

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Производне технологије

Број индекса: 83/2009

Живана М. Јовановић

**Анализа и примена фрикционог заваривања
мешањем**

завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. **Др Нада Ратковић, доцент - ментор**

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог рада кандидат треба да опише поступак фрикционог заваривања мешањем – FSW.

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.

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, Србија 2009
- 2) Милорад Јовановић, Вукић Лазић : Технологија ливења и заваривања, уџбеник, Факултет инжењерских наука, Крагујевац 2015
- 3) Мирослав Б. Ђурђановић, Перспектива примене топлоте генерисане трењем у обради метала, научни рад, Машински факултет Ниш, Србија 2003

Крагујевац, октобар 2016

ментор:

Др Нада Ратковић, доцент

Резиме:

На основу истраживања и анализе расположиве литературе у завршном раду је приказан поступак фриксионог заваривања 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 фриксионог заваривања мешањем кроз призму индустрије.

Кључне речи: фриксионо заваривање мешањем, трење, заваривање

Resume: Based on research and analysis of the available literature in the final paper is presented friction stir welding process – 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: FSW , friction, welding

Садржај

1. Увод	1
2. Класификација метода заваривања	2
2.1 Основни видови заваривања – општа подела	2
2.2 Напредне методе заваривања	4
2.2.1 Заваривање плазмом	4
2.2.2 Заваривање електронским снопом	4
2.2.3 Заваривање ласерским зрацима	5
2.2.4 Заваривање трењем – FSW	6
3. Основи FSW	7
3.1 Принцип рада	7
3.2 Фазе процеса FSW	9
3.3 Метал шава	11
3.4 Микроструктурне карактеристике	12
3.5 Течење материјала у процесу FSW	15
3.6 Предности и недостаци поступка FSW	17
4. Технолошки и металуршки параметри процеса FSW	20
4.1 Број обртаја и трансляторна брзина алата	20
4.2 Силе заваривања	21
4.3 Генерисање и трансфер топлоте	22
4.4 Угао нагиба и дубина продирања чела алата	24
4.5 Металуршке трансформације током процеса FSW у зависности од параметара заваривања	25

4.6 Врсте заварених спојева.....	28
5. Алати и уређаји за FSW процес.....	30
5.1 Основни облици и геометрија алата за FSW.....	30
5.2 Машине за FSW.....	34
6. Материјали заварљиви FSW поступком	37
7.Примена FSW	40
7.1 Бродоградња.....	40
7.2 Авио и космичка индустрија.....	41
7.3 Аутомобилска индустрија.....	43
7.4 Производња шинских возила.....	44
7.5 Остало.....	45
8. Закључак.....	47
9. Литература.....	48

1. УВОД

Заваривање је процес спајања два или више истородних или различитих материјала са или без додатног материјала, тако да се добије хомоген и чврст спој. Спајање заваривањем има неограничено подручје примене у производњи металних производа у машинској, ваздухопловној, аутомобилској, грађевинској, енергетској и другим индустријама.

Према начину спајања поступци заваривања се деле у три велике групе. Прву групу чине поступци заваривања топљењем, код којих се материјали који се заварују топе на месту споја, уз додатни материјал или без њега. Другу групу чине поступци заваривања притиском, где се заваривање 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.

Од савремених конструкција све више се захтева да испуне високе стандарде у погледу квалитета, што изискује потребу бржег и што квалитетнијег спајања заваривањем. Данас се у свету ради на томе да се осавремене и развију напредне методе заваривања, међу којима је и метода фриксионог заваривања мешањем (FSW).

Ова метода јесте метода заваривања трењем, а то припада групи заваривања под притиском.

Поступак FSW (енглески FSW- Friction Stir Welding) је једноставан, чист и иновативан. Захваљујући изузетно добрим карактеристикама у односу на остале конвенционалне поступке заваривања, FSW је применљив у многим гранама индустрије.

Најпознатије области примене ове технологије су у производњи делова моторних возила, делова хидрауличних елемената, затим спојева у електротехници, у бродоградњи, авио и космичкој индустрији и другим гранама индустрије.

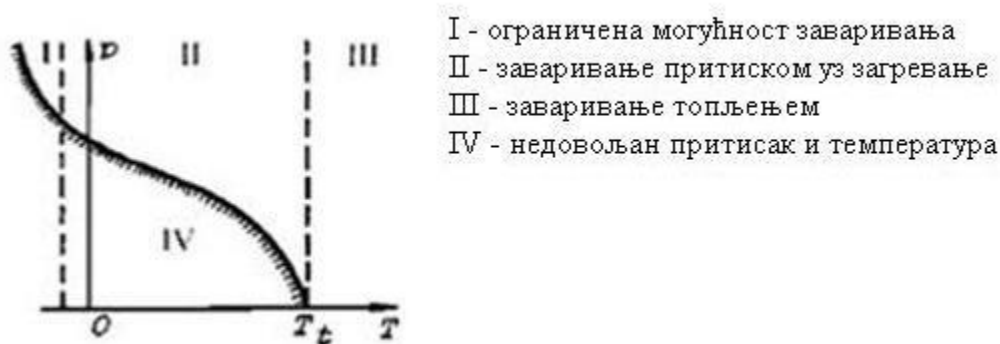
2. КЛАСИФИКАЦИЈА МЕТОДА ЗАВАРИВАЊА

Заваривање, као технологија спајања два или више елемената у јединствену целину, различитим методама, непрекидно се развија и све више примењује. Главни разлог је што постоји низ техничких и економских предности заваривања у односу на друге начине спајања. Данас је у индустријски развијеним земљама у примени знатно већи број метода заваривања него код нас, што указује на то да је потребно више користити заваривање као начин спајања при изradi металних конструкција. Примена разних метода заваривања у односу на све остале производне процесе (ливење, ковање, пресовање, дубоко извлачење, резање, итд.) достиже 25%, што потврђује економску исплативост спајања метала заваривањем. Осим тога, око 50% свих произведених челика (фолија, лимова, плоча, цеви, профилних цеви, жица, профила) прерађује се у некој фази производног процеса заваривањем или сродним поступцима.

2.1 ОСНОВНИ ВИДОВИ ЗАВАРИВАЊА – ОПШТА ПОДЕЛА

За међусобно спајање материјала потребна је одређена врста и количина енергије, под чијим утицајем може настати извесно кретање и премештање наелектрисаних честица, односно образовање заједничких веза на граничним површинама спајања. Без обзира на врсту енергије која се користи, увек је потребно да количина доведене енергије буде већа од енергије потребне за активацију атома, то јест њихово побуђивање као услов за међусобно спајање.

Услови за образовање завареног споја приказани су помоћу дијаграма притисак – температура (слика 2.1). За сваки метал се могу конструисати овакви дијаграми и одредити граничне вредности и подручја притисака и температуре потребних за остварење споја.



Слика 2.1 Приказ граничних параметара заваривања [3]

Због бројних приступа у анализирању подела поступака заваривања постоји већи број могућих класификација, према:

- Намени (заваривање, наваривање);
- Степену механизације (ручно, механизовано, аутоматизовано);
- Врсти електрода (топливом, нетопливом, голом, обложеном);
- Заштити растопа (без заштитне атмосфере или у заштитној атмосфери инертног, активног гаса);
- Стању електричног лука (са отвореним, покривеним луком);
- Врсти енергије итд.

Према доминацији топлотних односно деформационих циклуса разликује се:

- Заваривање топљењем;
- Заваривање притиском и
- Комбиновано (табела 2.1)

Табела 2.1 Подела поступака заваривања

ЗАВАРИВАЊЕ ТОПЉЕЊЕМ	ЗАВАРИВАЊЕ ПРИТИСКОМ	КОМБИНОВАНО ЗАВАРИВАЊЕ
Електролучно (REL, MAG/MIG, EPP, TIG) Гасно заваривање Заваривање електронским снопом Заваривање ласером Заваривање плазмом Алуминотермијско и друго	Ултразвучно Заваривање експлозијом Заваривање на хладно Заваривање трењем *FSW и друго	Електроотпорско (тачкасто, шавно, брадавичасто, пројекционо) Ковачко Дифузионо заваривање и друго

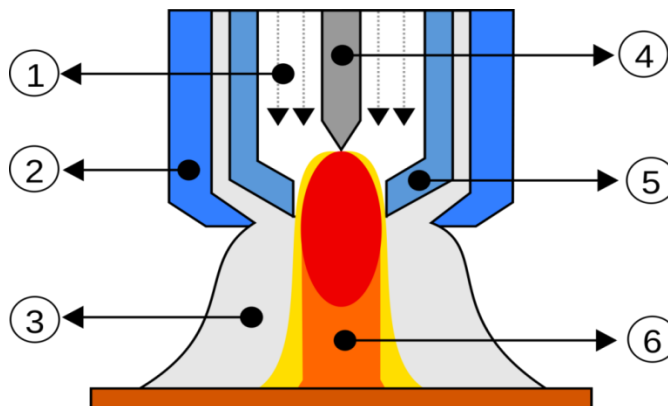
2.2 НАПРЕДНЕ МЕТОДЕ ЗАВАРИВАЊА

Заваривање је један од најважнијих технолошких процеса спајања у савременој индустријској пракси. У циљу постизања што вишег нивоа квалитета самих производа, ради се на осавременавању и усавршавању метода заваривања.

С тим у вези настале су и примењују се тзв. напредне технологије заваривања као што су: заваривање плазмом, заваривање електронским снопом, заваривање ласерским зрацима, међу којима је и "најмлађа" метода FSW. Ова иновативна метода све више осваја и заузима простор у различитим индустријским процесима производње.

2.2.1 ЗАВАРИВАЊЕ ПЛАЗМОМ

Заваривање плазмом је проистекло усавршавањем TIG-поступка. Електролучно заваривање плазмом заснива се на загревању и топљењу дела основног материјала помоћу сабијеног лука који се може одржавати између електроде од волфрама и основног материјала или електроде и плазмене млазнице. Успостављање електричног лука није могуће додиром електроде и основног материјала, јер је електрода потпуно увучена у млазницу. Стога се у извор напајања уграђују високофреквентни јонизатори који најпре успостављају лук између електроде и млазнице, а убрзо га преносе на основни материјал.

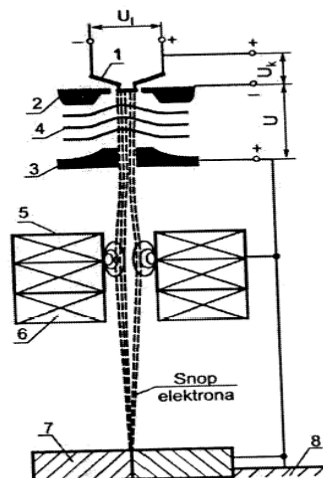


Слика 2.2 Шематски приказ заваривања плазмом (1-плазмени гас; 2-спољашњи оклоп млазнице; 3-заштитни гас; 4-електрода; 5-унутрашњи оклоп млазнице; 6-плазмени лук) [2]

2.2.2 ЗАВАРИВАЊЕ ЕЛЕКТРОНСКИМ СНОПОМ

Употреба електронског снопа за заваривање почиње од 1950. године. Топлота се добија бомбардовањем места споја млазом електрона велике брзине. При удару електрона у основни материјал, претвара се њихова кинетичка енергија у топлотну. Поступак се изводи у високом вакууму. Радни део уређаја (слика 2.3) састоји се из волфрамске или

титанске катоде, мрежице за усмеравање електрона и аноде. Електрони, емитовани из усијане катодe, прикупљени мрежицом, убрзавају се дејством електричног поља и усмеравају ка аноди. Катода и анода се налазе у високо вакуумској средини ради заштите од оксидације. Уређај за заваривање електронским снопом напаја се високим напонем, а даје струју мале јачине. Невидљиви електронски снап добија облик конуса захваљујући магнетном пољу које стварају електромагнети. Жижа снопа налази се на месту спајања радних предмета, који су уземљени. Радни предмети се постављају готово без зазора.

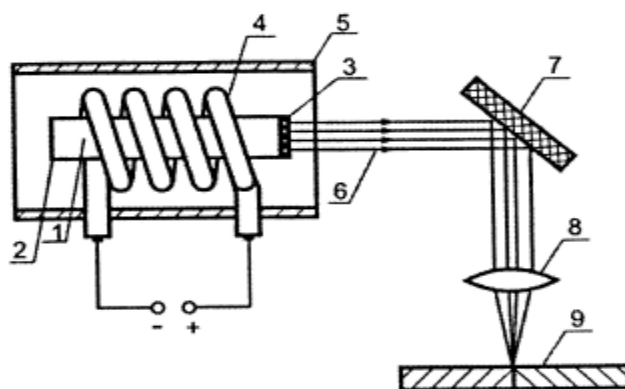


Слика 2.3 Шема уређаја за заваривање електронским снопом (1-волфрамска или титанска катода; 2-мрежица; 3-анода; 4-електрично поље; 5-електромагнети; 6-магнетно поље; 7-радни предмети; 8-уземљење) [2]

2.2.3 ЗАВАРИВАЊЕ ЛАСЕРСКИМ ЗРАЦИМА

Ласерски зраци који се користе за заваривање имају таласну дужину $\lambda=1.056\text{--}1.062\ \mu\text{m}$. Каже се да је заваривање ласером најефикаснији метод спајања метала који даје шавове веома сличне онима изведеним електронским снопом.

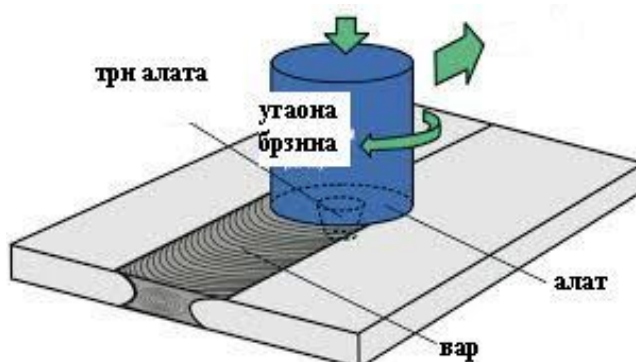
Основни део је ласерски рубински штап, непропустљиво огледалце, делимично пропустљиво огледалце, импулсна лампа; сви ови делови смештени су у рефлектујући цилиндар. Светлост емитована из штапа пада на усмеравајуће огледало и преко оптичког сочива фокусира се на површину, линију, тачку или групу тачака на радном предмету.



Слика 2.4 Шема заваривања ласером (1-рубински штап; 2-непропустљиво огледалце; 3-делимично пропустљиво огледалце; 4-импулна лампа; 5-рефлектујући цилиндар; 6-светлосни зраци; 7-усмеравајуће огледало; 8-оптичко сочиво; 9-радни предмети) [2]

2.2.4 ЗАВАРИВАЊЕ ТРЕЊЕМ – FSW

Заваривање трењем са мешањем (FSW) или заваривање трењем помоћу алата је специфичан поступак фрикционог заваривања који се користи за спајање плочастих материјала. Проналазак овог поступка омогућио је заваривање трењем плочастих материјала већих дебљина, од различитих материјала. Заваривање је изводљиво у свим могућим међусобним положајима. Такође је могуће остварити различите облике завареног споја. FSW има изузетне карактеристике: рад је једноставан и лако може да се аутоматизује, енергетски је убедљиво најефикаснији, еколошки је апсолутно чист, заварени спојеви имају врло висок квалитет, итд.



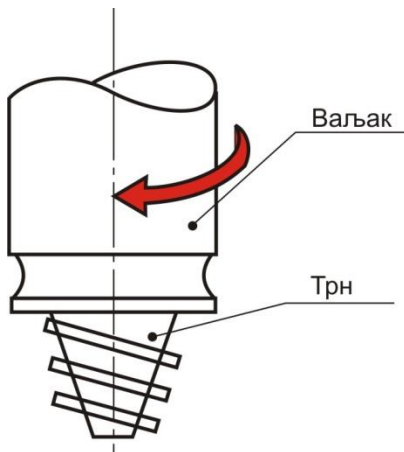
Слика 2.5 Шематски приказ FSW

3. ОСНОВИ FSW

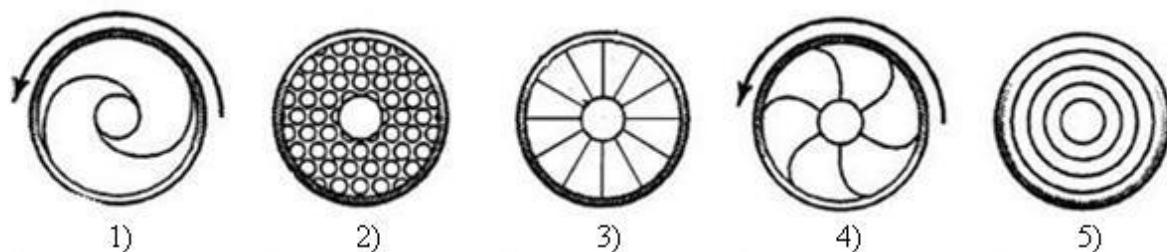
Деведесетих година прошлог века развијен је нови поступак спајања истих и различитих материјала који се изводи у чврстом стању без топљења материјала познатији под именом "Заваривање трењем са мешањем" (Friction Stir Welding- FSW). Поступак је патентиран на институту за заваривање у Великој Британији децембра 1991. године. Патентирао га је Вејн М. Томас. Заваривање материјала FSW поступком, је веома брзо, већ 1994. године, добио своју комерцијалну примену и изазвао велику пажњу истраживача у пракси.

3.1. ПРИНЦИП РАДА

Поступак FSW је релативно једноставан и изводи се на следећи начин: елементи који се спајају (лимови) поставе се на радни сто машине и морају бити чврсто стегнути да не би дошло до релативног померања између радних комада и стола. Радни сто треба да има могућност хоризонталног транслаторног кретања. Специјални алат (слика 3.1) који се користи у процесу заваривања је цилиндричног облика и састоји се из тела алата и два концентрична дела која ротирају великом брзином. Тело алата служи да се алат причврсти у стезне чељусти машине. Део алата већег пречника назива се чело алата, док се део мањег пречника назива трн алата. Облици чела (слика 3.2) и трна алата могу бити различити. Чело алата може имати и концентрично удубљење у својој површини обично полукружног облика, док је трн најчешће коничног облика који може бити профилисан завојницом или разним другим жљебовима. Висина трна углавном зависи од дебљине лима који се заварује, али мора бити неколико десетих делова милиметра мања од дебљине лима.

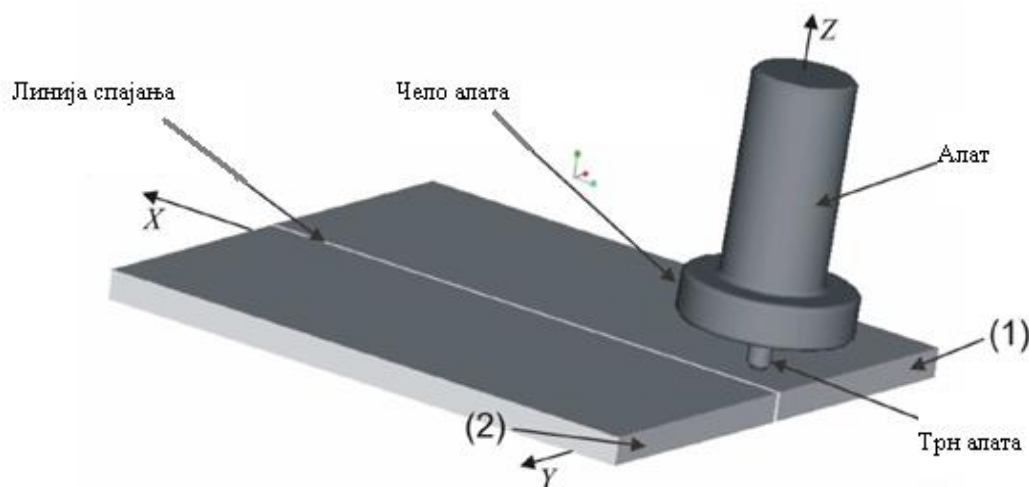


Слика 3.1 Алат за FSW



Слика 3.2 Облици профила чела ваљка за FSW(1,4- са лопатицама; 2-са круговима; 5- са концентричним круговима) [11]

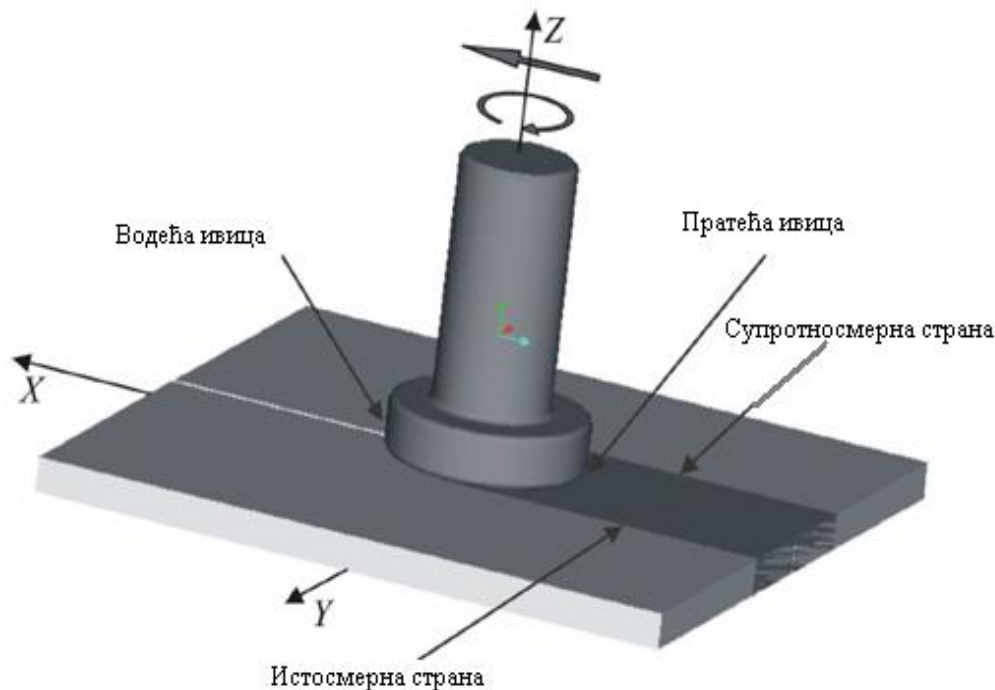
Поступак FSW, почиње тако што је алат позициониран изнад радног стола машине. Оса алата је нормална на линију додира лимова (слика 3.3).



Слика 3.3 Приказ алата и радних комада пре почетка заваривања (1,2-лимови) [7]

Алат који ротира постепено се приближава линији споја и зарива се у материјал – радне комаде. Тада се у материјалу формира почетна рупа, при чему почиње да се генерише топлота. Трн алата се зарива у материјал све док чело алата не направи контакт са горњом површином радних комада. Затим алат почиње да се креће равномерно праволинијски дуж линије спајања (или се креће радни сто). Алат мора да са довољним притиском задржи материјал унутар зоне заваривања и да створи довољну температуру да би се процес FSW несметано одвијао. У том положају алат загрева материјал до близу тачке топљења и он постаје пластичан. Захваљујући облику трна, загрејани материјал се креће око трна и на тај начин се меша. Затим почиње хоризонтално транслаторно уздужно кретање радног стола машине. У даљем току одвијања процеса FSW, трн практично "клизи" између лимова у смеру заваривања, нов материјал се загрева, постаје пластичан и непрекидно се меша. За то време иза чела алата се ствара бразда глатког загрејаног материјала који се хлади и очввршћава (слика 3.4), а између лимова, се формира монолитан спој, док се доња раван формира од подлоге на којој радни комади стоје и она је глатка и

равна. Искључивањем транслаторног кретања радног стола машине и одвајањем алата од материјала, завршава се процес заваривања. Уместо радног стола машине, транслаторно кретање може да врши само алат или радни сто машине и алат истовремено.

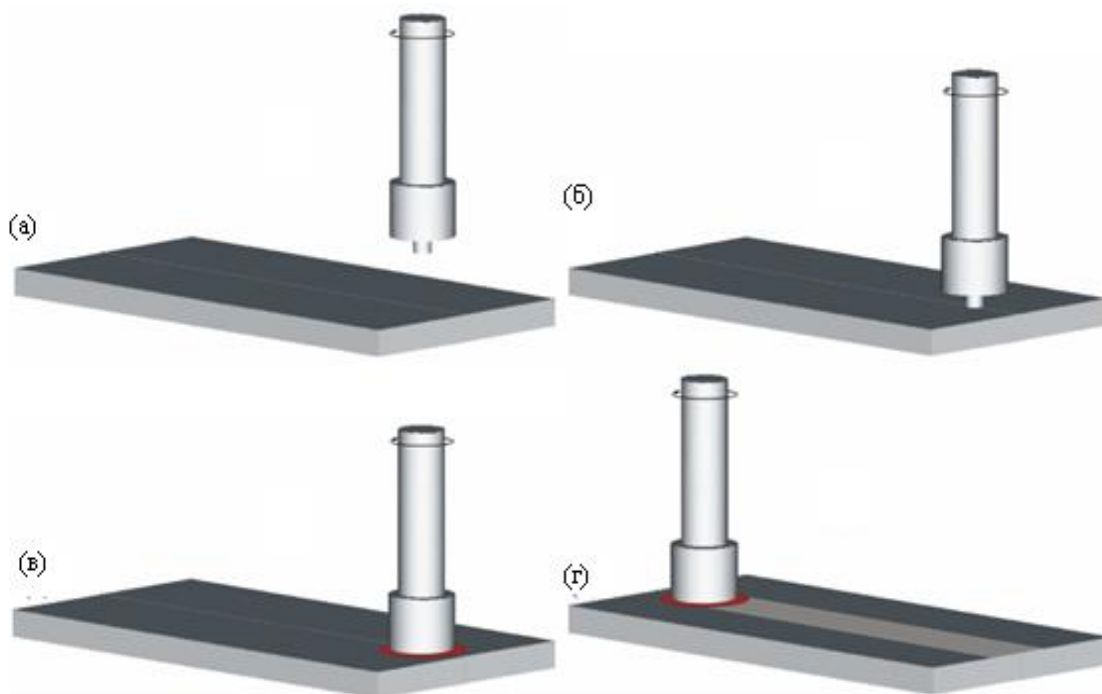


Слика 3.4 Приказ алата и радних комада у току процеса заваривања [7]

3.2. ФАЗЕ ПРОЦЕСА FSW

Процес FSW, је могуће поделити на два карактеристична периода, на две фазе како је приказано на слици 3.5.

Прва фаза почиње додиром врха трна алата и радних комада и траје до контакта чела алата са горњом површином радних комада, тј. до прекида аксијалног кретања. Тај период се може дефинисати фазом продирања или утискивања. Ова фаза се карактерише константним интензитетом генерисања топлоте трењем. Количина ослобођене топлоте је најмања на почетку, а максимална на крају фазе продирања. Топлота се ослобађа трењем између целе површине трна алата и материјала, а на крају се у тај процес укључује и прстенаста површина чела алата.

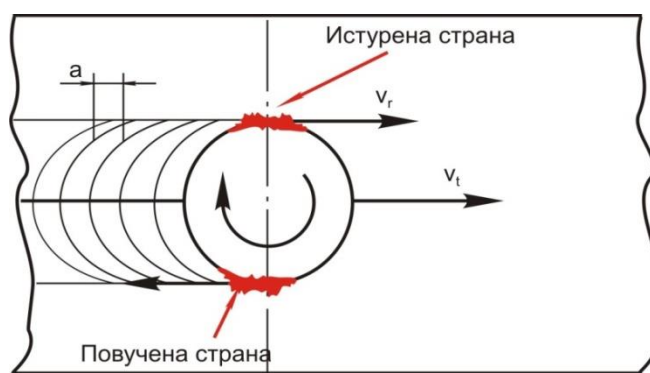


Слика 3.5 Фазе процеса FSW: (а), (б) и (в) – прва фаза; (г) – друга фаза [9]

Почетак транслаторног кретања алата дуж линије спајања лимова означава почетак друге фазе. Овај период се може дефинисати као фаза формирања споја, и он се карактерише различитим и специфичним генерисањем топлоте од стране радних површина алата. Топлота се најинтензивније генерише на фронталном делу фрикционе површине трна, јер она долази у додир са незагрејаним материјалом на који трн наилази у смеру свог транслаторног кретања. На осталим деловима површине трна, као и на површини чела алата, интензитет генерисања топлоте је много мањи. Разлог томе јесте што се те површине налазе у контакту са раније већ загрејаним и пластичним материјалом, а у том случају генерисање топлоте има саморегулишући карактер. То значи да се топлота ослобађа само у количини довољној да се температура завариваних делова одржава на $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ испод тачке топљења слабијег материјала у споју. Изложена подела циклуса заваривања на две карактеристичне фазе омогућава лакшу анализу процеса генерисања топлоте, затим прорачун топлотне расподеле и температурног поља, проблема хабања и нагомилавања материјала на фрикционим површинама алата, итд. Самим тим такав приступ омогућава лакше решавање уочених недостатака код процеса FSW. Ова фаза се завршава прекидом транслаторног кретања.

3.3. 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 3.6). 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 3.7) метала шава је горња површина заварених лимова која се формира после проласка чела алата, а корен (слика 3.8) метала шава је доња површина.



Слика 3.6 Приказ положаја вектора брзине ротације алата (v_r) и вектора брзине транслације (v_t) код FSW

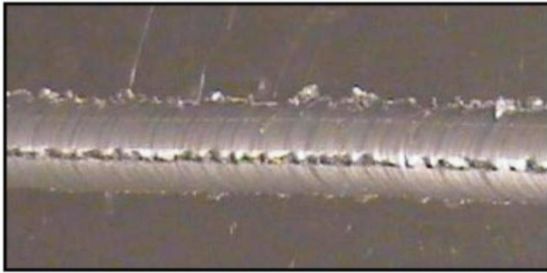


Слика 3.7 Изглед завареног споја са горње стране заварених комада [7]

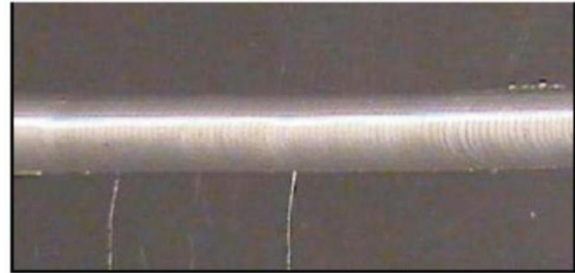


Слика 3.8 Изглед завареног споја са доње стране заварених комада [7]

На лицу метала шава се налазе карактеристични отисци од алата у облику полукружних рубова. 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 3.9).



а) шав лошијег квалитета



б) шав високог квалитета

Слика 3.9 Изглед шава добијеног FSW поступком [5]

На супротносмерној страни лица метала шав, 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 шав 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.

3.4. МИКРОСТРУКТУРНЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ

У литературним изворима, постоји више различитих термина који описују микроструктурне промене код процеса FSW. Асиметрична природа метала шав и необичан облик степенастог алата, условили су да, као резултат завареног споја имамо веома карактеристичну микроструктуру. Први покушаји микроструктурне поделе завареног споја изведени су 1997. године само за легуре алуминијума. Врло брзо су се одомаћили називи микроструктурних зона, који су усвојени консензусом и који обухватају и микроструктурне поделе осталих метала. Микроструктурна подела је изведена на TWI институту и њу сачињавају четири зоне које су приказане на слици 3.10.



Слика 3.10 Распоред појединих зона у завареном споју добијеном процесом FSW (А – Основни материјал (ОМ); Б – Зона утицаја топлоте (Heat Affect Zone - HAZ); В – Зона термо-механичког утицаја (Thermo-Mechanically Affect Zone - TMAZ); Г – Зона мешања (Stirred Zone) или "грумен" зона (Nugget Zone – NZ)) [1]

1. Основни материјал (ОМ)

У зони основног материјала нема пластичног деформисања материјала, нити утицаја топлоте, који може утицати на механичка својства, тако да у зони основног материјала нема микроструктурних промена.

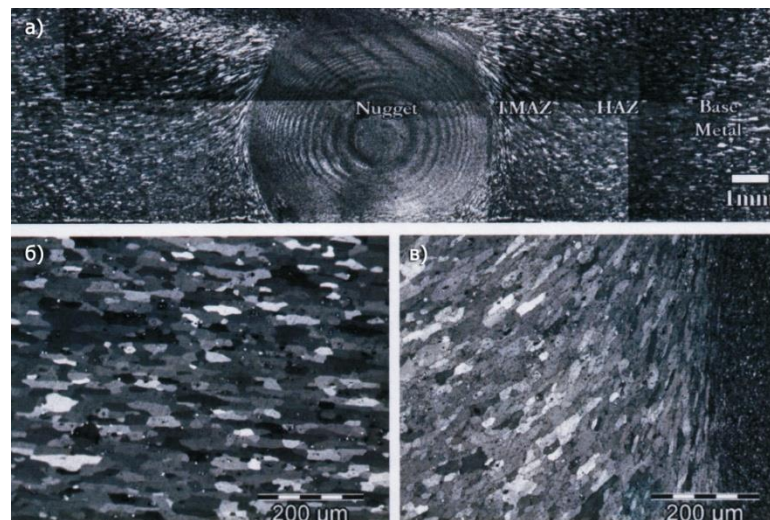
2. Зона утицаја топлоте (ЗУТ) (Heat Affected Zone – HAZ)

Зона утицаја топлоте је заједничка за све процесе заваривања, па постоји и код процеса FSW. Ова зона је изложена топлотном утицају, али се не деформише током процеса заваривања. Током процеса заваривања, она пролази кроз одговарајући температурски циклус који доводи до промена механичких својстава и микроструктуре. Величина зоне утицаја топлоте директно зависи од унете топлоте. Температуре у овој зони су ниже од оних у TMAZ зони, али још увек имају значајан ефекат.

3. Зона термо-механичког утицаја (THERMO-MECHANICALLY AFFECTED ZONE – TMAZ)

У зони термо-механичког утицаја, материјал је изложен пластичним деформацијама и температурским утицајима од стране алата који се јављају на обе стране зоне мешања. За разлику од зоне мешања, микроструктура TMAZ-а се може разликовати од структуре основног материјала, јер је значајно деформисана, а и температуре су ниже, па је приликом процеса заваривања и одговарајућа микроструктура мање промењена. Унутар TMAZ-а постоје три донекле јасне области, посебно код алуминијума.

Најизраженији део је тзв. ГРУМЕН (рекристализациона зона). Изван грумена на свакој страни је област која је у мањој мери деформисана, што кад се достигне одређена температура доводи до рекристализације (слика 3.11).



Слика 3.11 Микроструктура FSW споја: а) целокупног споја, б) ОМ, в) TMAZ-а[1]

Граница између грумена и остатка зоне термо-механичког утицаја је јасно уочљива због отпора ОМ рекристализацији.

Трећа област зоне термо-механичког утицаја је рукавац изнад грумена. Овај рукавац се формира када ваљак (горњи део алата) у току ротације пређе преко грумена шава.

Прелаз од грумена ка ОМ је веома оштар, посебно на истуреној страни, а постепен на повученој страни шава. Област на истуреној страни шава је веома узана и мање деформисана (област изван грумена). Међутим, већина других материјала се понаша различито од алуминијума, јер без појаве рекристализације, ова би зона била изложена великим деформацијама на високим температурама. Код других материјала не постоји јасно изражена рекристализациона зона – грумен, већ ће целокупна зона термо-механичког утицаја бити постепено рекристализована.

Ово је типично за материјале који имају термички изражен фазни преображај, који доводи до рекристализације без напона. На пример, титан, бакар, аустенитни нерђајући челик. Код феритног челика и легуре Ti (Ti -6Al-4V), често је граница између зоне утицаја топлоте и зоне термо-механичког утицаја тешко уочљива.

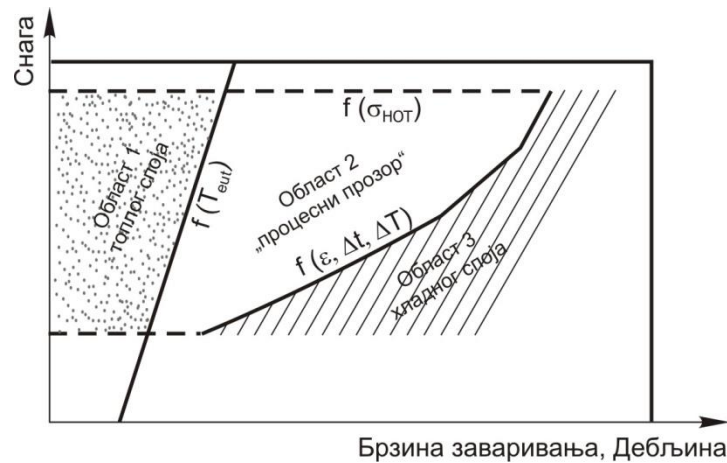
4. Грумен

Рекристалисана област у зони термо-механичког утицаја (TMAZ-a), посебно код легура алуминијума има уобичајени назив грумен. Грумен се може посматрати одвојено, иако је саставни део TMAZ-a. 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 [1]. Ова област се формира непосредно испод ваљка алата. Ширина грумена је незнатно већа од пречника трна алата. У литератури често стоји да је грумен суб-зона TMAZ-a.

Главни параметар FSW поступка је притисак алата, јер од тога зависи количина топлоте ослобођене услед трења; та топлота преводи материјал у пластично стање.

Напон течења материјала опада са температуром; код легура оптималне вредности леже близу еутектичке температуре, где се очекује висока деформабилност без локалног топљења. Када се испуни овај услов постиже се минимално време контакта између алата и материјала при формирању шава.

Уколико притисак остварен преко алата генерише више топлоте од потребне, тада ће се материјал или делови материјала испод алата топити, што доводи до лоших механичких карактеристика шава (област 1 – слика 3.12). У супротном, када се не ослободи довољно топлоте за одговарајући материјал и дебљину (област 3 – слика 3.12), добија се крт шав. Управо између ове две области пада "процесни прозор", односно област "здравих" шавова.



Слика 3.12 FSW "процесни прозор" који означава зоне топлих спојева, хладних спојева и квалитетних шавова добијених комбинацијом брзине заваривања за одређену легуру и дебљину

FSW се заснива на великом степену пластичне деформације у близини еутектичке температуре (TMAZ). Степен пластичне деформације и температура утичу на јачину (слика 3.12). С друге стране, ротација алата проузрокује већи степен деформације за оне зоне материјала које су удаљеније од осе ротације; што је већа угаона брзина алата већа је и брзина деформисања у зони термо-механичког утицаја. Утицај брзине и температуре проучава се посебно јер је екстремно тешко пројектовати експеримент којим би се симулирао "одговор" материјала на ове услове.

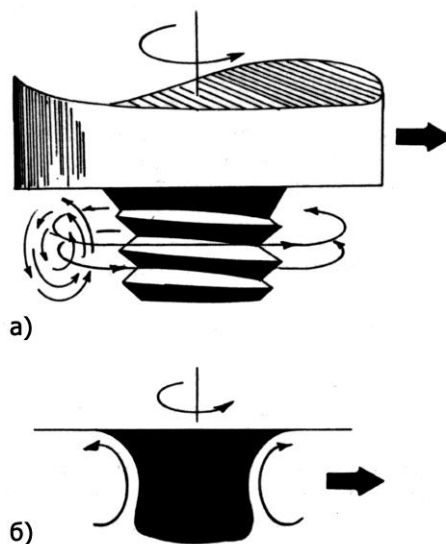
3.5. ТЕЧЕЊЕ МАТЕРИЈАЛА У ПРОЦЕСУ FSW

FSW процес се карактерише комплексним тродимензионалним течењем материјала (транслација, ротација и вертикално течење).

Истраживањем самог процеса утврђено је још да се течење материјала може описати са две компоненте: примарне и секундарне.

ПРИМАРНО течење односи се на течење материјала око трна алата. Ово течење је аналогно ламинарном струјању течности око ротирајућег цилиндра.

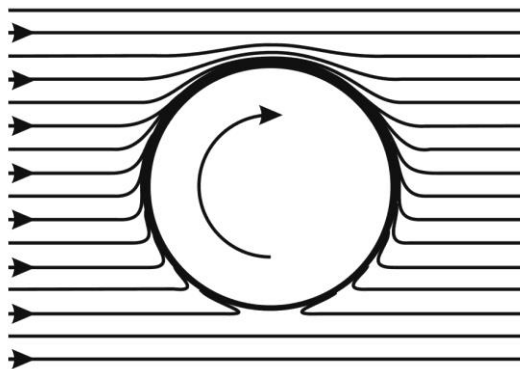
Облик трна алата одређује ток струјања, како у подужном тако и у вертикалном правцу (слика 3.13 б). Због ротације трна алата одређена количина материјала се око трна преноси од повучене стране према истуреној страни шавова. На слици 3.14 приказана је упрошћена шема дводимензионалног течења материјала око трна алата у процесу заваривања трећом помоћу алата.



Слика 3.13 Упрости́ена шема течења материјала око трна алата при FSW:

а) турбулентно струјање, б) ламинарно

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 3.14 Приказ дводимензионалног течења материјала око трна алата у току процеса заваривања трећем помоћу алата

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 шави. 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 плоча, 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.

Због јако сложеност 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.

3.6. 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 прелина. 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 3.15).



Слика 3.15 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 шавова.
- Може се користити за извођење линеарних, нелинеарних, обимних и тродимензионалних заварених спојева.
- Добијени заварени спој не садржи нечистоће.
- Једнака ширина метала шавова по дужини.
- Генерално добар изглед шавова 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 дефеката. 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 шавова 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 шавова.

Генерално, недостаци поступка FSW су:

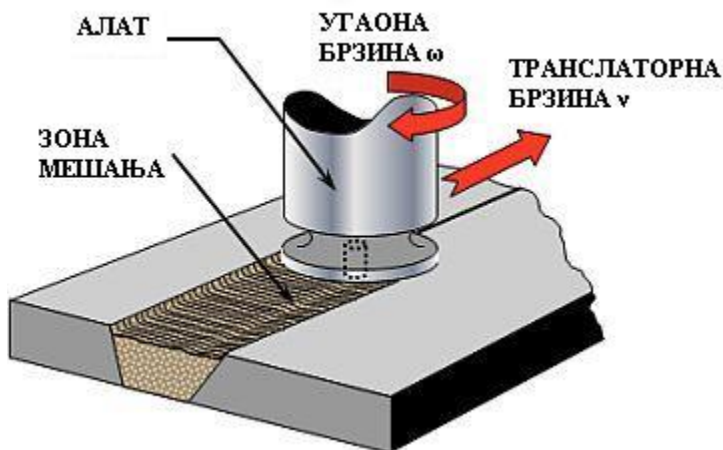
- Постојање рупе на крају процеса заваривања, када се алат извуче из радног комада.
- Потребна велика вертикална (аксијална) сила.
- Потребно је добро стегнути плоче које се заварују, да током процеса не би дошло до њиховог раздвајања.
- Мање флексибилан од мануелних лучних процеса (проблеми са варијацијама 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 МЕТАЛУРШКИ ПАРАМЕТРИ ПРОЦЕСА FSW

Физичка суштина генерисања топлоте и формирања споја код процеса FSW је доста слична као код обичног заваривања трењем, па су и основни параметри процеса слични, а то су: број обртаја алата (угаона брзина окретања алата), транслаторна брзина алата (брзина заваривања) и аксијална сила. Они највише зависе од термофизичких својстава материјала и дебљине лима, а њихове оптималне вредности се, за сада, одређују искључиво експериментално. Као параметри процеса, одређују се и одговарајући геометријски параметри појединих елемената алата (пречник трна алата, пречник чела алата и угао нагиба трна алата). Поред ових параметара значајни су и дубина продирања чела алата у материјал, као и угао нагиба осе алата.

4.1 БРОЈ ОБРТАЈА И ТРАНСЛАТОРНА БРЗИНА АЛАТА

Код поступка FSW постоје две брзине кретања алата које треба посматрати. Угаона брзина којом се окреће алат и транслаторна брзина која одређује брзину заваривања посматраног материјала (слика 4.1). ова два параметра имају велики значај код поступка FSW. Они морају бити правилно изабрани да би се обезбедило успешно и ефикасно одвијање процеса FSW.



Слика 4.1 Приказ брзине v и угаоне брзине ω

Однос између брзине заваривања и топлотне енергије у току процеса заваривања је доста сложен, али генерално се може рећи, да ће повећање или смањење брзине резултирати хладнијим или топлијим шавовима. У циљу да се добије што бољи шав, потребно је да материјал око алата буде довољно загрејан да омогући пластични проток материјала и смањи силу која делује на алат. Ако алат није довољно загрејан, онда је

могуће да се јављају одређене шупљине или друге грешке које могу бити присутне у зони мешања, а у екстремним случајевима може доћи и до лома алата. Претеран унос топлоте може бити штетан за коначан изглед шава, јер може доћи до топљења материјала. Број обртаја током одвијања процеса FSW је константан и креће се у широким границама од 100 *o/min* до 2000 *o/min*, док је за неке материјале и већи. У табели 4.1 дат је број обртаја и транслаторна брзина заваривања за неке легуре.

Транслаторна брзина је истовремено и брзина заваривања и она зависи од механичких својстава и дебљине материјала лимова.

Табела 4.1. Број обртаја и транслаторна брзина заваривања [8]

Легура	n (<i>o/min</i>)	V (<i>cm/s</i>)
6061 Al	225	0.466
5083 Al	180	0.191
7075 Al	250	0.127
6082 Al	230	0.466
1010 Челик	280	0.127
Ti-6Al-4 V	300	0.169

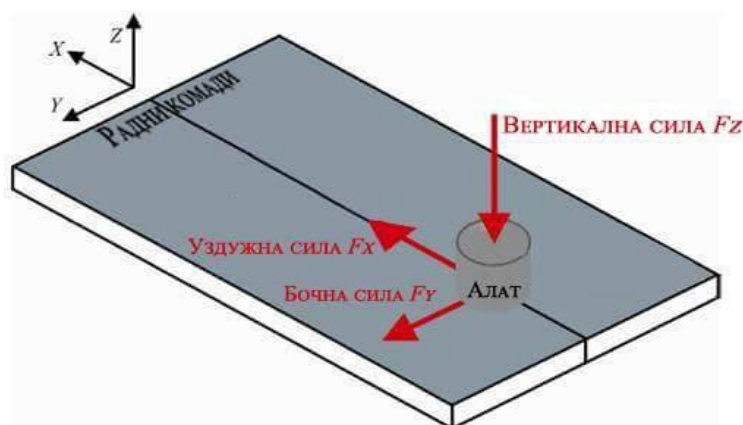
4.2 СИЛЕ ЗАВАРИВАЊА

Силе које делују на алат током процеса FSW су: вертикална или аксијална, уздужна или лонгитудинална и бочна сила (слика 4.2).

Вертикална сила - F_z је потребна да одржи позицију алата и материјал испод површине. Вертикална (аксијална) сила код процеса FSW је у ствари сила којом алат делује на материјал. Она је највећа у почетном периоду продирања трна кроз материјал, а затим се смањује, док чело алата не дохвати горњу површину материјала који се заварује. Тада поново почиње да расте док се не достигне одређена температура кад почиње да опада и задржава свој константну вредност све до завршетка процеса FSW. Међутим, за разлику од ротационог заваривања трењем, величина аксијалне силе код поступка FSW много је мања, због начина генерисања топлоте, она не зависи од површине завариваних делова. Она зависи од својстава материјала завариваних делова и геометријских карактеристика трна и чела алата и може да се креће до 200 *kN*. Како је компонента вертикалне силе доминантна код процеса FSW, она се често назива и сила заваривања - F_z .

Уздужна - F_x или лонгитудинална сила делује паралелно смеру кретања алата, а позитиван смер се дефинише са смером кретања алата. Будући да се ова сила јавља као последица отпора материјала кретању алата, може се очекивати да ће ова сила ако се смањи температура материјала око алата бити већа.

Бочна сила – F_y може да делује нормално на правац кретања алата и позитиван смер се дефинише ка истосмерној страни шави.



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

У циљу спречавања лома алата и смањивања претераног хабања алата, процес FSW треба да буде такав да сила која делује на алат, буде, што је могуће нижа и да се нагле промене избегну. Како би се нашла најбоља комбинација параметара заваривања поступком FSW, мора се постићи компромис, јер услови који фаворизују ниске силе (нпр. висок унос топлоте, мала брзина заваривања) могу бити непожељни са становишта продуктивности и квалитета шави.

4.3 ГЕНЕРИСАЊЕ И ТРАНСФЕР ТОПЛОТЕ

Физичка суштина процеса генерисања топлоте се заснива на трансформацији механичке у топлотну енергију на контакту тела која се релативно крећу а оптерећена су неком силом и она је иста код свих облика њене примене. Топлота добијена као резултат трења, ослобађа се на два карактеристична начина: директно или 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.

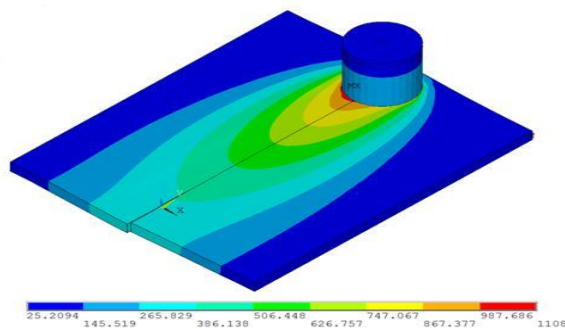
Такав начин генерисања топлоте је карактеристичан за највећи број варијанти фрикционог заваривања. При томе је важно да се генерише одговарајућа количина топлоте док њена расподела између тела у контакту нема значаја. То значи да нема потребе за испуњењем било каквих захтева у погледу геометрије контакта тела или својстава њихових материјала.

Индиректан или посредан начин генерисања, постоји у свим видовима термофрикционе обраде и код две варијанте заваривања трењем. Дејство топлоте овде има задатак да изразито промени својства материјала само једног од тела фрикционог пара. Својства и геометријске карактеристике другог тела (алата) у контакту треба да остану непромењене.

"Друго тело" код индиректног начина генерисања у ствари представља специјални алат који истовремено служи да индукује топлоту и да реализује предвиђену технолошку операцију. Пошто има специфичну улогу, при чему топлота такође мора да се генерише у одређеној количини, следи закључак да материјал алата на повишеној температури мора да има стабилна механичка и термофизичка својства и минимално хабање. Истовремено, термофизичка својства и геометријске карактеристике његове контактне (радне) површине треба да обезбеде расподелу топлотног флукса у корист материјала чија се својства мењају.

У овом случају, дакле, механичка и термофизичка својства материјала "другог тела" и облик његове радне површине имају важну улогу и морају да испуне одговарајуће триболошке услове. Поред тога, у процесу генерисања топлоте а самим тим и у целом технолошком циклусу, "друго тело" може да учествује више пута. То су две карактеристике индиректног по којима се оно битно разликује од директног генерисања топлоте трењем.

Независно од начина генерисања, процес има исту физичку суштину и он је увек саморегулишући. То је његово важно својство које се састоји у томе што се материјал загрева унутрашњим топлотним извором при чему се температура контактних слојева аутоматски одржава на око 100 до 200 K испод тачке топљења оног материјала чија је температура топљења нижа у споју. На слици 4.3 је приказано генерисање и трансфер топлоте током поступка FSW.



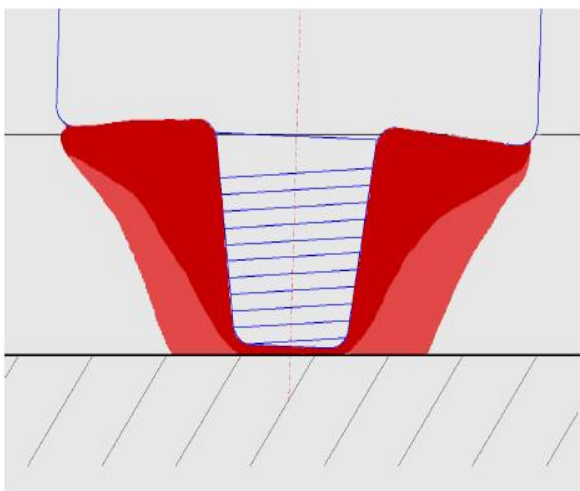
Слика 4.3 Простирање топлоте током поступка FSW [9]

Одатле следе заједничке карактеристике свих облика коришћења топлотних ефеката трења, а то су: локализовано загревање мале запремине материјала, мали утрошак енергије и високе енергетске карактеристике, једноставан рад и могућност потпуне аутоматизације. Услед термодеоформационог процеса који егзистира на месту генерисања топлоте материјал постаје ситнозрнаст и хомоген, у њему нема макро и микро дефеката, он има висока и стабилна својства, унутрашњи напони су занемарљиво мали, нема штетних појава по човека и околину, итд.

Основни технолошки параметри у оба случаја су исти, а то су релативна брзина, оптерећење и време. Они у највећој мери зависе од својстава материјала чије карактеристике, ради постизања циља, деловањем топлоте треба да се промене.

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. 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 4.4 Продирање чела алата у материјал и угао нагиба осе алата [9]



Слика 4.5 Систем за контролу дубине продирања чела алата у материјал који се састоји од два помоћна ваљка [9]

4.5 МЕТАЛУРШКЕ ТРАНСФОРМАЦИЈЕ ТОКОМ ПРОЦЕСА FSW У ЗАВИСНОСТИ ОД ПАРАМЕТАРА ЗАВАРИВАЊА

Имајући у виду да металуршке промене с практичне тачке гледишта диктирају својства шави, то су исте од велике важности за сам процес FSW.

Током процеса FSW трансформације које се одвијају у термички неојачаним легурама су једноставније од оних које се одвијају у термички ојачаним легурама.

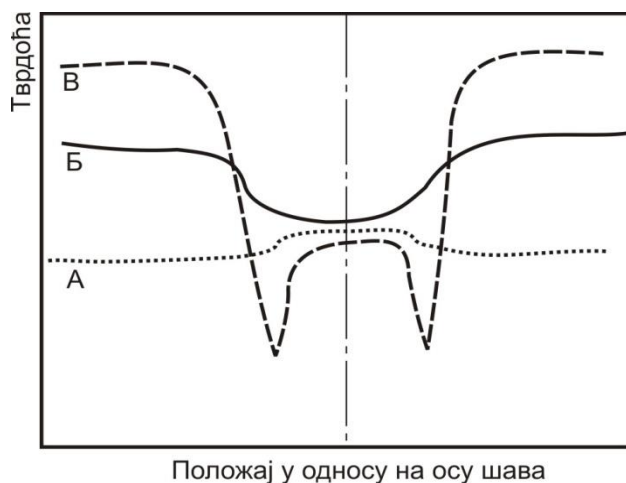
Легуре Al–Mg су добри примери материјала за заваривање поступком FSW, термички неојачаних материјала.

Неке комерцијалне легуре алуминијума високе јачине, нарочито се тешко заварују техником конвенционалног топљења (MIG или TIG) као и отпорским заваривањем, које подразумева и пажљиву припрему површина. Заваривање топљењем ојачаних легура, проузрокује знатан губитак механичких својстава. Исто тако, многе јаче отврднуте легуре (AlZn5.6) не препоручују се за заваривање топљењем.

Код једнофазних легура, тврдоћа у области шави је скоро идентична тврдоћи основног материјала или незнатно већа. Незнатно повећање тврдоће у зони грумена настаје због формирањаfino-зрнасте структуре, чак код неких деформацијом ојачаних легура тврдоћа шави је мања у односу на основни материјал. FSW прати и процес отпуштања, што смањује број дислокација и тврдоћу у области шави.

На слици 4.6 приказани су типични профили расподеле тврдоће као резултат дејства FSW процеса за различите типове легура.

Густина дислокација у грумену може бити потпуно променљива и зависи од густине суседних гранула. У зони утицаја топлоте, уз грумен, присутан је груб (крупан) талог. На већој удаљености од грумена, крупноћа зрна се смањује, те се поново указује микроструктура основног материјала.



Слика 4.6 Профили расподеле тврдоће у пресеку шави добијеног FSW поступком за одговарајуће легуре алуминијума [1]

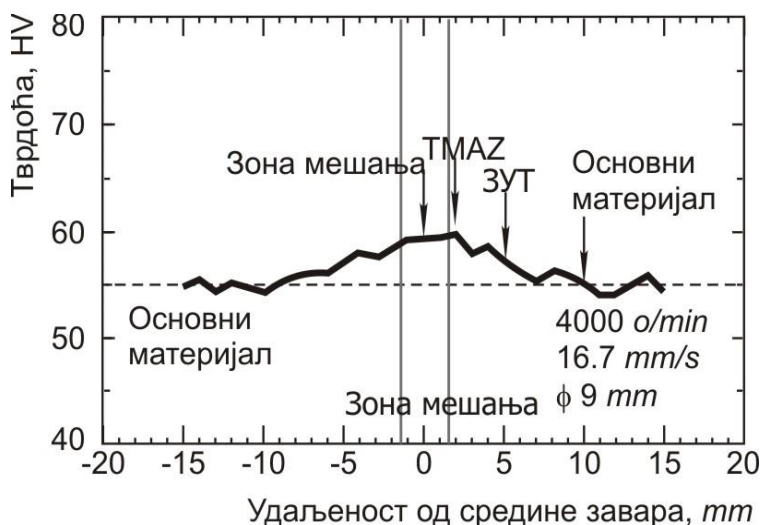
Код термички ојачаних легура карактеристичан је ток промене тврдоће у попречном пресеку шави (слика 4.6— крива В). Расподела тврдоће је у облику слова "W". Посматрано од осе шави према основном материјалу, тврдоћа има најмању вредност на спољашњој области грумена. Област минималне тврдоће одговара остарелом материјалу изван грумена шави. Ниво тврдоће у грумену је између тврдоће остарелог материјала и тврдоће основног материјала.

Дошло се до сазнања да се тврдоћа грумена може приближити код неких легура вредности тврдоће основног материјала уз одговарајући третман после заваривања. Тврдоћа у области зоне старења не може бити враћена до нивоа тврдоће основног материјала. Великим брзинама заваривања повећава се тврдоћа грумена.

На слици 4.7 приказан је дијаграм расподеле тврдоће у FSW завареном споју. Елементи који се спајају израђени су од лима дебљине 2 mm од легуре алуминијума AlMg2.5Cr0.2 следећег хемијског састава (0.1Si; 0.24 Fe; 0.02 Cu; 0.03 Mn; 2.46 Mg; 0.15 Cr; 0.01 Zr; 0.01 Ti). За ово заваривање примењени су следећи параметри:

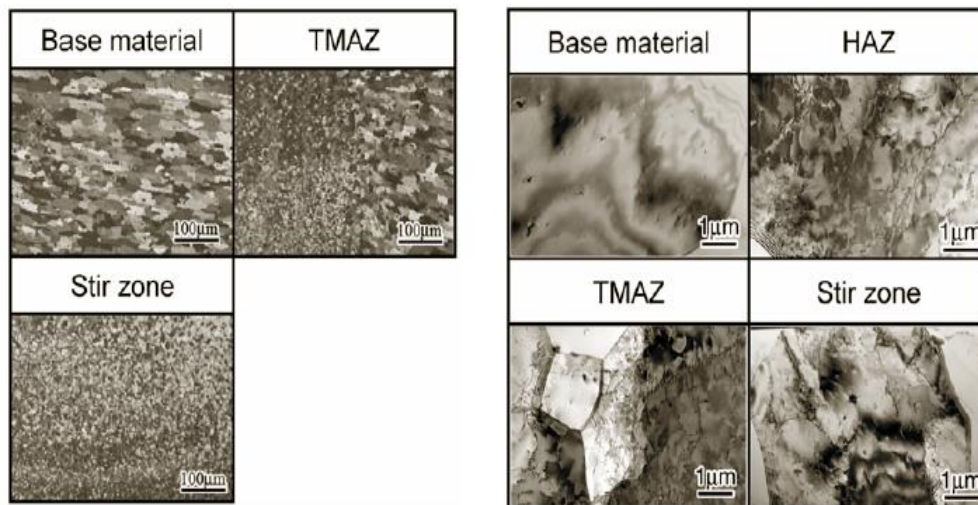
- брзина заваривања 16.7 mm/s,
- брзина ротације алата 4000 o/min,
- пречник ваљка алата 9 mm; пречник трна алата 3 mm [4].

Дијаграм показује да тврдоћа основног материјала износи 55HV, а према шаву се постепено повећава. У зони утицаја топлоте, зони термо-механичког утицаја и зони мешања-грумен је мало веће тврдоће од тврдоће основног материјала.



Слика 4.7 Расподела тврдоће материјала у завареном споју за легуру алуминијума AlMg2.5Cr0.2, заварену поступком заваривања трењем помоћу алата [4]

Основни материјал има малу густину дислокација и прилично уједначена зрна, просечне величине око $17 \mu\text{m}$. У зони мешања зрна су ситнија, просечне величине $8 \mu\text{m}$ (слика 4.8).



Слика 4.8 Микроструктура завареног споја од алуминијумске легуре $\text{AlMg}_{2.5}\text{Cr}_{0.2}$, заварене FSW поступком по одговарајућим зонама:

- зона мешања-грумен (Stir zone),
- зона утицаја топлоте (HAZ),
- зона термо-механичког утицаја (TMAZ) и
- основни материјал (Base material) [4]

Већа тврдоћа у зони мешања - грумену је одлика ситнозрнасте структуре. У зони термо-механичког утицаја зрна су деформисана и већа је густина дислокација, због чега ова зона има већу тврдоћу од основног материјала.

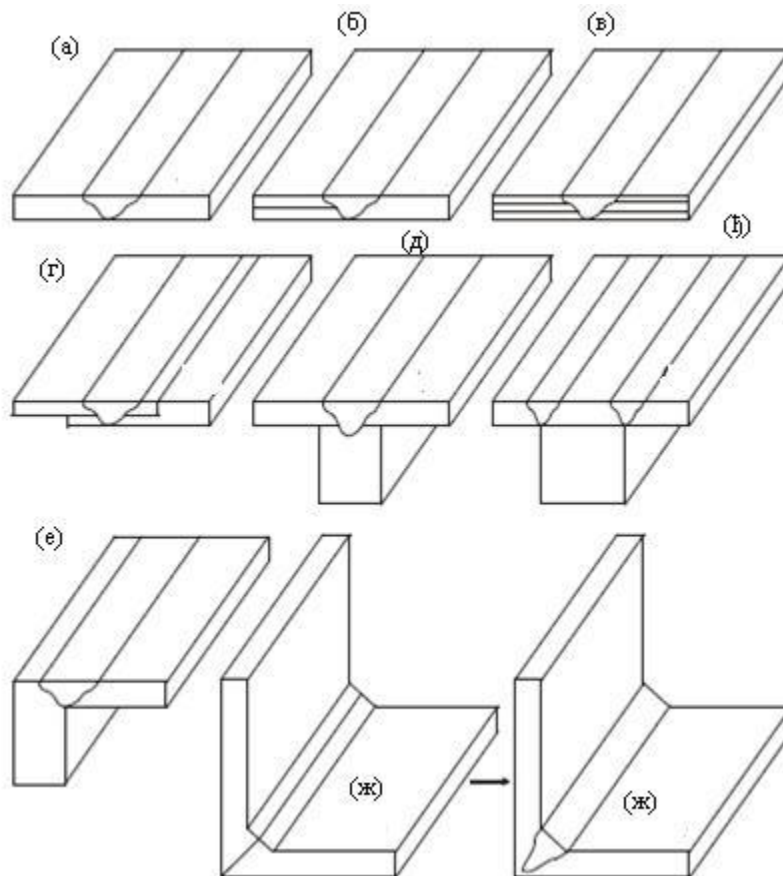
Са порастом брзине ротације алата, а при непромењеној брзини заваривања тврдоћа у зони мешања опада.

Треба рећи да величина зрна са порастом брзине ротације алата расте, за разлику од промене брзине заваривања где је дешавање супротно.

Процес рекристализације који доводи до повећања зрна одвија се на температури око $0.5T_f$ - температуре топљења. Тај процес је интензивнији што је већа количина доведене топлоте ослобођене услед трења, а то је у случају веће брзине ротације алата, мање брзине заваривања. Са повећањем зрна смањује се тврдоћа материјала.

4.6 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 4.9.

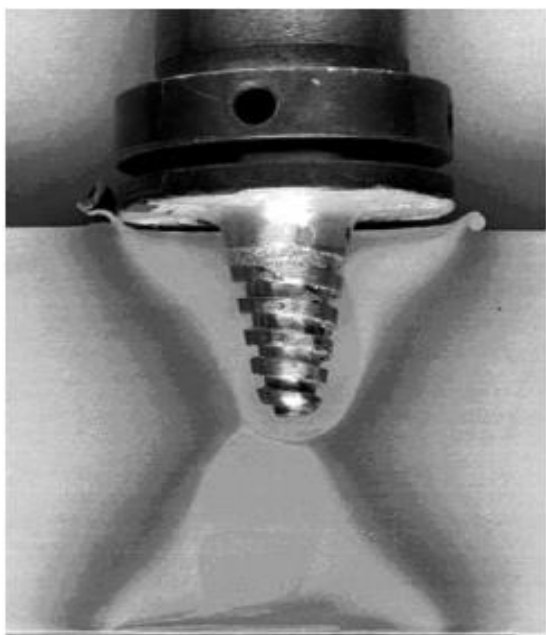


Слика 4.9 Врсте заварених спојева добијених поступком FSW

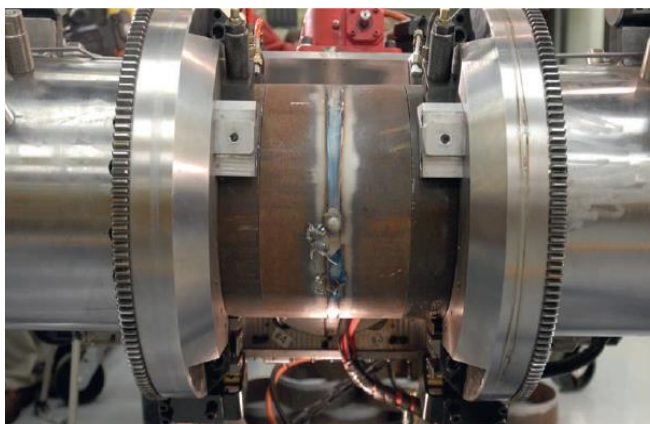
(а) сучеоно спој; (б) комбиновани сучеоно и преклопни спој; (в) вишеструки преклопни спој; (г) упуштени преклопни спој; (д) Т спој два елемента; (ђ) Т спој три елемента; (е) угаони-сучеоно спој; (ж) угаони спој

Најчешће се сучеоно спајају радни комади дебљине од 1.2 mm до 50 mm . Заваривање може да се изведе једнострано или двострано (слика 4.10). 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 4.11) различите конфигурације у различитим положајима, укључујући и тзв. над главом. У том, погледу, практично нема великих ограничења. Поред тога, развој тачкастог заваривања трећем 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 4.10 Приказ двострано завареног споја [11]

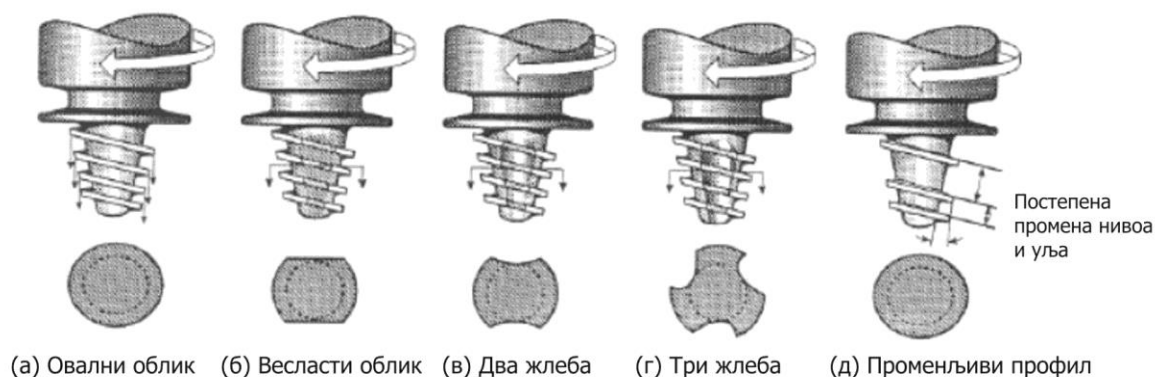


Слика 4.11 Кружно заварена челична цев [10]

5. АЛАТИ И УРЕЂАЈИ ЗА FSW ПРОЦЕС

5.1 ОСНОВНИ ОБЛИЦИ И ГЕОМЕТРИЈА АЛАТА ЗА FSW

У трећем поглављу било је речи о основној конструкцији алата за FSW. Састоји се из два концентрична елемента – носећег дела (ваљка) и радног дела (трна) (слика 3.1). Поред цилиндричног облика трна постоје и друге варијанте профилисаног облика трна (слика 5.1). Овакви алати се примењују за заваривање плоча већих димензија: до 50 mm за једностран шав, односно до 75 mm дебљине за двостран шав.



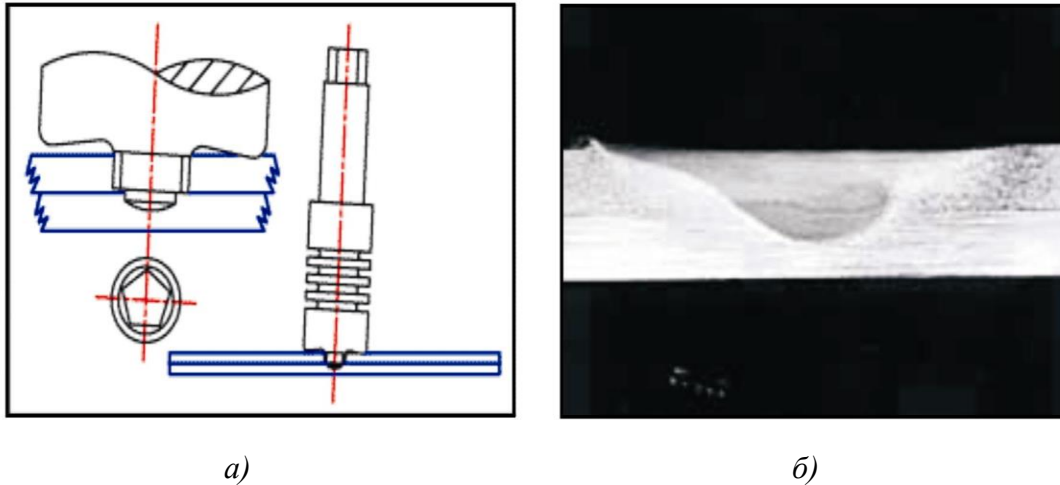
Слика 5.1 Облици профилисаног трна алата за FSW [11]

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 5.2). Трн овог алата је конструисан тако да смањи масу алата и омогући боље мешање материјала.



Слика 5.2 Мулти спирални алат за FSW [1]

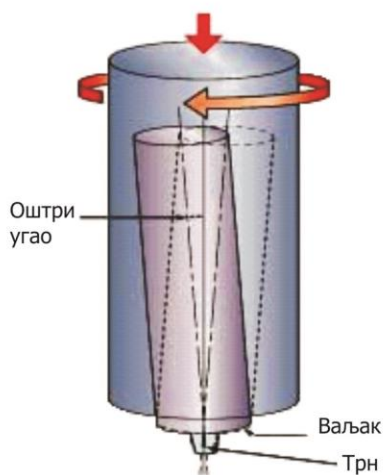
За преклопно заваривање лимова од алуминијумских легура развијен је вишестепени алат, чији је трн петоугаоног профила (слика 5.3) са смањеним пречником, тако да се истим постиже добро мешање материјала и не долази до смањења дебљине споја захваљујући удубљеном профилу ваљка алата.



Слика 5.3 Вишестепени алат за FSW а) шема, б) профил шави добијеног применом овог алата при заваривању легуре алуминијума [1]

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 5.4. 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 5.4 Шема асиметричног алата за FSW [1]

Постојаност алата зависи од температуре топљења материјала који се заварује. Материјали чија је тачка топљења релативно ниска лако се и брзо заварују и алат је постојан, док се материјали са високом тачком топљења спорије заварују, а због великих сила трења и већег загревања пре долази до оштећења алата. У том смислу изведена су решења са заменљивим трном, јер се трн брже хаба од тела алата. Када се трн похаба замењује се новим чиме се одржава полазна геометрија неопходна за одвијање процеса, на пример прецизног продирања трна у материјал итд. Слика 5.5 показује алат код кога је веза тела алата (ваљка) и трна раздвојива. Такође се може подешавати испуст трна.



Слика 5.5 Алат за FSW са заменљивим трном [1]

При заваривању материјала са високом температуром топљења, као што је угљенични челик, нерђајући челик, легуре на бази никла, титана итд., због израженог хабања алата у току заваривања, примењују се алати на бази волфрама или од поликристалног кубног борнитрида (PCBN – Polycrystalline Cubic Boron Nitride). PCBN алат се израђује од борнитрида у прашкастом облику изложеног екстремно високом притиску (80 kbar) и

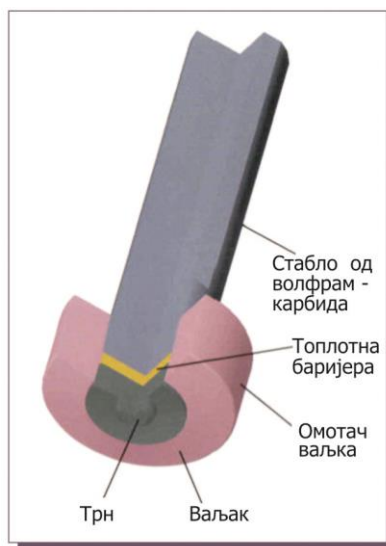
температури 1400°C . Као резултат добија се поликристална кубна борнитрид структура, са кристалима пречника мањег од $1 \div 50 \mu\text{m}$.

Неке светске компаније израђују своје алате за FSW, на слици 5.6 дат је алат који "NASA" прави за своје потребе.



Слика 5.6 Алат за FSW [8]

Слика 5.7 приказује пресек алата од поликристалног кубног борнитрида. Овај алат има уметак од PCBN, стабло од волфрам-карбида, ваљак веома високе чврстоће и слој који служи као топлотни изолатор.



Слика 5.7 Алат за FSW од PCBN [1]

Стабло има улогу јаког ослонца уметка. Ваљак спречава прекомерно одвођење топлоте преко стабла на држач алата. Новије верзије алата принудно се хладе у току заваривања, а доводи се и заштитни гас у зону заваривања у циљу добијања шава изузетно високог квалитета. Уметак од PCBN поседује велику тврдоћу, топлотну проводљивост, отпорност на хабање, постојаност на високим температурама, као и ударну жилавост, неопходну за квалитетно заваривање трењем помоћу алата. Још је важно да материјал алата буде отпоран на замор, да је хемијски постојан и да има друге карактеристике које доприносе квалитету споја.

Алати за заваривање алуминијума и његових легура као и других материјала ниже температуре топљења израђују се од алатног челика (нпр. H13.), синтерованог силицијумнитрида, специјалног материјала добијеног комбинацијом метала и керамике постојане на високим температурама, од волфрам-калцијум карбоната са 10% Co и др. У табели 5.1 дате су неке карактеристике ових материјала на собној температури.

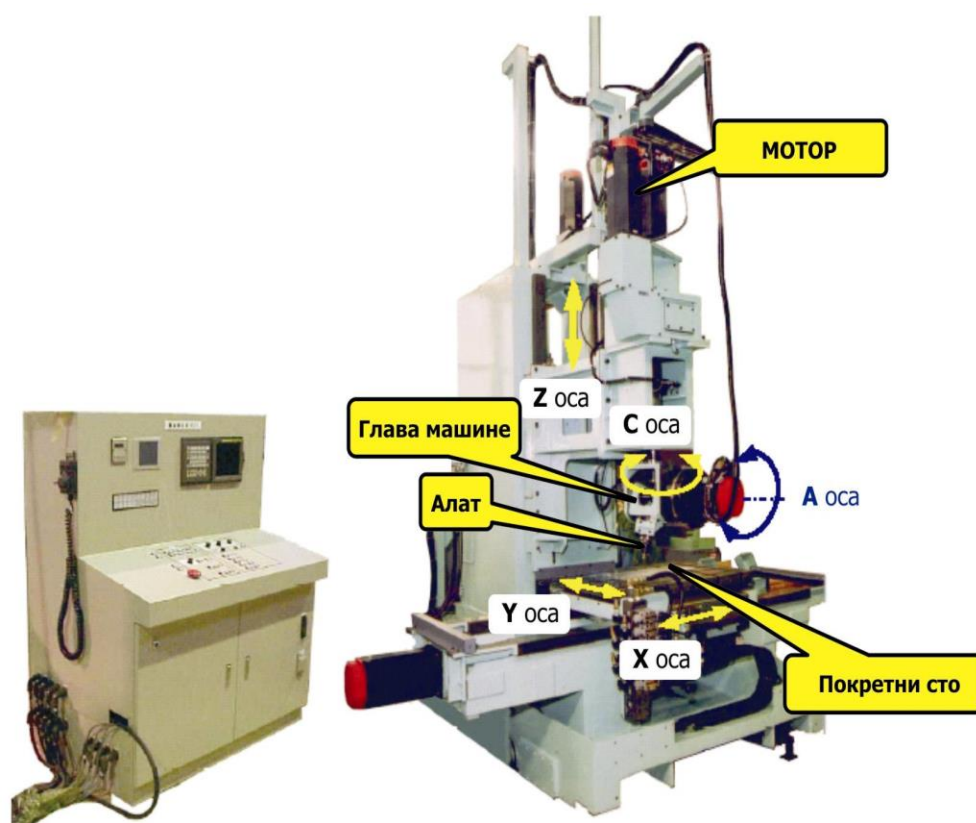
Табела 5.1 Карактеристике материјала алата за FSW [1]

МАТЕРИЈАЛ ЗА FSW	Термичка проводност, W/mK	Затезна чврстоћа, MPa
H13 Челик	29	2000
WC-10% Co	100	2100
Si_3N_4	35	800

У току FSW процеса брзина ротације алата и транслаторна брзина алата (брзина заваривања) мора бити контролисана. Такође, вертикална позиција алата (z-оса) преко које се преноси снага мора бити контролисана. Контрола позиције алата се прати на страни лица шава (типично за преклопни спој или делимичну пенетрацију шава) или на страни корена (код извођења пуне пенетрације сучеоног шава). Вредности силе у правцу z-осе, брзина ротације алата и брзина заваривања не могу бити биране независно једна од друге. Фактори који морају бити разматрани при избору оптималних параметара процеса FSW треба да обухвате снагу и могућности машине и расположиве опреме.

5.1 МАШИНЕ ЗА FSW

Прва машина за FSW поступак произведена је 1996. године, под називом Super Stir. Super Stir машина је једноставна, велике снаге и компјутерски управљана. У току последњих година неколико компанија почело је производњу опреме дизајниране специјално за FSW. На слици 5.8 приказана је машина за заваривање трењем помоћу алата. У табели 5.2 дате су основне техничке карактеристике ове машине.



Слика 5.8 Машина за заваривање трењем помоћу алата [4]

Табела 5.2 Основни технички подаци машине за FSW (слика 5.8)

ТЕХНИЧКА КАРАКТЕРИСТИКА	
МАХ брзина ротације алата	3000, o/min
МАХ брзина померања	4000, mm/min
Обртни момент мотора	47.7Nm при 1500, o/min
МАХ габарити радног комада	500 x 500 x 50, mm
Померања у правцима оса:	
x	1200, mm
y	600, mm
z	500, mm
a	190°
c	360°

Машине за заваривање поступком FSW, највише су развијене у скандинавским земљама и у Јапану. Највећи број патената из области конструкционих изведби машина има у Јапану. Машина за дуге шавове развијена од “ESAB” (Шведска) (слика 5.9), користи се у “Marine Aluunim Werft” (Норвешка), за заваривање бродских панела и за железничке вагоне. Ова машина се користи и за: тешке профиле, Н-носаче, Т-носаче и платформе; израђују се панели дужине 6 m x 16 m и висине до 400 mm . Машина је у целини аутоматизована. “ESAB” производи и машине мањег радног простора, од 1 m до 2 m (слика 5.10). последњих година у TWI институту направљен је прототип машине за заваривање са радним простором $3,3\text{ m}$ x $4,0\text{ m}$ x $1,5\text{ m}$ и брзином заваривања од $1,7\text{ m/min}$.



Слика 5.9 Машина за заваривање поступком FSW, за дуге шавове произведена у „ESAB”-у [10]



Слика 5.10 Мања машина за заваривање поступком FSW произведена у „ESAB”-у [10]

Поступак FSW може да се аутоматизује, тако што се систем за FSW интегрише на стандардном индустријском роботу, као што је приказано на слици 5.11.



Слика 5.11 FSW интегрисан на роботу [11]

6. МАТЕРИЈАЛИ ЗАВАРЉИВИ FSW ПОСТУПКОМ

Заваривање трењем помоћу алата се може применити за спајање како истих (слика 6.1) тако и различитих материјала (слика 6.2), уз услов да материјал алата може радити на температурама ковања материјала који се спајају.



Слика 6.1 Спајање истих материјала FSW поступком – месинг [10]



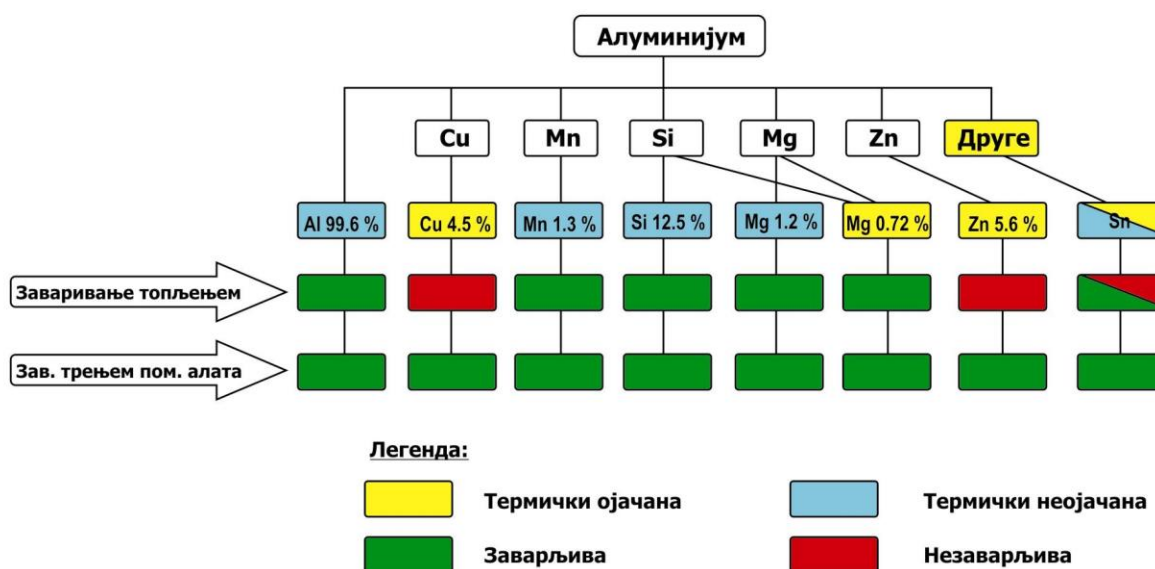
Слика 6.2 Спајање различитих материјала FSW поступком – бакар и алуминијум [10]

Као што је већ речено алуминијумске легуре се квалитетно и релативно лако заварују овим поступком. Слика 6.3 даје упоредни приказ заварљивости алуминијумских легура поступком заваривања топљењем и FSW поступка односно заваривања трењем помоћу алата.

Са слике 6.3 се може закључити да се FSW поступком могу заварити готово све легуре алуминијума и то до дебљине 50 mm формирањем једног завара, односно до 75 mm дебљине када се формира двострани шав.

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).



Слика 6.3 Упоредни приказ заварљивости алуминијумских легура FSW поступком и заваривања топљењем [4]

Легуре алуминијума се поред истородних, веома добро заварују са другим несродним материјалима; на пример са нерђајућим челицима. Слика 6.4 даје пресек споја легуре алуминијума (Al 6013-T4) и нерђајућег челика (X5CrNi18-10).

На слици 6.4 се јасно уочава површина пресека грумена и одговарајуће означене зоне - HAZ и TMAZ.

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 6.4 Макроскопски изглед пресека FSW споја легуре Al 6013-T4 и нерђајућег челика X5CrNi18-10 [6]

Магнезијум – Широко је распрострањено мишљење да се магнезијум тешко заварује конвенционалним поступцима заваривања. Међутим када је на примеру алуминијума показано да се FSW поступком добијају спојеви високог квалитета, постојала је велика потражња да се процес прилагоди за заваривање магнезијума. Истраживањем је утврђено да се легуре магнезијума могу са лакоћом заваривати поступком FSW било у кованој или у ливеној форми.

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.

Титан – За заваривање легура титана углавном се користе конвенционални поступци, али се том приликом могу јавити дисторзија и вар лошег квалитета. Поред тога легуре као што су Ti-17 и Ti-6246 тешко се заварују топљењем. Развојем FSW-а добија се поступак за производњу висококвалитетних заварених спојева.

Прва истраживања везана за заваривање титана обављена су на TWI институту 1995 године. Даљим развојем и истраживањем дошло се до следећих закључака:

- Поступком FSW се успешно заварују легуре Ti-6Al-4V и Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn, где се добија вар доброг квалитета [12].
- Алат за заваривање титана овим поступком је веома скуп, па заваривање титана FSW поступком нема комерцијалну примену.

7. 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.

7.1 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 7.1 Спајање монтажних, алуминијумских плоча поступком FSW, у производњи бродова [1]

С обзиром 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 7.1). 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 7.2 приказан је катамаран и путнички брод за чију израду је примењен FSW поступак. Код катамарана димензије профилисано ојачаних плоча износе 13m x 16m.



Слика 7.2 Катамаран и путнички брод који су израђени применом заваривања трењем помоћу алата [1]

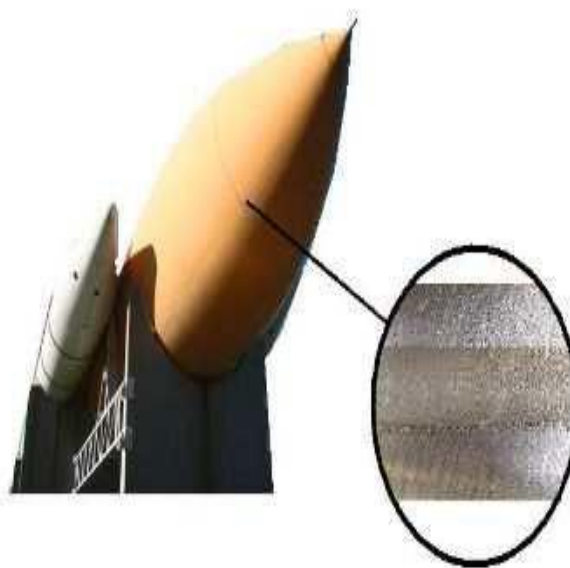
7.2 АВИО И КОСМИЧКА ИНДУСТРИЈА

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.

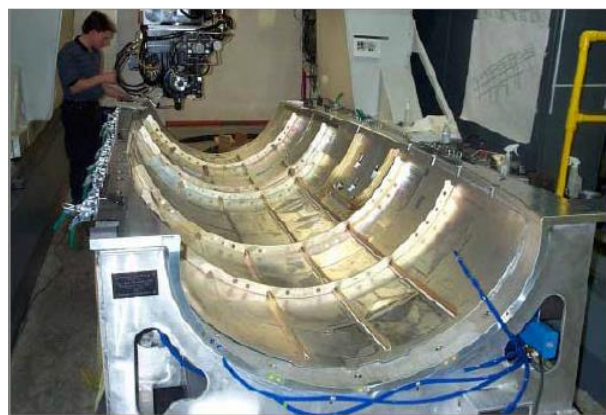
У космичкој индустрији код Space Shuttle-а спојеви спољашњих резервоара за гориво од недавно се раде искључиво поступком FSW (слика 7.3). Ово омогућује да се ови резервоари раде од специјалних легура Al-Li 2195 чиме се њихова маса смањила за више од три тоне.

У авио индустрији преко 40 000 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 7.4 приказани су панели који се користе за подове товарног дела авиона, као и заваривање странице авиона (слика 7.5), а слика 7.6 приказује употребу FSW поступка при изради резервоара за беспилотне летелице.



Слика 7.3 Резервоар ракете заварен коришћењем поступка FSW [8]



Слика 7.4 Панели за подове товарног дела авиона заварени FSW поступком [10]



Слика 7.5 Странице авиона заварене FSW поступком [10]



Слика 7.6 Употреба FSW при изради резервоара за беспилотне летелице [10]

7.3 АУТОМОБИЛСКА ИНДУСТРИЈА

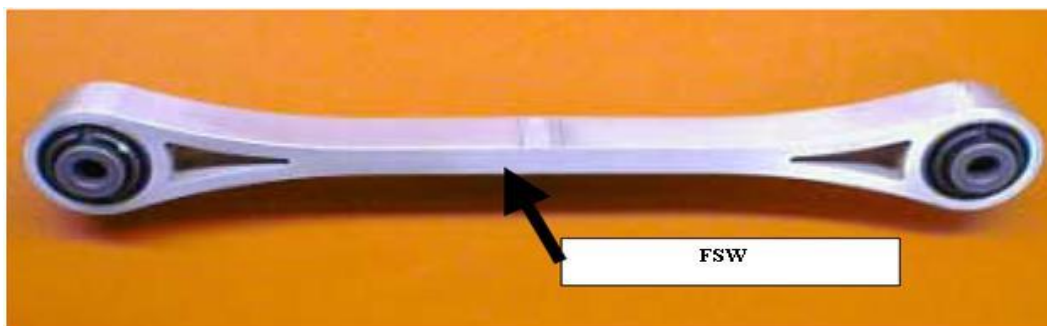
Заваривање поступком FSW, користи се и у неколико водећих светских аутомобилских компанија. Циљ је да се произведу возила мање тежине, чиме се повећава њихова носивост и смањује потрошња горива, па се смањује и загађење животне средине. Овај поступак заваривања се користи при изради: мотора и шасија, 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 7.7).



Слика 7.7 Елементи аутомобила израђени од алуминијума FSW поступком [10]

Примена у аутомобилској индустрији је и код производње фелни. У фирми Hidro Aluminium (Норвешка) заварује се тело фелне израђено ваљањем, и главчина израђена ливењем или ковањем. На овај начин смањена је маса фелне. У фирми Shoma Aluminium & Rubber (Јапан) заварене су вулканизиране цеви пречника од 20 mm до 30 mm. Ове цеви се користе код израде амортизера за путничке аутомобиле.

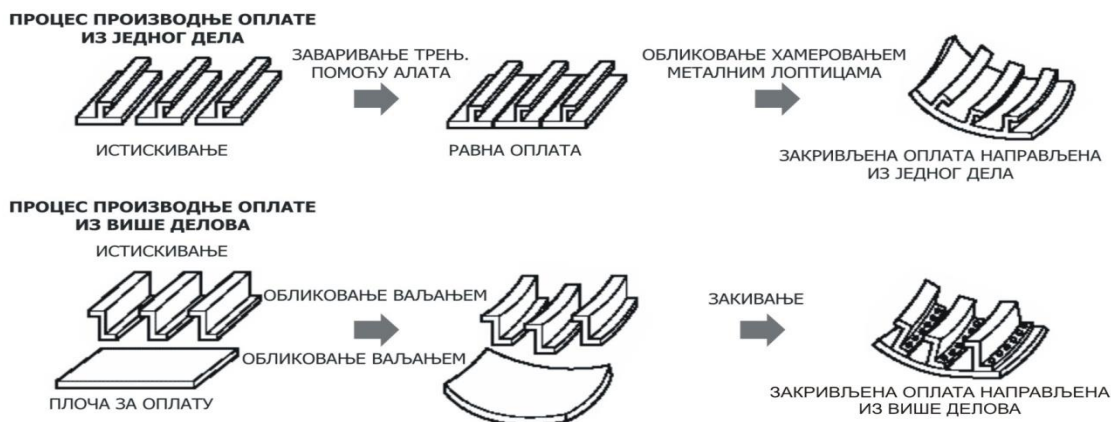
На слици 7.8 је дата клипњача заварена FSW поступком.



Слика 7.8 Клипњача добијена FSW поступком [11]

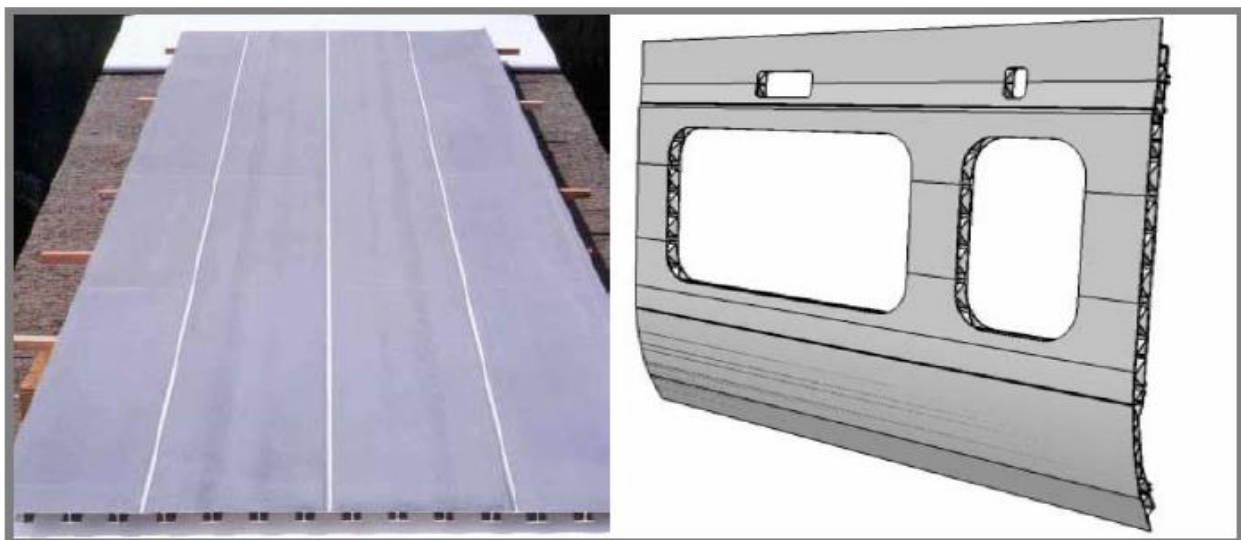
7.4 ПРОИЗВОДЊА ШИНСКИХ ВОЗИЛА

Увођењем поступка заваривања трењем помоћу алата у процес производње железничких превозних средстава постигнуту 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 7.9) 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 7.9 Профилисана плоча од алуминијумске легуре 6N01; (димензије 1300x5000 mm) за производњу супер брзог воза – шема спајања сегмената

Поред супер брзих возова (слика 7.10), у железничкој индустрији FSW поступак се примењује још код других шинских возила, трамваја, подземних превозних средстава, вагон цистерни, теретних вагона, тела контејнера итд.



Слика 7.10 Примена FSW у производњи железничких возила, под воза SHINKASEN – лево и страница вагона – десно [7]

7.5 ОСТАЛО

Зваривање поступком FSW, користи се и при производњи: кућишта електромотора, расхладних плоча, кухињске опреме, беле технике, бензинских резервоара и плинских боца, медицинске опреме (слика 7.11) намештаја итд.



Слика 7.11 Делови за скенер направљени FSW поступком [10]

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.

8. ЗАКЉУЧАК

У завршном раду је презентован поступак фрикционог заваривања 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. Код овог поступка знатно мање долази до лома основног материјала, али је знатно већи проценат лома споја него код истих, остварених MIG поступком или ласерским заваривањем. Велика предност овог поступка је што се овај недостатак споја може отклонити одређеним накнадним поступцима, тако да спој постаје готово истих карактеристика као основни материјал. Због своје способности заваривања различитих материјала има изузетно значајну примену због све израженије потребе за новим материјалима и њиховим спајањем. 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 : Технологија ливења и заваривања, Факултет инжењерских наука, Крагујевац 2015
- [3] Милорад Јовановић, Вукић Лазић, Драган Адамовић, Нада Ратковић : Гасно заваривање – приручник, Машински факултет, Крагујевац 2006
- [4] Јовановић И. : Технологија заваривања алуминијумских легура трењем помоћу алата, магистарски рад, Машински факултет, Београд, 2000
- [5] Krishnan, K. N. : On the formation of rings in friction stir welds, CRC forwelded Structures, Department of Mechanical Engineering, Adelaide University Australia, May 2001
- [6] Uzin, H. , Done, C.D. , Argagnotto, A. , Ghidini, T. , Gambaro, C. : Friction stir welding it dissimilar Al6013-T4 to X5CrNi18-10, Stainless steel, Materials and Design 26, 2005
- [7] Website:http://www.wbc-vmnet.kg.ac.rs/pub/download/13813386651_up_case_study.pdf
- [8] Website :<http://scindeks-clanci.ceon.rs/data/pdf/0354-7965/2006/0354-79650602059S.pdf>
- [9] Website :https://en.wikipedia.org/wiki/Friction_stir_welding
- [10] Website :<http://esabsp.esab.net/files/Handbooks/Welding%20Automation/XA00146120.pdf>
- [11] R.S.Mishra, Z.Y.Ma : Friction stir welding and processing, 2005
- [12] Website : <https://www.twi-global.com/>