specimen*

[16] R.S.Mishra, Z.Y.Ma : Friction stir welding and processing, 2005

[17]Website :<http://esabsp.esab.net/files/Handbooks/Welding%20Automation/XA00146120.pdf>

[18] Јовановић И. : Технологија заваривања алуминијумских легура трењем помоћу алата, магистарски рад, Машински факултет, Београд, 2000.

[19] Андријана А. Ђурђевић ТЕХНОЛОГИЈА ЗАВАРИВАЊА ТРЕЊЕМ СА МЕШАЊЕМ Т-СПОЈЕВА ОД ЛЕГУРЕ АЛУМИНИЈУМА, Машински факултет Београд, Србија 2015.