



Назив студијског програма: Урбано инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Урбано инжењерство

Предмет: Материјали у урбаном инжењерству

Број индекса: 905/2013

Катарина В. Лековић

Легуре алуминијума у производњи вагона

Дипломски рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Драган Адамовић-ментор
2. _____
3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог рада студент треба да представи основна својства легура алуминијума, њихову поделу и означавање а затим и спајање помоћу фрикционог поступка.

Препоручена литература:

[1] Данијела Д. Живојиновић (2013): Примена механике лома на процену интегритета заварених конструкција од легура алуминијума, докторска дисертација, Универзитет у Београду

[2] Др Мирослав Б. Ђурђановић (2003): Перспектива примене топлоте генерисане трењем у обради метала, Осма интернационална конференција о трибологији, Београд, 8.-10.октобра 2003.

Крагујевац, мај 2017.

ментор:

Др Драган Адамовић

Изјављујем да је Дипломски рад Формални оквир управљања комуникацијом с аспекта заштите интелектуалне својине и ауторских права на високошколским институцијама у Србији резултат мог сопственог рада, а да су коришћене библиографске референце јасно наведене, као и сумарно у оквиру Литературе.

Захваљујем се доц. др. Фатими Живић на корисним саветима, пруженој подршци и примедбама током израде овог рада. Такође, захваљујем се својој породици као и свим колегама и пријатељима који су ми пружили своју несебичну помоћ током студирања и израде овог рада.

Кандидат:

Катарина Лековић

Апстракт :

У раду је представљен нови начин спајања легура алуминијума – Фрикционо спајање.

У уводном делу, наведене су основне карактеристике, механичка својства као и употреба алуминијума и његових легура, подела и означавање. Потом су објашњени принципи фрикционог спајања, примена овог поступка као и његове предности и недостаци .

Кључне речи: алуминијум, легура, трење, фрикционо спајање

Abstract:

In this paper is presented a new method of joining aluminium- Friction joining

The introduction includes basic characteristics, mechanical features and use of aluminium and its alloys, classification and identification. After introduction, are explained the principles of friction joining, application of this procedure, as well as its advantages and disadvantages.

Key words: aluminium, alloys, friction, friction joining

Садржај

Увод	6
1. Алуминијум.....	7
1.1 Подела и означавање алуминијума и алуминијумских легура	9
1.1.1 Означавање алуминијумских легура	11
2. Коефицијент трења.....	14
2.1 Материјали са високим коефицијентом трења	16
3. Заваривање трењем као технологија спајања елементата код путничког железничког вагона	22
3.1 Основни принципи фриксионог заваривања мешањем	22
3.2 Структура завареног споја добијеног FSW поступком.....	26
3.3 Својства завареног споја алуминијумских легура.....	28
3.3.1 Тврдоћа завареног споја.....	28
3.3.2 Механичке карактеристике завареног споја	29
4. Практични аспекти примене FSW технологије код спајања елемената у индустрији вагона	31
4. 1 Најчешће врсте спојева од Al легура.....	31
4. 2 Предности и недостаци поступка FSW	35
4. 3 Технолошки параметри процеса FSW	38
5. Контрола квалитета шавова.....	40
5.1 Метода контроле квалитета шавова без разарања.....	40
5.2 Методе контроле квалитета шавова са разарањем.....	43
5.2.1 Испитивање затезањем.....	43
5.2.2 Испитивање савијањем	45
5.2.3 Испитивање ударне жилавости	46
5.3 Металографска испитивања	47
6. Алати и машине у практичној примени FSW поступка у индустрији транспорта	48
6. 1 Маchine за FSW заваривање.....	53
Закључак.....	54
Литература	55

Увод

Заваривање је процес спајања два или више метална дела истог или приближно истог хемијског састава. Спајањем се добија нераздвојива веза. Заваривање се изводи под дејством топлоте, уз додавање или понекад без додавања додатног материјала и уз примену притиска или без њега. При заваривању врши се локално загревање ивице металних делова које треба спојити (заварити). Загревање се врши до температуре при којој метал прелази из чврстог у тестасто или течност стање, што зависи од врсте и начина заваривања. Постоје две врсте заваривања: заваривање топљењем и заваривање притиском.

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 (слика 1).



Слика 1. Поступак заваривања топљењем [11]

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 фрикционог заваривања мешањем (*FSW*). Ова метода јесте метода заваривања трењем, а то припада групи заваривања под притиском. Поступак *FSW* (*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, железничкој, авио и космичкој индустрији и другим гранама индустрије [11].

1. Алуминијум

Алуминијум и његове легуре су као конструкцијски материјали у данашње време јако заступљени у свим гранама индустрије. Због мале масе (приближно три пута мања од челика), релативно велике чврстоће, добре отпорности на корозију, добре електричне проводљивости, добрих механичких својстава и добре заварљивости уз примену одговарајућег поступка има широку примену у бродоградњи, аутомобилској, авионској, свемирској, железничкој и војној индустрији. У табели 1. дата су физичка и механичка својства алуминијума.

Табела 1. Физичка и хемијска својства алуминијума [2]

Густина	kg/m ³	2700
Тачка топљења	°C	660
Модул еластичности	N/mm ²	69000
Термичка дилатација	10 ⁻⁶ /K	23,8
Електрична проводљивост	m/Ω mm ²	36-37,8
Граница течења	N/mm ²	20-120
Затезна чврстоћа	N/mm ²	40-180

Чист алуминијум има тачку топљења на температури од 660 °C, док алуминијумске легуре нешто нижу - од 482 до 660 °C у зависности од легуре.

Легирањем и старењем могу се произвести легуре које имају чврстоћу као већина челика. Како би се постигла што већа чврстоћа и тврдоћа, алуминијум се легира бакром, магнезијумом, силицијумом, манганом, хромом, цинком и другим металима. Легирање алуминијума штетно делује на његову отпорност на корозију, а посебно легирање са бакром, који са друге стране значајно побољшава његова механичка својства.

Када се говори о заваривању алуминијума, углавном се мисли на заваривање његових легура, јер су легуре претежни облици у којима алуминијум долази на тржиште. Заварљивост алуминијума одређеним поступком зависи од садржаја легирајућих елемената.

Приликом заваривања треба водити рачуна о неким специфичностима ове групе материјала као што су:

- **Висок афинитет према кисеонику**- слој који се формира је трајан и изузетно јак. На тај начин алуминијумске легуре пружају одличну отпорност на корозију а помоћу процеса анодизације, дебљина тог слоја може бити контролисана. Због тога што има велики афинитет према кисеонику, алуминијум се користи у процесу добијања метала из њихових руда. Наиме, због те своје особине, истисне метал који треба добити а сам се веже са кисеоником. Такав поступак добијања метала се зове алуминотермија [52].
- **Слаба растворљивост водоника у чврстом стању у алуминијуму** може изазвати појаву порозности [52].
- **Могућност појаве топлих пукотина код одређених врста алуминијумских легура** – ова појава искључиво зависи од начина хлађења легуре. Додатком легирајућих елемената чистом металу, мења се температура при којој материјал очвршћава, што резултира стварањем другачијих фаза- нпр еутектике. Састав легуре са нижом тачком топљења познат је као еутектички састав који очвршћава при одређеној температури. Остали не-еутектички састави очвршћавају у великом распону температура. Прва честица која очврсне понаша се као клица на коју се атоми причвршћују чиме формирају дендрите- кристале који се појављују код нестабилне кристализације или код брзог хлађења раствора. Дендрит се повећава док се његове честице не почну сударати са суседним дендритима. Тамо где се честице сударе настаје граница између дендрита, која се назива граница зрна. Последица тог процеса солидификације је та да легирани елемент са најнижом температуром топљења буде одгурнут од клице према граници зрна и тамо буде „заробљен“. Ако је разлика у температурама велика, настаје слој дуж границе зрна, па може доћи до раздвајања граница зрна како се тај слој хлади и скупља [51].

Због великог афинитета алуминијума према кисеонику, присутност кисеоника у ваздуху и воденим растворима, резултира стварањем густог непропусног оксидног слоја Al_2O_3 који има изврсна заштитна својства. Уколико се оксидни слој оштети, уз присутност кисеоника оксидацијом се ствара нови слој. Због тог заштитног слоја алуминијум је пасиван у води и на ваздуху иако није племенити метал.

Тај оксидни слој ствара велики проблем код заваривања. Споменити оксидни слој има вишу температуру топљења (2050 °C) у односу на ниску температуру топљења алуминијума (око 660°C), те већу специфичну тежину од алуминијума па се тешко топи и лако утапа у завар. Алуминијум има високу температурну проводљивост (4 до 5 пута већу од челика), па је код дебљих материјала потребно предгревање.

Алуминијумске легуре показују отпорност на благе базе и киселине, па се на овим материјалима могу појавити уобичајени типови корозије [2].

1.1 Подела и означавање алуминијума и алуминијумских легура

Легуре за ливење се могу сврстати у три основне групе: Al-Si, Al-Mg и Al-Cu чијом се комбинацијом могу добити легуре са побољшаним неким основним својствима. Нпр. AlMg₃ и AlMg₅ имају врло добру отпорност на корозију, док AlSi₁₂ има врло добру ливкост. Алуминијумске легуре се могу лити веома добро на сва три основна начина: у песку, кокилу и под притиском. Неке од ливених алуминијумских легура могу додатно очврснути старењем, а неке се могу и гњечити иако су основно легуре за ливење.

Al-Si

Главни легирајући елемент је силицијум, до 12%. Ове легуре имају добру заварљивост и лемљивост. Додавањем натријума у малим количинама повећава се чврстоћа. Имају добру ливљивост па се као такве обично користе као додатни материјал за заваривање [2].

Al-Mg

Легуре ове групе се добро заварују и имају добру корозиону отпорност. Легуре које садрже бакар имају мању корозиону отпорност него легуре које га не садрже. Легуре богатије садржајем силицијум се користе за израду цевовода и носећих елемената, док легуре сиромашније силицијумом и магнезијумом се користе у аутомобилској индустрији за каросерије [2].

Al-Cu

Легуре на бази бакра (2-10%) познате су као дурали. Имају високу чврстоћу и могућност обликовања, слабу заварљивост, осетљиве су на топле пукотине. Присутност бакра смањује отпорност ове легуре на корозију. Уколико садрже никал повећана је отпорност корозији при високим температурама. Некада су легуре садржале од 2 до 4% бакра. Такав састав је резултирао да су легуре биле јако осетљиве на топле пукотине, тако да дужи низ година те легуре нису биле заварљиве. Повећањем количине бакра у легури до 6% или више, знатно су се побољшала својства заварљивости [2].

Главни легирајући елементи алуминијумских легура су: бакар, силицијум, манган, магнезијум, литијум и цинк. Елементи као што су никал, хром и титанијум се такође могу додати у малим количинама како би се постигла одређена својства. Остали елементи такође могу бити присутни у малим количинама, али се они сматрају нечистоћама и немају повољан утицај на механичка својства.

Својства појединих легираних елемената код легура алуминијума [2]:

- Магнезијум повећава чврстоћу механизмом очвршћавања помоћу чврсте топлivosti и побољшава очвршћавање деформацијом (легуре које садрже магнезијум се користе за компоненте транспортних средстава као што су компоненте за средства ваздушног и железничког транспорта, у прехранбеној и хемијској индустрији).

- Манган повећава чврстоћу механизмом очвршћавања помоћу чврсте топлivosti и побољшава очвршћавање деформацијом (легуре које садрже манган се користе за делове који су мање оптерећени).
- Бакар значајно повећава чврстоћу, омогућава очвршћавање старењем, смањује отпорност на корозију, дуктилност и заварљивост легуре које садрже бакар се користе за компоненте које су високо оптерећене, у авио индустрији).
- Силицијум повећава чврстоћу и дуктилност, у комбинацији са магнезијумом омогућава очвршћавање старењем (легуре које садрже силицијум се користе за израду блокова мотора, клипова, у авио и ауто индустрији).
- Цинк значајно повећава чврстоћу, дозвољава очвршћавање старењем, може изазвати корозију (легуре које садрже цинк користе се за компоненте које трпе висока оптерећења, за судове под притиском, за компоненте за средства ваздушног и железничког транспорта).
- Гвожђе повећава чврстоћу чистог алуминијума, углавном је заостали елемент (легуре које садрже гвожђе имају електропроводљива својства).
- Никал побољшава чврстоћу на повишеним температурама (легуре које садрже никал се најчешће користе при изради клипова који су изложени високим температурама).

Легуре са већим уделом магнезијума имају одличну постојаност у морској води и поморској атмосфери тако да се користе у бродоградњи. Жељена механичка својства постижу се гњечењем у задатој фази хладног обликовања деформисањем, па се легуре обично испоручују у меком стању или након одређеног нивоа хладног гњечења. Главни им је недостатак у томе да се механичка својства материјала, произведеног са коначним димензијама, не могу више мењати осим омекшавања жарењем (не могу се побољшати механичке карактеристике на овај начин јер би се изгубио жељени облик, зато што нема природног старења а вештачко старење се не може спровести. Каљиве легуре се могу старењем побољшавати док се некаљиве не могу).

Легуре ојачане старењем (користе се када су потребна побољшана механичка својства) имају предност када се тражи повољна размера између чврстоће и густине. Основу легура ојачаних старењем чине легирајући елементи: бакар, магнезијум, цинк и силицијум који стварају интерметалне спојеве са алуминијумом (бакар) или међусобно (магнезијум, силицијум и цинк). Очвршћавање постигнуто старењем је веће од очвршћавања хладним обликовањем, па је очвршћавање старењем основни поступак за повећање чврстоће и тврдоће претходно гњечених легура. Остали елементи који побољшавају механичка својства су: титанијум који налази примену као додатак за ситније зрно, олово и бизмут који побољшавају резљивост а хром побољшава очвршћавање старењем [2].

Алуминијумске легуре се деле на две групе: топлотно обрадиве и топлотно необрадиве. По правилу, увидом у стандарде за хемијски састав легура (SRPS EN 574-1...5) укупан број свих легирајућих елемената не прелази 10%.

Очвршћавање некаљивих (топлотно необрадивих) алуминијумских легура постиже се легирањем са : Mn, Mg, Si, Fe, хладном пластичном деформацијом и жарењем, при чему у чврстом раствору долази до дисперзијског отврдњавања интерметалним спојевима – расипања појединих елемената у кристалној решетки алуминијума (чист алуминијум, Al-Mn, Al-Mg-Mn, Al-Mg легуре).

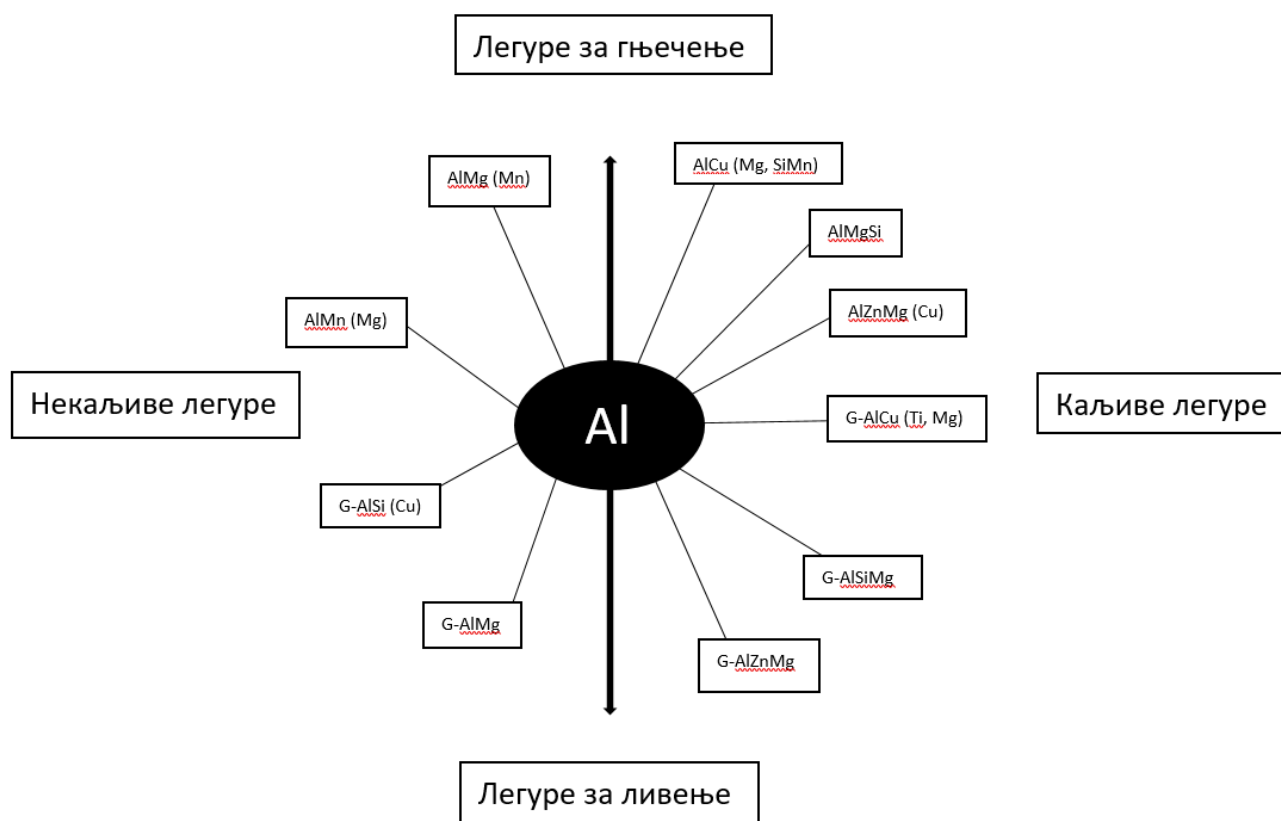
Основни легирајући елементи алуминијумских легура са структурним очвршћавањем (топлотно обрадиве) су: Cu, Si, Mg, Zn и Li. Ови елементи имају ограничену растворљивост у алуминијуму, а њихова максимална растворљивост је од 460 °C до 520 °C, те знатно опада са смањењем температуре. Очвршћавање ових легура потиче са жарењем, брзим хлађењем и старењем. За неке алуминијумске легуре овај поступак очвршћавања топлотном обрадом (поступак деловања температуре на материјал са циљем мењања микроструктуре како би дошло до очвршћавања, повећања жилавости и могућности преобликовања, смањења унутрашњих напрезања, и припреме за обраду резањем) може се комбиновати са деформационим старењем (на овај начин, легуре алуминијума поправљају своје механичке карактеристике највише у првом месецу, док се укупно побољшање одвија у прва три месеца). Ову групу чине: Al-Cu, Al-Si-Mg, и Al-Zn-Mg легуре [2].

1.1.1 Означавање алуминијумских легура

Према Европском одбору за нормирање постоје две методе за идентификацију алуминијумских легура. Једна се темељи на бројчаном означавању усвојена од стране ISO, а друга на хемијском саставу коју је препоручило удружење за алуминијум (*Aluminum Association*) [52].

Користе се следећи префикси:

- АВ- инготи (комади или делови релативно чистог материјала, обично метала, који су изливени у облик погодан за даљу обраду, као што је хладна или топла обрда, сечење или ваљање како би се добио кориснији производ) [53],
- АС- ливени материјали (технологија обликовања металних предмета ливењем растопљеног метала у урађене калупе, да би се тако, после хлађења добио одливак. Ливење је веома погодан поступак израде машинских делова чији је облик компликован са унутрашњим контурама и неправилним каналима. Савремена технологија и модернија опрема за ливење омогућава добијање одливака различитих димензија, тачности и квалитета површине, чиме је потреба за накнадном механичком обрадом све мање присутна)
- АМ- предлегура за ливење
- АW- гњечени материјал



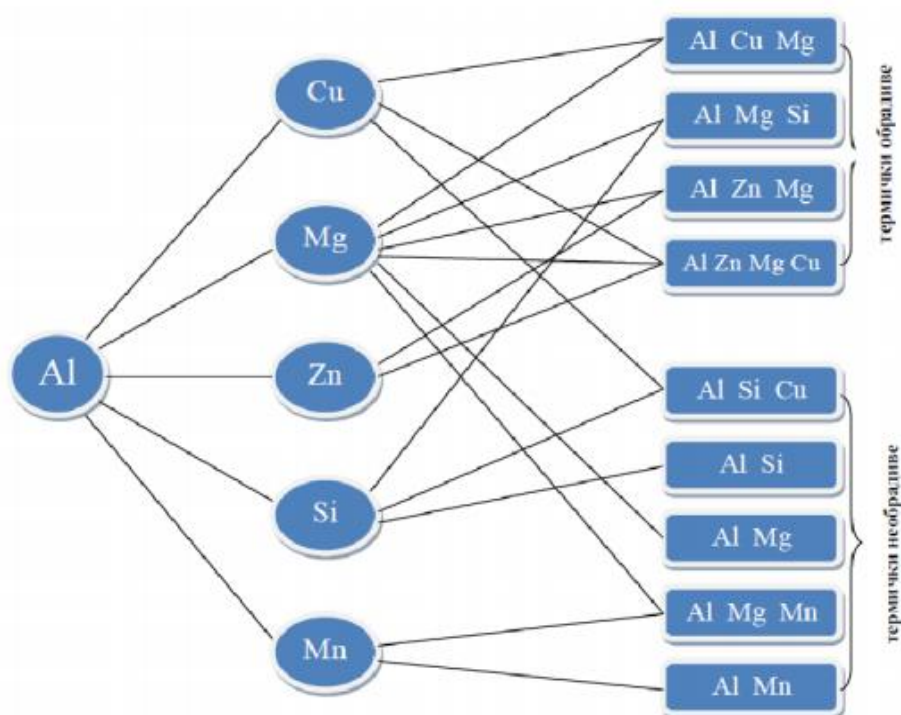
Слика 2: Алуминијумске легуре [приватна архива]

Код гњечених легура следи четвороцифрен број који служи за идентификацију легуре. Прва ознака означава главни легирајући елемент:

- AW 1xxx - технички чист алуминијум,
- AW 2xxx – алуминијум-бакар легуре,
- AW 3xxx – алуминијум-манган легуре,
- AW 4xxx – алуминијум-силицијум легуре,
- AW 5xxx – алуминијум – магнезијум легуре,
- AW 6xxx – алуминијум – магнезијум- силицијум легуре,
- AW 7xxx – алуминијум – цинк – магнезијум легуре,
- AW 8xxx – остали елементи, нпр. литијум, гвожђе
- AW 9xxx – није одеђена легирајућа група.

Осим у случају технички чистог алуминијума, последње три ознаке су произвољне и користе се за означавање одређене легуре. У случају чистог алуминијума последње две ознаке се користе за ознаку минималног удела алуминијума, нпр. AW- 1098 садржи најмање 99,98% алуминијума, AW- 1090 садржи најмање 99,90% алуминијума. Друга ознака означава удео нечистоће у алуминијуму.

Постоји укупно 36 алуминијумских легура за ливење, од којих је 29 на бази Al-Si [2]. Велике количине легираног алуминијума се користе у индустрији превозних средстава. У изради авиона алуминијум је, због своје мале густине и отпорности према корозији, незаменљив материјал, а захваљујући развоју нових технологија заваривања, то постаје и у аутомобилској индустрији као и производњи вагона и возова нових генерација. Најзаступљеније легуре у железничкој индустрији су из серије 5xxx и 6xxx, конкретно: 5052, 5083, 5086, 5454, 6061, 6082[54].



Слика 3: Легуре алуминијума [приватна архива]

2. Коефицијент трења

Величина позната под називом коефицијент трења, користи се од давнина у инжењерству. Датира још из времена Леонарда да Винчија који је први уочио законитости везане за ову бездимензиону величину, и дефинисао је као однос силе трења и нормалне компоненте [26].

Често се узима из табела, за моделирање, као познати параметар или се експериментално одређује у оквиру триболошких испитивања [27 - 32]. Међутим, фундаментално разумевање утицаја варијација коефицијента још увек није јасно, што је чудно, узимајући у обзир да је коефицијент трења један од битнијих параметара у прорачунима. С друге стране, ако се посматрају две површине у контакту, очигледно је да су многи утицајни фактори одређени баш овом величином. У много случајева у инжењерству када се коефицијент трења посматра на макро нивоу, установљене законитости су скроз јасне, међутим, на нешто нижим нивоима, као што је нанао ниво јављају се нејасноће које указују на комплексност ове величине.

Генерално, коефицијент трења зависи од материјала који су у контакту, њихове геометрије, храпавости површина, окружења и температуре. Коефицијент може бити статички или динамички. Статички се односи на сам почетак кретања док се динамички или кинетички односи на одржавање кретања. Разлику између статичког и динамичког коефицијента приметили су још стари Грци. Установили су да је лакше наставити кретање неког тела него га покренути из његовог мировања.

Класични закон трења утемељио је Леонардо да Винчи, који се сматра пиониром трибологије, чији су радови документовани у свескама али не и објављени у то време (1493). Ове законе је открио Амонтонс 1699. и представио природу трења кроз површинске неправилности и силе реакције подлоге. Додатној разради допринели су Белидор и Еулер 1750. увођењем стрме подлоге где су уочили разлику између статичког и динамичког трења.

Прву свеобухватну студију трења извршио је Колумб 1785. који је проучавао природу материјала контактних површина, њихову геометрију, нормалне компоненте оптерећања, време контакта, брзине као и влажност. Колумб је навео да је кинетичко трење независно од клизне брзине. Тек 1950. храпавост површине је препозната као високо утицајни фактор када су Боден и Табор показали да су контактне површине на микро нивоу изузетно мале и представили их као реалну контактну површину где је стварна контактна површина значајно мања од раније разматране на макро нивоу.

Већ дуже време, заједничко схватање је да коефицијент трења може имати само вредности између 0 и 1 као и да је статички коефицијент већи од динамичког.

Енергија трења, настала услед кретања између две површине трансформише се у топлотну, деформације и формирање нових површина односно хабање. На микро и нано нивоу, термодинамички, као и други утицаји (хемијски, храпавост...) почињу да утичу на процес. Рад настао током трења може бити трансформисан у деформације, топлоту и може да утиче на особине самих површина које могу бити искоришћене у процесу полирања. Рад индукован

трењем може бити искоришћен за мешање и спајање материјала приликом фрикционог заваривања [33].

Дефинисање фактора који утичу на трење на микро и макро нивоу још увек представљају комплексно питање и неколико приступа је предложено. Постоји много предложених модела трења у литератури, који разматрају геометрију (храпавост), механичке особине (напон, напрезање), динамику флуида, електростатичку силу између површина атома, хемијске компатибилности...

У различитим трибосистемима, енергија настала услед рада које врши трење, дистрибуира се на различите начине, од топлоте која повећава унутрашњу енергију материјала у контакту, или формирања нових површина и крхотина насталих хабањем, формирањем и разбијањем микро заварених зона и деформацијом контактних филмова. Веза између трења и хабања је евидентна, али ипак не постоји директна теорија да је квантификује, осим експерименталних зависности у одвојеним триболошким тестирањима.

Енергија која се трансформише као последица трења може бити складиштена у трибосистему или расута на пуно различитих начина.

$$E_f = E_{out} + E_{st}$$

Где је E_f укупна енергија настала услед трења, E_{out} енергија која напушта систем а E_{st} енергија која остаје у систему.

На пример, механичка енергија настала услед клизања може бити преведена у топлотну, енергију вибрације (звук), у деформације материјала или на хабање. Сходно томе, енергија може бити складиштена у материјалу, као микроструктурални дефект. Тако да, два материјала са истим коефицијентом трења могу да искусе различите нивое хабања јер је енергија другачије расподељена између и унутар материјала. Веза између трења и хабања може да се мења временом унутар једног система и обично се и мења чиме додатно уводи комплексност у истраживању тресења и хабања.

Према садашњим истраживањима, теоретским и експерименталним, трење се односи на :

- адхезију микро-контаката која доводи до штете у материјалу након рушења ових веза
- пластичних деформација површинских храпавости. Међутим, енергија расипања, на атомском нивоу, трења је много комплекснија од овог приступа [34].

Енергија трења се расипа током микроскопских деформација површинских храпавости и претвара у топлоту. До микро и нано нивоа, сила трења зависи од интерактивних физичких и хемијских особина, оптерећења, релативне брзине и температуре у оквиру малих контактних зона површинске храпавости. Као директна последица, генерисана топлота није једнако распоређена између две површине у контакту. Ниво дистрибуције топлотне енергије зависи од топлотне проводљивости, топлотног капацитета, релативне брзине, међупростора и многих других фактора. Локализована пластична деформација може значајно да промени расподелу топлоте, јер се део енергије задржава у микроструктурама материјала и може бити од 80-100% од укупне количине енергије.

Знање везано за коефицијент трења променило се током протеклих деценија и вредности веће од 1 доказане су у многим експерименталним резултатима. Сходно томе, материјали који имају овако високе коефицијенте се проучавају [4].

2.1 Материјали са високим коефицијентом трења

Статички коефицијент трења се односи на почетак кретања док се динамички односи на одржавање кретања. Две супротне области се могу посматрати у вези са коефицијентом трења изложених у процесима: ниског и високог нивоа коефицијента трења. Низак коефицијент трења је пожељан у случајевима котрљања или клизања у контакту између два различита елемента. Супротно овом приступу, високи коефицијент трења се изучавају за кочионе системе, хладно заваривање... Материјали са високим коефицијентом трења су раније углавном фокусирани на кочионе материјале до последњих деценија, где су нарочито постали занимљив предмет истраживања са појавом нанотехнологија. Познати *gecko feet effect* [35] је изазвао веома интересантна истраживања где се опонашају такви материјали и површинске структуре како би се омогућило високо трење и ниско приањање за многе нове нано/микро повезане апликације. Изузетни природни дизајн *gecko feet* лежи у низовима стотина флексибилних влакана која обезбеђују велику адхезију и трење на супротној површини, за све површине, од грубе до глатке, за хидрофобне или хидрофилне, користећи само слабе Ван дер Валсове силе.

Обично се сматра да је статички коефицијент трења већи од динамичког, то је обично и тако али постоје и бројни случајеви када су динамичке вредности драстично веће од статичких јер то зависи од материјала који су у контакту и услова у којима се налазе (храпавост површине, оптерећење или притисак, брзина, окружење као и температура).

Табела 2 приказује неколико комбинација материјала у контакту који резултирају високим коефицијентом трења. Поређење промена у комбинацији материјала које се односе на коефицијент трења, дат је у табели 3. Очигледно је да вредност првенствено зависи од материјала који су у контакту, али и окружење може допринети значајним променама

Табела 2. Комбинација материјала који резултирају високим коефицијентом трења [36]

Комбинација материјала		Статички коефицијент трења		Динамички коефицијент трења	
		Сув контакт, чисте површине	Подмазано	Сув контакт, чисте површине	Сув контакт, чисте површине
Алуминијум	Алуминијум	1.05 - 1.35	0.3		
Алуминијум	Меки челик	0.61			

Ливено гвожђе	Ливено гвожђе	1.1		0.15	0.07
Аутомобилска гума	Асфалт	0.72			
Бакар	Бакар	1	0.08		
Бакар	Ливено гвожђе	1.05		0.29	
Стакло	Стакло	0.9 - 1.0	0.1 - 0.6	0.4	0.09 - 0.12
Стакло	Никл	0.78	0.56		
Графит	Графит (у вакуму)	0.5 - 0.8			
Лед	Челик	0.03			
Гвожђе	Гвожђе	1.0	0.15 - 0.20		
Никл	Никл	0.7 - 1.1	0.28	0.53	0.12
Никл	Меки челик			0.64	0.178
Платина	Платина	1.2	0.25		
Гума	Гума	1.16			
Гума	Суви асфалт	0.9		0.5 - 0.8	
Гума	Суви бетон			0.6 - 0.85	
Сребро	Сребро	1.4	0.55		
Кожа	Метали	0.8 - 1.0			
Челик	Челик	0.5 - 0.8	0.16		
Волфрам карбид	Гвожђе	0.8			
Сува гума	Влажни коловоз	1			
Цинк	Ливено гвожђе	0.85		0.21	
Цинк	Цинк	0.6	0.04		

Табела 3. Поређење промена у комбинацији материјала које се односе на коефицијент трења [4]

Комбинација материјала		Статички коефицијент трења		Динамички коефицијент трења	
		Сув контакт,чисте површине	Подмазано	Сув контакт,чисте површине	Сув контакт,чисте површине
Аутомобилска гума	Асфалт	0.72			
Аутомобилска гума	Трава	0.35			
Бакар	Ливено гвожђе	1.05		0.29	
Бакар	Меки челик	0.53		0.36	0.18
Графит	Графит (у вакуму)	0.5 - 0.8			
Графит	Графит	0.1	0.1		
Гума	Суви асфалт	0.9		0.5 - 0.8	
Гума	Влажни коловоз			0.25 - 0.75	
Гума	Суви бетон			0.6 - 0.85	
Гума	Влажни бетон			0.45 - 0.75	
Сува гума	Влажни коловоз	1			
Влажна гума	Блажни коловоз	0.2			

Утицај температуре је такође веома значајан. Померање површина у релативном међусобном контакту где се јавља трење увек резултира појавом топлоте, тако да је температура у самом контакту увек већа од температуре околине. Са друге стране, повећање температуре унутар контактне зоне је под јаким утицајем материјала који су у контакту, брзине и оптерећења као и окружења. Такозвани бљесак температуре, посебно на микро/нано скали представља сложен проблем, и предмет је дебата везаних за његово порекло и утицај на кретање.

Неки материјали су посебно склони штетним ефектима загревања приликом трења, где се стварају високи коефицијенти трења који проузрокују микроставивање.

Један од материјала који има висок коефицијент трења када се упари сам са собом је алуминијум, и изузетно је погодан за фриксионо заваривање. Обично се користи за фриксионо заваривање у различитим комбинацијама уређаја, технологија и радних режима [36-50]. Хемијске композиције легура алуминијума које се користе за фриксионо заваривање, дате су у табели 3.

Табела 4. Хемијска композиција легура алуминијума које се користе за фриксионо заваривање [4]

(wt. %) of 5083 – O Thin Plate [13]									
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	V	Al
0.35	0.29	0.08	0.67	4.32	0.12	0.18	0.07	-	Bal.
(wt %) of aluminum alloy 2024 – T4 (wt %) [14]									
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Others		Al
0.5	0.5	3.8 – 4.9	0.3 – 0.9	1.2 – 1.8	0.3	0.15	Ni: 0.1, Fe + Ni:0.5		Bal.
(wt %) of AA1050 [15]									
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr		Al
0.08	0.27	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	-		Bal.
(wt %) of AA 5754 [15]									
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr		Al
0.4	0.4	0.1	0.5	2.6 -3.2	0.2	0.15	0.3		Bal.
(wt %) of 7075 – T6 [16,28]									
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr		Al
0.58	0.35	1.2	0.12	2.1	5.1	-	-		Bal.

(wt %) of AA6061 - T6 [17,29]									
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Al	
0.4 - 0.8	0.7 (max)	0.15 – 0.4	0.15 (max)	0.8 – 1.2	0.25 (max)	0.15 (max)	0.04 – 0.35	95.85 – 98.56	
Others (0.05 each – max) – total 0.15									
(wt %) of AA 7020 [18]									
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Others	Al
-	0.35	0.10	0.24	1.30	0.14	4.70	0.08	7.65	85.44
(wt %) of A 6082 [19]									
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Others	Al
1.0	0.15	0.02	0.7	1.15	0.15	0.02	0.1	-	Bal.
(wt %) of 6061 Al [20]									
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Others	Al
0.6	0.7	0.2	0.15	0.9	0.1	0.25	-	-	Bal.
(wt %) of AA 2024 – T351 [21]									
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Others	Al
0.06	0.15	1.3	0.02	2.4	0.19	5.8	0.07	-	Bal.
(wt %) of AA 5052 – [22]									
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Others	Al
0.25	0.4	0.1	0.15-0.35	2.2 – 2.8	0.1	-	-	-	Bal.
(wt %) of 2A70 [23]									
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Ni	Al
0.35	1.1	2.01	0.20	1.57	-	0.30	0.03	0.95	85.44
(wt %) of 2219 T87 [24]									
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zr	Zn	Ti	Ni	Al
0.08	0.18	6.38	0.32	-	0.18	-	0.06	0.03	Bal.

(wt %) of AA5010 [25]									
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zr	Zn	Ti	Ni	Al
0.62	0.33	0.28	0.06	0.9	-	0.02	0.02	-	Bal.
(wt %) of AA 2219 [26]									
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zr	Zn	Ti	V	Al
0.49	0.23	6.48	0.32	-	0.2	0.04	0.06	0.08	92.1
(wt %) of A6111 [27]									
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zr	Zn	Ti	V	Al
1.041	0.036	0.803	0.066	0.592	-	-	-	-	Bal.
(wt %) of A5023 [27]									
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zr	Zn	Ti	V	Al
0.110	0.090	0.200	0.005	5.680	-	-	0.090	-	Bal.

Овај поступак се примењује у областима инжењерства где тежина игра велику улогу, нарочито у транспортној индустрији (бродоградња, железничка и аутомобилска индустрија). Међутим ове технологије као и особине материјала се константно проучавају ради њиховог побољшања, најчешће коришћењем симулација и моделирања, као што су однос напон-напрезање, методом коначних елемената-*FEM* анализа [4].

3. Заваривање трењем као технологија спајања елементата код путничког железничког вагона

3.1 Основни принципи фрикционог заваривања мешањем

Поступак фрикционо заваривање мешањем (*Friction Stir Welding-FSW*) је развијен и патентиран у децембру 1991. године од стране *W. Thomas*-а из Института за заваривање (*TWI – The Welding Institute, Cambridge, UK*).

Иако *FSW* представља релативно нов начин заваривања, убрзо почиње да се користи у авио саобраћају, као прилично ефикасан начин спајања компоненти од легура алуминијума. Велики успех постиже и у другим индустријским гранама, као што су железничка и аутомобилска индустрија.

Овај процес се обавља у чврстом стању, па је као такав погодан за заваривање како истородних, тако и различитих типова материјала. При томе се добијају одличне механичке карактеристике завареног споја.

FSW је настао као резултат истраживања вршених у циљу изналажења нових решења при заваривању легура алуминијума, како би се избегли проблеми који се јављају при конвенционалним процесима заваривања (локално загревање материјала до и преко тачке топљења, при чему се у значајној мери смањују механичка својства материјала). То је процес спајања материјала у чврстој фази, комбинованим деловањем топлоте и механичког рада. У току овог процеса температуре које се јављају у зони споја не прелазе тачку топљења материјала, већ се крећу у интервалу од 400–500 °C. При томе, не настају уобичајене грешке које су карактеристичне за процес топљења.

Овим, релативно новим поступком заваривања, могуће је заварити већину алуминијумских легура, па чак и оне које нису погодне за заваривање конвенционалним поступцима.

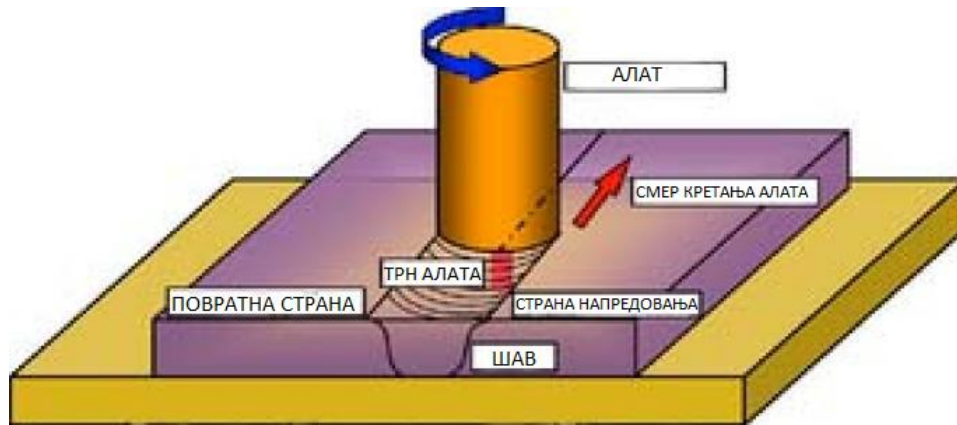
FSW је посебно погодно за спајање алуминијумских легура са великим распоном дебљина плоча. Могуће је заварити алуминијумске лимове дебљине од 0.5 до 50 mm у једном пролазу, односно до 100 mm дебљине формирањем двостраног вара. Такође, овим поступком заваривања могуће је успешно заварити и следеће материјале: бакар и његове легуре, олово, титанијум и његове легуре, легуре магнезијума, легуре олова, цинк, легуре никла, конструкциони челик, микролегиране челике, меки челик, нерђајући челик, аустенити и дуплекс челик, полимери.

Поступак фрикционог заваривања мешањем (помоћу алата), као веома савремен поступак, нашао је своје место у производњи процесне опреме, производњи шинских возила, бродоградњи, аутомобилској индустрији, авиоиндустрији, производњи космичких летилица, итд. Овим поступком се могу заваривати плоче, лимови, цилиндрични делови, склопни делови и то у свим могућим међусобним положајима.

Данас, заваривање представља најзаступљенији начин (технологију) спајања металних структура, нарочито конструкција са високо-габаритним мерама, као што су мостови, бродови, авиони.

До недавно коришћена техника спајања танкозидних структура израђених од легура алуминијума посредством закивака, у последње време се све више замењује новом технологијом спајања – фрикционим заваривањем мешањем.

Поступак *FSW* се остварује по принципу приказаном на слици 4. Лимови сучеоно постављени, притисну се један уз други и чврсто фиксирају за подложну плочу.

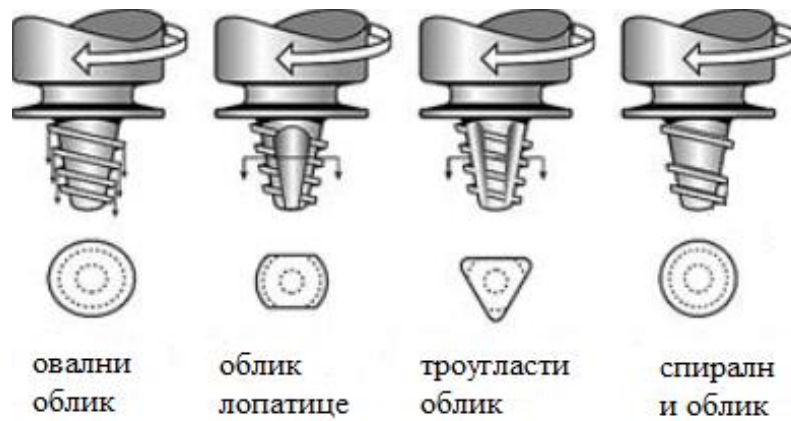


Слика 4. *FSW* поступак [1]

При томе користи се специјално обликован алат (Табела 5). Алат је цилиндричног облика и састоји се од ваљка и трна алата. Пречници ова два дела су различити, док је прелаз између оба дела раван и назива се чело ваљка. Облик трна може бити различит и служи за генерисање топлоте у споју (слика 5).

Табела 5. Алати [1]

<i>Cylindrical</i>	<i>Whorl™</i>	<i>MX-triflaute™</i>	<i>Flared triflaute™</i>	<i>A-skew™</i>	<i>RE-stir™</i>
цилиндрични	спирални	MX-трозљбни	ширећи трозљбни	A-закосени	Re-мешајући
					



Слика 5. Облици трна алата [1]

У почетном тренутку, алат се позиционира изнад лимова, при чему је његова оса нормална на додирну линију лимова. Процес започиње ротацијом алата (око сопствене осе) и урањањем алата у материјал, по линији споја. Када чело ваљка додирне лимове, генерише се топлота и при томе се материјал лимова загрева до пластичног стања. Трн алата продире у материјале дуж линије споја. Потом, алат врши транслаторно кретање дуж линије споја два материјала која се заварују, уз истовремену ротацију. Након формирања завареног споја, алат завршава транслаторно кретање вертикалним извлачењем трна алата из основног материјала.

У зависности од конструкције уређаја за заваривање могуће је остварити различите начине кретања:

- Подложна плоча је фиксирана за сто машине и врши хоризонтално транслаторно кретање заједно са лимовима, док алат врши само ротационо кретање (око своје осе).
- Подложна плоча може бити непокретна а да транслаторно кретање врши алат.

У току заваривања се не користи додатни материјал и не долази до топљења материјала који се заварују. Дакле, алат и основни материјал остају у чврстом стању, док се у зони заваривања основни материјал налази у благо размекшаном, „пластичном“ стању. Оно је последица генерисања топлоте, која настаје као резултат трења између алата и основног материјала.

Дакле, фрикционо заваривање мешањем је процес базиран на интензивном мешању материјала око алата, а затим сједињавању и одлагању, тако добијеног материјала, иза трна алата. У зони споја се врши генерисање топлоте услед трења које настаје између трна алата и материјала који се заварује. Сам пренос топлоте се поспешује пластичним течењем материјала око трна алата и он зависи од особина материјала и од параметара заваривања. Параметри заваривања су: брзина ротације алата и релативна брзина алат-материјал, притисна сила, брзина заваривања, геометрија алата и време заваривања.

Термо-механички процеси који се одвијају у самом вару утичу на брзину загревања и хлађења, деформацију и течење материјала, а самим тим и на рекристализацију и механичке карактеристике завареног споја.

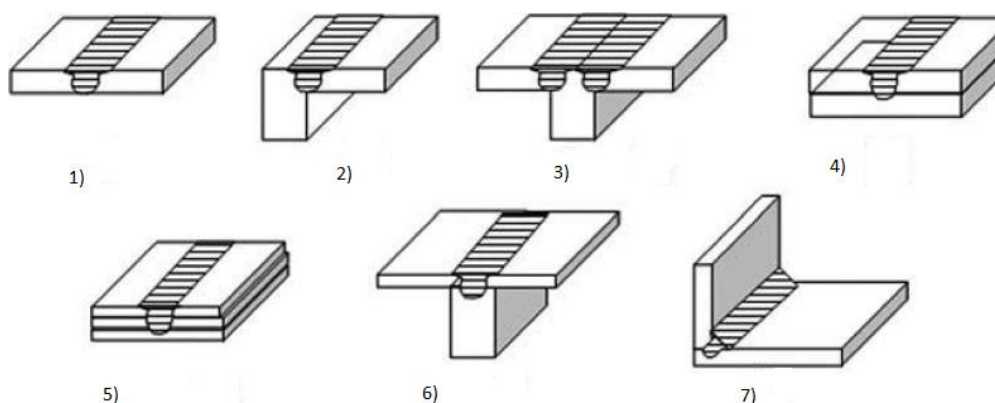
Основни параметри процеса заваривања су релативна брзина, сила и време заваривања.

У току процеса фрикционог заваривања мешањем, најинтензивније генерисање топлоте настаје на фронталном делу фрикционе површине трна алата, јер она долази у додир са незагрејаним материјалом на који трн алата наилази у смеру свог трансляторног кретања. На преосталим деловима трна алата интензитет генерисања топлоте је мањи, јер су већ у контакту са претходно загрејаним и пластичним материјалом.

Мешањем загрејаног материјала добија се ситнозрнастија структура, чиме се побољшавају, механичке карактеристике шавова. На тај начин, код неких случајева, добија се спој чије су механичке карактеристике боље у односу на основни материјал [1].

На слици 6, приказане су врсте спојева које се могу формирати помоћу фрикционог заваривања мешањем:

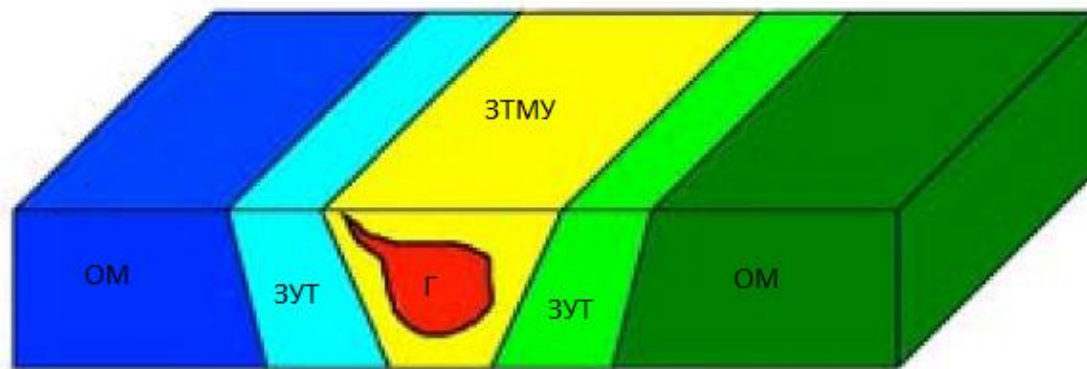
- 1) Сучеони спој,
- 2) Угаони-сучеони спој,
- 3) Т-спој три елемента,
- 4) Једноструки преклопни спој,
- 5) Вишеструки преклопни спој,
- 6) Т-спој два елемента,
- 7) Угаони спој.



Слика 6. Врсте спојева добијених поступком FSW 1) Сучеони спој, 2) Угаони-сучеони спој, 3) Т-спој три елемента, 4) Једноструки преклопни спој, 5) Вишеструки преклопни спој, 6) Т-спој два елемента, 7) Угаони спој [1]

3.2 Структура завареног споја добијеног FSW поступком

Анализом макроструктуре узорка алуминијумских легура заварених поступком FSW, установљено је да постоји извесна несиметричност попречног пресека споја у односу на линију споја. При томе се уочава карактеристична структура облика тзв. „прстена лука“ у централној зони пресека. (Слика 7.)



Слика 7. Попречни пресек споја добијеног FSW поступком [1]

- Основни материјал (ОМ)
- Зона утицаја топлоте (ЗУТ)
- Зона термо-механичког утицаја (ЗТМУ)
- Грумен (Г)- део ЗТМУ

Узрочник асиметричности јесте сама природа течења материјала током процеса заваривања. Дакле, на слици 7. јасно се уочава несиметричност између стране напредовања (десно) и повратне/пратеће (лево) стране попречног пресека завареног споја. Страна напредовања вара је она страна споја код које се поклапају смерови вектора брзине ротације и праволинијског кретања алата, за разлику од повратне стране која се дефинише као страна на којој су ова два вектора супротног смера. Ова разлика у суперпонирању вектора брзина на страни напредовања, односно на повратној страни, узроковала је различитости при простирању топлоте и течења, а самим тим и механичким особинама. На пример: код алуминијумских легура које ојачавају старењем, тврдоћа у ЗУТ-у повратне стране је нижа, услед чега при затезном оптерећењу до лома долази баш у овој зони.

Промену особина основног материјала изазивају следећи фактори: максимално достигнута температура (последича топлоте индуковане трењем током заваривања), брзина хлађења, дејство притисне силе и течење материјала услед механичког мешања. Управо ове појаве, пропраћене променом особина основног материјала, узрокују постојање неколико зона у завареном споју различитих по својој структури и особинама:

- **Основни материјал (ОМ)** – ова зона није изложена дејству механичког оптерећења и температуре, јер је на довољно великој удаљености од вара. Самим тим тако нема промена у микроструктури и механичким особинама и оне одговарају свом полазном стању;
- **Зона утицаја топлоте (ЗУТ)** – је део основног метала близу вара, који је изложен дејству повишене температуре, али не и дејству механичког оптерећења. Током процеса заваривања у овој зони се одвија одређени температурни циклус загревања и хлађења, услед чега долази до промена у микроструктури и механичким особинама. Величина ове зоне зависи од односа времена и температуре заваривања, као и од растојања од осе вара.
- **Зона термо – механичког утицаја (ЗТМУ)** – је део основног материјала који се налази непосредно испод алата. Истовремено је изложен дејству механичког оптерећења и повишеној температури, што има за последицу појаву значајних промена у микроструктури, а самим тим и у механичким карактеристикама материјала.

Код алуминијумских легура, унутар ЗТМУ могуће је уочити три области:

1. Најизраженија је рекристализована област, тзв. **грумен**, која је услед дејства механичког оптерећења знатно деформисана као и због различитих вредности температуре у материјалу током заваривања.
2. Лево и десно од грумена налази се област која је деформисана у мањој мери у односу на грумен. У овој области може али и не мора доћи до рекристализације зрна, у зависности од врсте легуре.
3. Трећа област се налази изнад грумена. Настаје током пролаза ивице ваљка са повратне стране преко претходно формираног грумена.

Код других материјала, за разлику од легура алуминијума не постоји јасно изражена знатно рекристализована зона- тзв. грумен.

- **Грумен вара** – је део основног материјала, непосредно испод алата. Претрпео је највеће пластичне деформације, као резултат директног утицаја дејства трна алата. Ширина грумена је обично нешто већа од пречника трна алата. Микроструктура грумена се састоји од хомогено распоређених ситних рекристалисаних зона, што је последица процеса рекристализације који се у њему одвијају. У зависности од врсте легуре и услова заваривања, величина зрна се креће од 2 до 10 μm . Несиметричност шави се односи на сам грумен. На страни напредовања прелаз грумена ка ЗУТ-у је веома нагао, док је на повратној страни вара знатно постепенији.

Лице шави је горња површина споја која је у контакту са ваљком алата, док је корен шави доња површина споја која је у контакту са потпорном плочом [1].

3.3 Својства завареног споја алуминијумских легура

Фрикционо заваривање мешањем представља термо – механички процес. Дакле, постоје механичке интеракције између алата за *FSW* и материјала, који се заварује. Својим комбинованим кретањем алат предаје кинетичку енергију споју, при чему се предата енергија трансформише у различите видове енергије (кинетичку и топлотну), које проузрокују деформацију микроструктуре шави, као и модификацију механичких карактеристика. Дакле, у шаву настају металушке трансформације, које диктирају особине завареног споја. Те трансформације зависе од легирајућих елемената, као и стања легуре. Утицај брзине ротације алата, брзине заваривања и геометрије алата има значајан утицај на тврдоћу материјала, али и на различите механичке карактеристике завареног споја. Промена код легура које таложно отврдњавају су сложеније, за разлику од промена код легура са растварајућим отврдњавањем [1].

3.3.1 Тврдоћа завареног споја

Код термички необрадивих легура, региструје се мало повећање 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 споја. У зони термомеханичког утицаја материјал је изложен дејству механичког мешања, али и температуре, што има за последицу нешто већу тврдоћу у односу на преостале зоне. Док је материјал у зони утицаја топлоте изложен дејству само повишене температуре, тако да је структура веома мало измењена у односу на основни материјал.

У термички обрадиве легуре спадају следеће групе: 2xxx, 6xxx и 7xxx. Ове легуре таложно ојачавају и имају најмању тврдоћу у делу непосредно изван грумена. У току заваривања *FSW* процесом долази до појаве комплексних металушких трансформација у завареном споју и ЗУТ – у. Код ових група алуминијумских легура у области грумена обично изостаје таложно ојачавање. Уколико дође до издвајања талог у овој области, издвојене честице талог су веома fine. У зони непосредно уз грумен издваја се груб талог. Величина издвојених талог се смањује са повећањем удаљености од грумена, што је последица простирања топлоте кроз заварени комад, као и њеног утицаја на микроструктуру материјала услед извршене термичке обраде. Услед тога расподела тврдоће кроз заварени спој легура које таложно ојачавају имају карактеристичан *W* облик профила. При том, тврдоћа грумена је на нивоу између основног и термички обрађеног материјала [1].

Алуминијум – бакар легуре (серија 2xxx)

Легуре на бази бакра (2-10%) познате су као дурали. Имају високу чврстоћу и могућност обликовања, слабу заварљивост, осетљиве су на топле пукотине. Присутност бакра смањује отпорност ове легуре на корозију. Уколико садрже никал повећана је отпорност корозији при високим температурама. Некада су легуре садржале од 2 до 4% бакра.

Такав састав је резултирао да су легуре биле јако осетљиве на топле пукотине, тако да дужи низ година те легуре нису биле заварљиве. Повећањем количине бакра у легури до 6% или више, знатно су се обољшала својства заварљивости.

Алуминијум – магнезијум – силицијум легуре (серија 6xxx)

Легуре ове групе се добро заварују и имају добру корозиону отпорност. Легуре које садрже бакар имају мању корозиону отпорност него легуре које га не садрже. Легуре богатије садржајем силицијум се користе за израду цевовода и носећих елемената, док легуре сиромашније силицијумом и магнезијумом се користе у аутомобилској индустрији за каросерије.

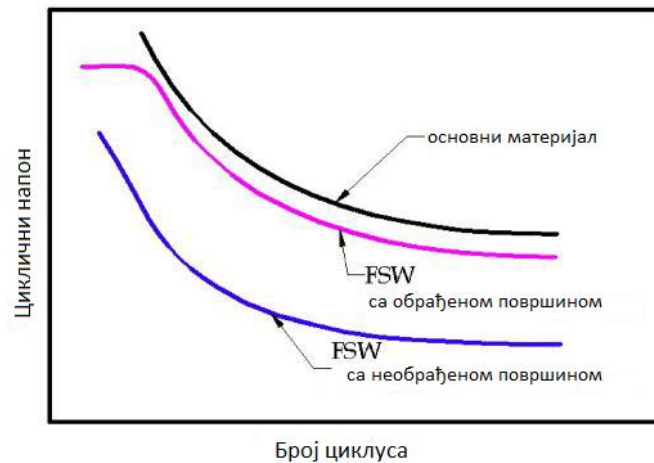
Алуминијум – цинк – магнезијум легуре (серија 7xxx)

Главни легирајући елемент је цинк, у комбинацији са магнезијумом и баком. Популарно се зову конструктали. Легуре су велике чврстоће и веома обрадиве. Због високог удела бакра ове легуре имају средњу отпорност на корозију. Легуре из ове серије са гледишта заваривања се могу поделити на две групе. Прва група су легуре високе чврстоће које садрже више од 1% бакра, па се обично користе у авио и свемирској индустрији. Легуре из друге групе су без бакра, средње су чврстоће и развијене су за заваривање. Корозијски су отпорније од легура са баком, користе се за израду носећих елемената.

3.3.2 Механичке карактеристике завареног споја

Зоне грумена и ЗУТ – а, имају велику способност пластичне деформације због највећег утицаја топлоте. Углавном, затезна чврстоћа свих типова алуминијумских легура се повећава са порастом параметара заваривања, пре свега брзине заваривања. При томе, постигнута ефикасност споја веома зависи од типа легуре. Ефикасност споја добијеног *FSW* поступком је знатно боља у односу на ефикасност споја добијеног класичним поступком заваривања са топљењем. Код легуре групе 5xxx ефикасност споја може да износи и до 100%, док је за легуре групе 2xxx, 6xxx и 7xxx ефикасност споја износи до 90%, до 75% и преко 90%, респективно. Приликом испитивања на затезање заварених спојева легура које таложно ојачавају, до лома долази на повратној страни вара. Накнадна термичка обрада спојева повећава ефикасност споја, али знатно смањује савојну чврстоћу, што је последица пораста зрна у ЗТМУ. Такође, термичка обрада утиче на место и карактер прелома. Из ових разлога се накнадна термичка обрада спојева добијених *FSW* поступком не препоручује.

Квалитет површине добијене *FSW* поступком, односно изглед лица шава има велики утицај на отпорност споја на замор. Испитивањем на замор узорака оптерећених у попречном и подужном правцу, утврђено је да отпорност споја на замор износи свега 50% од отпорности основног материјала. Међутим, уколико се од стране лица шава накнадном машинском обрадом скине слој дебљине 0,1 до 0,15 mm, отпорност материјала шава на замор је приближно једнака основном материјалу (Слика 8.).



Слика 8. Утицај обраде површине споја на замору отпорности [1]

Мала надвишена лица шави, као и присутни гребенасти трагови ваљка алата на страни напредовања, који настају након процеса *FSW* су места концентрације напона на којима се стварају и развијају заморне прслине. Накнадном машинском обрадом уклањају се концентратори напона, па се заморне прслине јављају у области најмање тврдоће.

Уколико се у процесу *FSW* примењује већа брзина заваривања настали спој има већу отпорност на замор. Отпорност спојева на замор, добијених *FSW* поступком је ипак већа него спојева добијених *MIG* поступком.

У завареним спојевима добијеним *FSW* поступком јављају се заостали напони и деформације, настали као последица неуниформног хлађења и загревања материјала. Ове разлике изазивају неједнако ширење материјала и појаву локалних пластичних деформација. Током хлађења материјал се скупља и генерише заостале напоне. При томе се јавља асиметричност у расподели заосталих напона у односу на осу кретања алата (страна напредовања тј. повратна страна). Ипак, ови негативни пропратни ефекти су далеко мањи од оних који се јављају у завареним спојевима добијеним топљењем материјала, код класичних поступака заваривања.

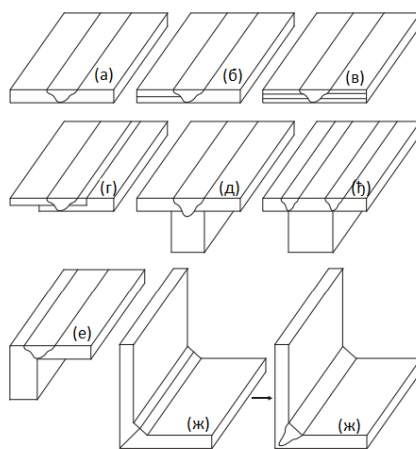
Вар се одликује високим механичким особинама. Лом се јавља у ЗУТ и ЗТМУ. У овим зонама су мање вредности микротврдоће. Повећање тврдоће у овим зонама може се постићи термичком обрадом након заваривања.

Код термички неојачаних легура алуминијума тврдоћа се повећава од основног материјала ка зони мешања. Узрок повећане тврдоће у зони мешања је рафинација зрна. Код термички ојачаних легура алуминијума, јавља се карактеристичан „W“ облик профила тврдоће у попречном пресеку завареног споја. Најмања тврдоћа је заступљена у ЗУТ-у, док је тврдоћа грумена између вредности тврдоће за ЗУТ и основни материјал. Тврдоћа у грумену се може повећати повећањем брзине заваривања и смањењем броја обртаја алата [1].

4. Практични аспекти примене FSW технологије код спајања елемената у индустрији вагона

4. 1 Најчешће врсте спојева од Al/ легура

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 Ti и челика. Овим поступком најчешће се израђују сучеои и преклопни, а много ређе угаони спојеви (шавови) који су приказани на слици 9.



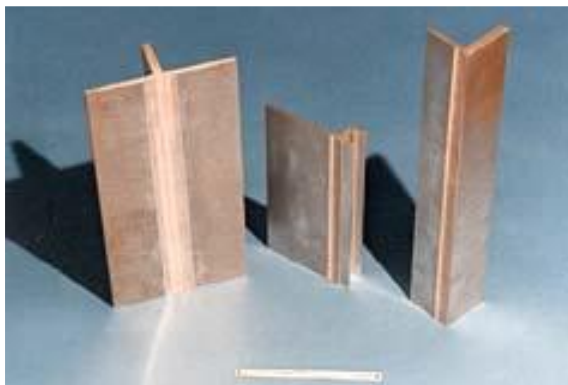
Слика 9. Врсте заварених спојева добијених поступком FSW (a) сучеои спој; (б) комбиновани сучеои и преклопни спој; (в) вишеструки преклопни спој; (г) упуштени преклопни спој; (д) T спој два елемента; (ђ) T спој три елемента; (е) угаони-сучеои спој; (ж) угаони спој [6]

Најчешће се сучеоно спајају радни комади дебљине од 1.2 mm до 50 mm. Заваривање може да се изведе једнострано или двострано. Најоптималније 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 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 различите конфигурације у различитим положајима. У том погледу, практично нема великих ограничења. Дужина споја може да буде ограничена једино величином постоља. Поред високих механичких својстава, заварени спој има глатку површину и додатна механичка обрада у великом броју случајева није потребна. Истовремено, код овог поступка, нема губитка материјала, што је важна карактеристика и предност у односу на многе друге поступке заваривања. Са тог аспекта је поступак FSW изузетно економичан. Овај поступак је прво тестиран на алуминијуму као материјалу који се у савременој индустрији много користи али код кога се традиционалним поступцима тешко добијају квалитетни спојеви због изражене појаве порозности шавова и

дисторзије делова. Обе појаве су веома штетне и захтевају додатну обраду којом не могу потпуно да се отклоне, а посебно су изражене код лимова [6].

На слици 10, дати су примери типичних *T* и *L* спојева, добијених *FSW* поступком. На слици 11, је приказана екструдирана ојачана цев, док је на слици 12 екструдирани панел.



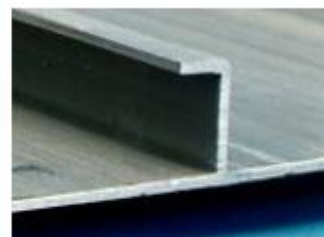
Слика 10. Типични алуминијумски спојеви добијени FSW-ом [1]



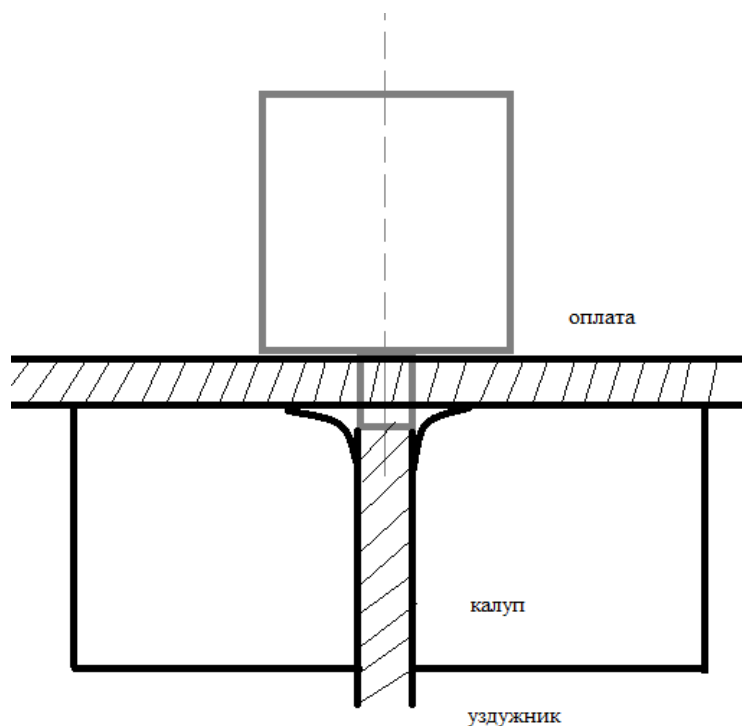
Слика 11. Екструдирана цев[1]



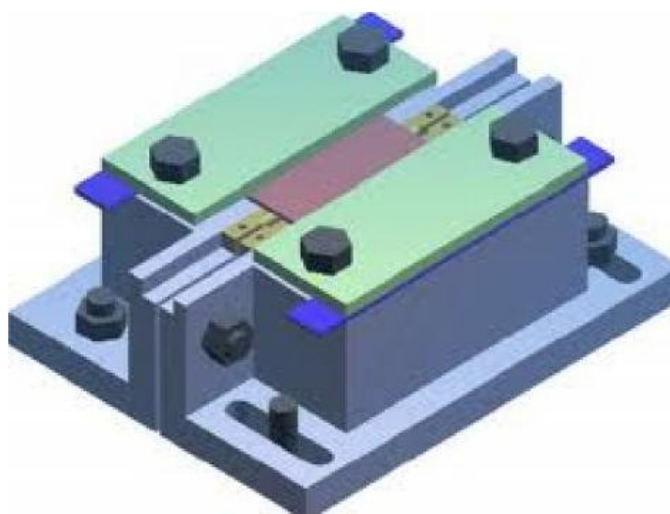
Слика 12. Екструдирани панел [1]



На сликама 13 и 14 дати су поједностављени прикази фрикционог заваривања мешањем приликом формирања *T*- споја. Овим поступком остварује се спој између оплате и уздужника (ојачање). При томе се користи посебан алат за позиционирање, али и калупи којима се формира заобљење дуж линије споја оплате и уздужника.



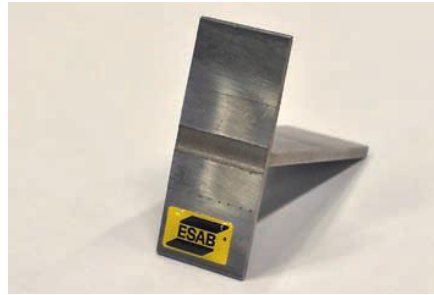
Слика 13. Поједностављени приказ формирања Т- споја FSW поступком-позиционирање алата и компоненти споја (оплата и уздужник) [1]



Слика 14. 3D модел алата за FSW [1]

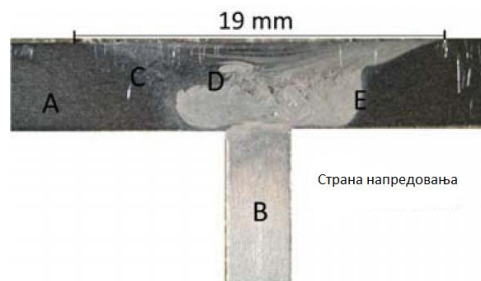


Слика 15. Заобљење у корену код Т-споја добијеног FSW поступком [1]



Слика 16. T- спој добијен FSW поступком [1]

На слици 15. приказан је микрографски снимак Т- споја две различите легуре алуминијума 6056-Т4 и 7075- Т6. Оштру границу између зона је немогуће дефинисати, јер постоје континуирани прелази. Ипак могу се уочити извесне зоне у споју. Могуће је уочити несиметричност споја, стране напредовања у односу на повратну страну.

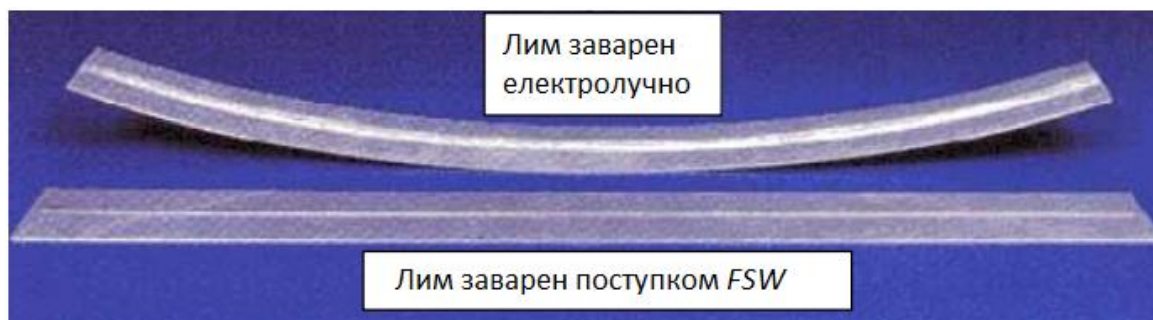


Слика 17. Микроструктура попречног пресека код Т-споја, при спајању легура алуминијума 6056-Т4 и 7075-Т6 [1]

- *A-основни материјал*
- *B-основни материјал*
- *C-ЗМУ/ЗУТ на повратној страни споја*
 - *D-језгро*
- *E- ЗМУ/ЗУТ на страни напредовања*

4. 2 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 али се могу заваривати и тањи лимови. Дебљина алуминијумског лима који се може заварити 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. Како је природа FSW чврсто стање, то одмах води до неколико предности у односу на методе заваривања топљењем метала. Хлађење течне фазе је одмах избегнуто. Питања као што су порозност, редистрибуција раствора, пуцање очвршћавањем и пуцање топљењем нису примећена ток процеса FSW. У принципу поступак FSW је нашао своју примену, има мали број недостатака и веома је толерантан за варијације у параметрима и материјалима. Једна од значајнијих предности у односу на електролучне поступке заваривања је што нема дисторзије односно кривљења лима у току одвијања процеса FSW. Код поступка електролучног заваривања, материјал који се топи приликом заваривања када се охлади, долази до његовог скупљања, самим тим и до појаве деформација (Слика 18.).



Слика 18. Дисторзије лимова заварених електролучно и поступком FSW [6]

Поред наведених, поступак FSW поседује својства која су веома ретко присутна код других поступака: формирање завареног споја са занемарљиво малим унутрашњим напонима зато што нема ливене структуре, добијање спојева који су отпорни на корозију и појаву кртог лома [6], али све то код материјала код којих до сада то није било могуће (спајање материјала из различитих група), или је било изузетно тешко и скупо остварити. Због тога је у економском погледу поступак FSW, убедљиво најјефикаснији, 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 [6]:

- Могућност потпуне аутоматизације процеса. Лако се процес аутоматизује на глодалицама (једноставан алат, једноставно задавање параметара заваривања као и њихово праћење).
- Добијање хомогене ситнозрнасте структуре споја са високим механичким и другим својствима (нема ливене структуре као код електролучног заваривања где су особине завареног споја знатно лошије у односу на фриксионо заварен спој).
- Могућност заваривања разнородних материјала (подешавањем оптималних параметара омогућено је заваривање различитих група материјала).
- Додатни материјал није потребан (нема уношења додатног материјала, самим тим ни нечистоћа и водоника који проузрокује појаву пора).
- Добра механичка својства завареног споја (затезна чврстоћа и граница развлачења, отпорност на крти лом).
- Побољшана сигурност услед одсуства отровних гасова или прскање од растопљеног материјала (нису потребна посебна средства заштите јер нема испарења растопљеног материјала).
- Нема потрошног материјала, тачније мало се алат троши тако да је трошак занемарљив у односу на класични поступак (конвенционални челични алат може да завари 1000 метара легуре алуминијума).
- Нижи трошкови поставке и обуке заваривача (нема заштитног гаса па је поступак самим тим јефтинији као и обука оператера јер је једноставнија у односу на обуку за заваривање код конвенционалних поступака).
- Велика уштеда енергије (нема губитка енергије код загревања и распрскивања као код електролучног заваривања где је фактор искоришћења енергије у опсегу од 60 до 80%).
- Добијени заварени спој не садржи неметалне укључке и нечистоће (нема нечистоћа и неправилности јер се не користи додатни материјал).
- Једнака ширина метала шава по дужини (не постоји утицај заваривача на квалитет заваја јер је процес аутоматизован, потребно је само задати одговарајуће параметре и добија се једнак шав целом дужином).
- Генерално добар изглед шава и минимална дебљина испод и изнад завареног споја, чиме се смањује потреба за скупе обраде после завршеног процеса заваривања (нема надвишења као код електролучног споја).

Ипак, процес *FSW* је повезан са извесним бројем дефеката. Недовољна варна температура, 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 (ефекат тунела представља запремински дефект. Локација дефекта зависи од легуре као и од услова заваривања, обично настаје на страни напредовања трна алат) 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.

Недостаци поступка *FSW* су:

- Постојање рупе на крају процеса заваривања, када је алат извучен из радног комада (настанак рупе је условљен смањивањем силе, температуре и трења).
- Потребна велика (до 200 *kN*) вертикална (аксијална) сила (неопходно је да се ослободи довољна енергија како би се омогућио процес заваривања).
- Потребно је добро (до 210 *bar*) стегнути плоче лима које се заварују, да током процеса не би дошло до њиховог померања.
- Мање флексибилна од мануелних лучних процеса (проблеми са варијацијама дебљине и нелинеарни шав – код мануелних поступака, заваривач може одређене неправилности да исправи док се код фриксионог заваривања све унапред задаје и шав је свуда једнак јер нема промене параметара у току рада).
- Често спорије уздужно кретање од других техника процеса заваривања (спорије кретање како би се остварила довољна количина енергије која обезбеђује тестасто стање материјала).
- Не може се вршити заваривање код кога се захтева додавање материјала
- Мора се користити ослона плоча (додатни трошак за израду плоче у односу на конвенционалне поступке) [6].

4. 3 Технолошки 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), трансляторна 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 експериментално. Као параметри процеса, одређују се и одговарајући геометријски параметри појединих елемената алата [6].

Најважнији технолошки параметри:

- Угаона брзина окретања алата – утиче на брзину заваривања
- Транслаторна брзина алата – утиче на брзину заваривања
- Аксијална сила – одржава позицију алата

Број обртаја и трансляторна брзина алата

Постоје две брзине кретања алата које треба посматрати код поступка FSW . Угаона брзина којом се окреће алат и трансляторна брзина која одређује брзину заваривања посматраног материјала односно брзина заваривања (слика 19.) Ова два параметра имају велики значај код поступка FSW. Они морају бити правилно одабрани, да би се обезбедило успешно и ефикасно одвијање процеса FSW.

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 празнине 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 шавова, 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.

Транслаторна брзина је истовремено и брзина заваривања и она зависи од механичких својстава и дебљине материјала лимова [6].

Силе заваривања

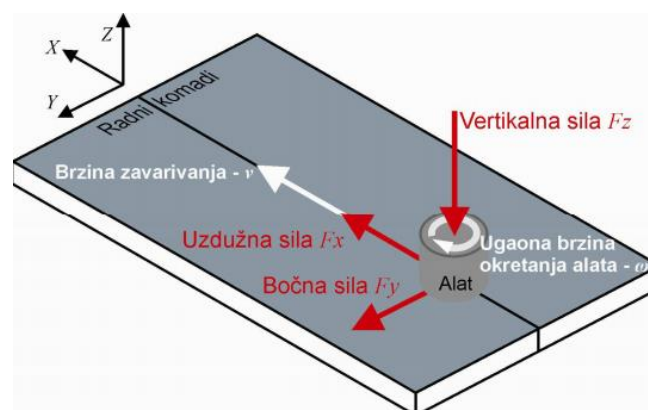
Силе које делују на алат током процеса *FSW* су: вертикална или аксијална, уздужна или лонгитудинална и бочна сила.

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 своју 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 заварених делова. 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, 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 шава.

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 постигнути компромис, јер услови који фаворизују неке силе (нпр. Висок унос топлоте, мала брзина заваривања) могу бити непожељни са становишта продуктивности и квалитета шава [6]. На слици 19. дат је приказ сила које делују током одвијања процеса *FSW*.



Слика 19. Приказ сила F_x , F_y и F_z , као и брзина V и w [6]

5. Контрола квалитета шави

5.1 Метода контроле квалитета шави без разарања

У методе контроле без разарања спадају:

- визуелна контрола
- димензиона контрола
- пенетрантска контрола
- магнетска контрола
- ултразвучна контрола
- радиографска контрола
- акустична контрола (акустична емисија)

Визуелна контрола – најпростија метода која је зато и најстарија. Визуелном контролом се откривају површинске грешке завареног споја, као што су пукотине, неправилности облика лица и корена вара. Остварује се голим оком или уз помоћ оптичких инструмената, као што су различите лупе уз осветљење. Димензионална контрола подразумева мерење димензија кључних елемената вара, као што су дебљина вара, корен и сл.

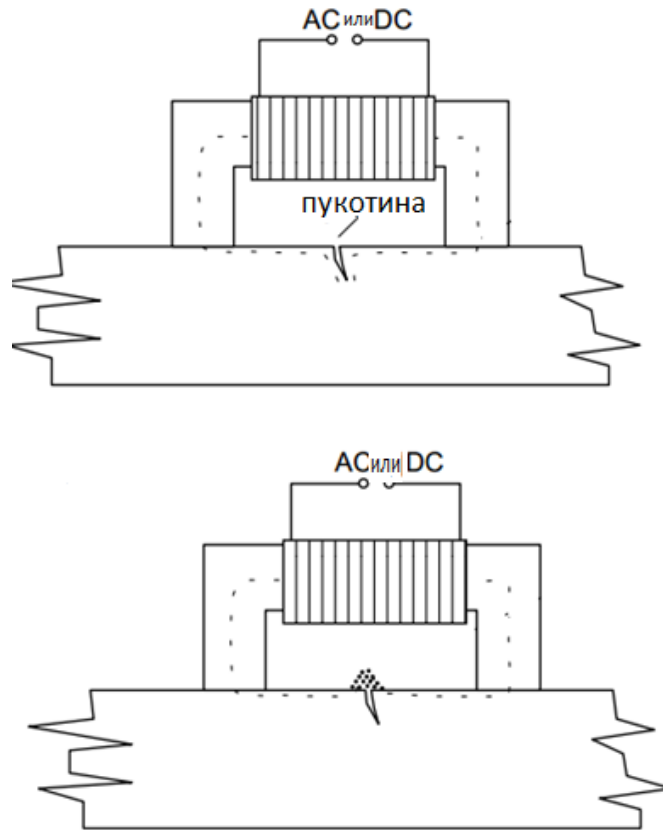
Пенетрантска контрола – служи за испитивање површинских оштећења као што су пукотине и порозност (слика 20). Пенетранти су течности које се наносе на узорак који се испитује. Површина која се испитује се најпре очисти а затим се премазује пенетрантском течношћу, која је флуоресцентне боје ради што боље уочљивости. Када се нанесе на површину, пенетрантска течност се увлачи у пукотине вара. Сувишна течност се уклања са површине. Тада се наноси смеша која се зове развијач. Развијач је најчешће беле боје. Његова улога је да вуче пенетрант из пукотине, који оставља траг на развијачу и у зависности од облика тог трага процењујемо карактер пукотине.



Слика 20. Шематски приказ пенетрантске методе [11]

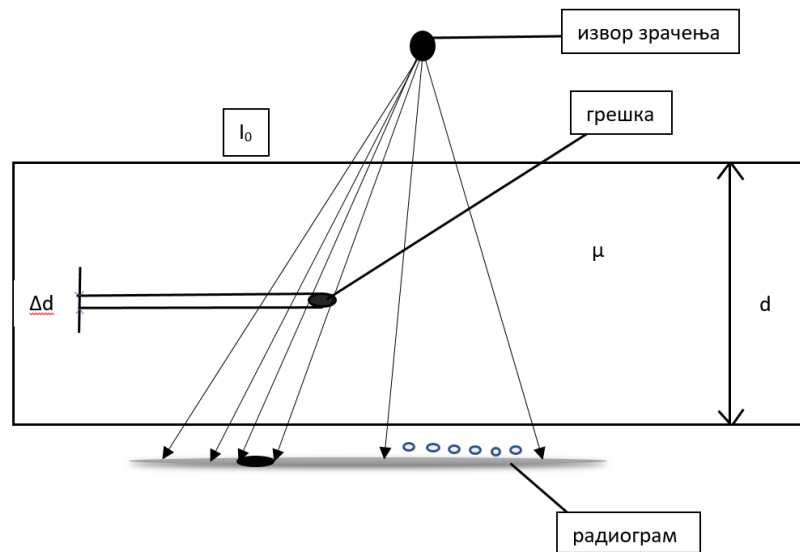
Магнетска контрола – служи за детектовање површинских оштећења, али могу се открити и оштећења која су до дубине од 6 cm феромагнетских материјала (слика 21).

Ради на принципу магнетне индукције. Кроз материјал се пропушта електрична струја која формира магнетно поље. Када се формира магнетно поље кроз материјал, посипају се на његову површину ситне честице магнетичних особина које се лоцирају око пукотина.



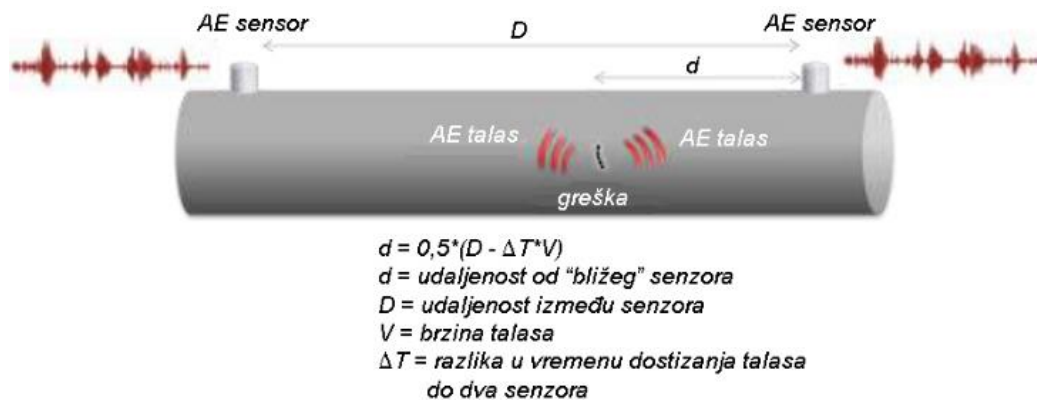
Слика 21. Шематски приказ контроле магнетним честицама [11]

Ултразвучна контрола – користи се за откривање и површинских и дубинских грешака. За ову методу се употребљавају ултразвучни таласи одређене фреквенције, од 0,5 до 10 MHz. Ови таласи пролазе кроз материјал који се испитује (слика 22). Проласком кроз материјал, он даје слику хомогене структуре уколико нема грешака на подлози која се налази иза узорка а на коју падају ултразвучни таласи. Таласи се одбијају од грешке, па се зато траг на подлози неће појавити. На тај начин ћемо на подлози имати и локацију грешке.



Слика 22. Приказ радиографске контроле (I_0 – интензитет зрачења на улазу; d – дебелина узорка; μ – линеарни коефицијент апсорпције зрачења (слабљење зрачења)) [11]

Акустична емисија – заснива се на особини да се након иницијације пукотине дејством неког оптерећења производе звучни таласи који се емитују на врху пукотине (слика 23). Регистровање оваквих таласа би омогућило да се лоцирају пукотине. Након регистравања локације, пукотине се обично даље испитују ултразвучном методом. [11]



Слика 22. Шема мерења акустичном емисијом [11]

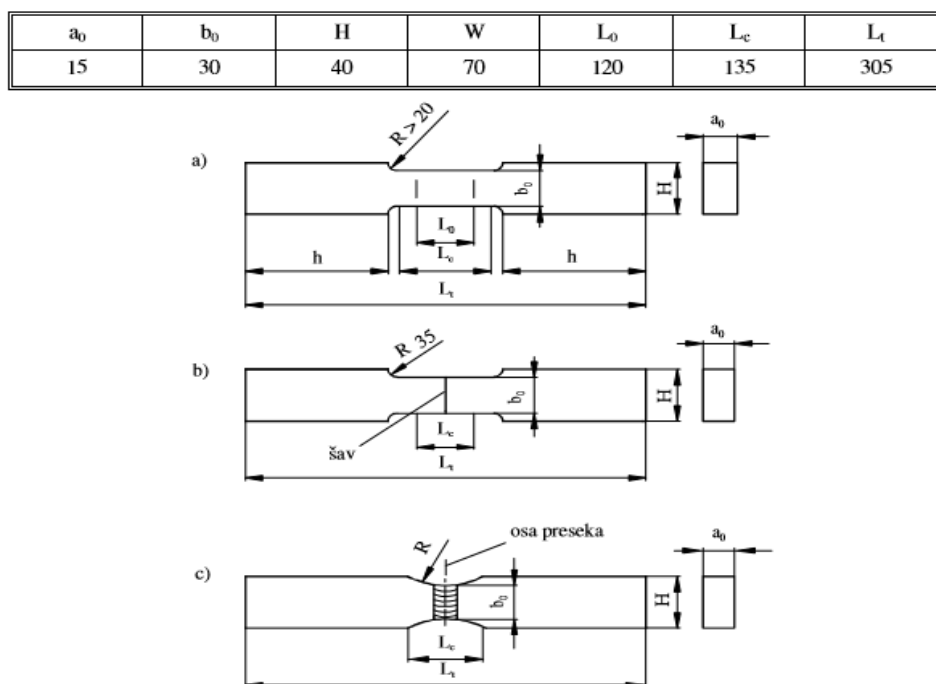
5.2 Методе контроле квалитета шава са разарањем

Контрола шава са разарањем изводи се на узорцима који се исецају из појединих делова завареног споја, или на споју у целини. Углавном се узорци припремају за механичка и металографска испитивања. Од механичких проба најчешће се изводе испитивање затезањем, испитивање савијањем, испитивање ударне жилавости, а од металографских макроскопско и микроскопско испитивање [11].

5.2.1 Испитивање затезањем

Овим се испитивањем одређује отпорност завареног споја на дејство спољних затежућих сила. Уопште се пробом на затезање одређује јачина на кидање (R_m , МПа), издужење (A_5 , A_{11} , %) и сужење (Z , %). Приликом овог испитивања, најпре се одређују механичке особине основног материјала (слика 24 а), а затим завареног споја: на пробама са паралелним (слика 24 б) и удубљеним боковима (слика 24 ц). Радна или мерна дужина незаварене пробе треба да буде:

$$L_0 = 5 \cdot d_0$$



Слика 24. Пробе за испитивање затезањем: а) основног материјала, б, ц) заварених спојева [11]

Циљ испитивања затезањем је да се одреде следеће карактеристике основног материјала: Затезна чврстоћа (јачина на кидање):

$$R_m = \frac{F_m}{A_0}, \text{ MPa}$$

Релативно процентуално издужење:

$$A_s = \frac{\Delta L}{L_0} * 100, \%$$

Напон течења или технички напон течења:

$$R_p = \frac{F_p}{A_0} \text{ или } R_{0.2} = \frac{F_{0.2}}{A_0}, \text{ MPa}$$

Модул еластичности:

$$E = \frac{F * L_e}{\Delta L * A_0}, \text{ MPa}$$

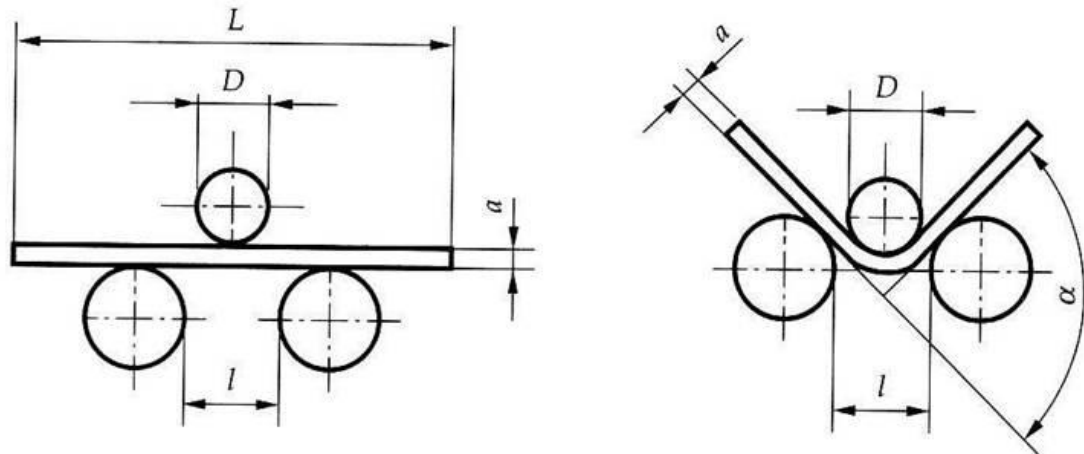
јачина метала шав:

$$R_m = 0.926 * \frac{F_m}{A_0}, \text{ MPa}$$

Где се коефицијентом 0.926 коригује привидно повећање јачине настало као последица ометеног истезања због облика пробе, тј. троосног напонског стања. Приликом анализе добијених резултата, треба имати у виду чињеницу да се заварен спој састоји од основног материјала, зоне утицаја топлоте и претопљеног и измешаног материјала. Механичке особине споја у целини не могу се одредити по принципу најслабије карике у ланцу, будући да и најслабија компонента у завареном споју ојачава због ометаног деформисања. Емпиријска је чињеница да се проба углавном разара у ЗУТ-у, што значи да је основни материјал ослабљен деловањем термичких циклуса. Супротно, заварени спојеви са великим дефектима (укључи троске, поре, непровар) кидају се на местима грешки. Издужење се при испитивању не мери, јер се проба састоји из три различита материјала (ОМ, ЗУТ, шав), који се и друкчије издужују [11].

5.2.2 Испитивање савијањем

Резултати добијени при испитивању савијањем служе за процену пластичности завареног споја. Заварени узорци се после одговарајуће припреме подвргавају дејству силе савијања. Ако се за време савијања пробе постигне најмања тражена вредност угла савијања без појаве прслине, то је резултат испитивања позитиван. Ако се у току испитивања уоче у шаву мале прслине резултат је негативан под условом да је угао савијања мањи од траженог.

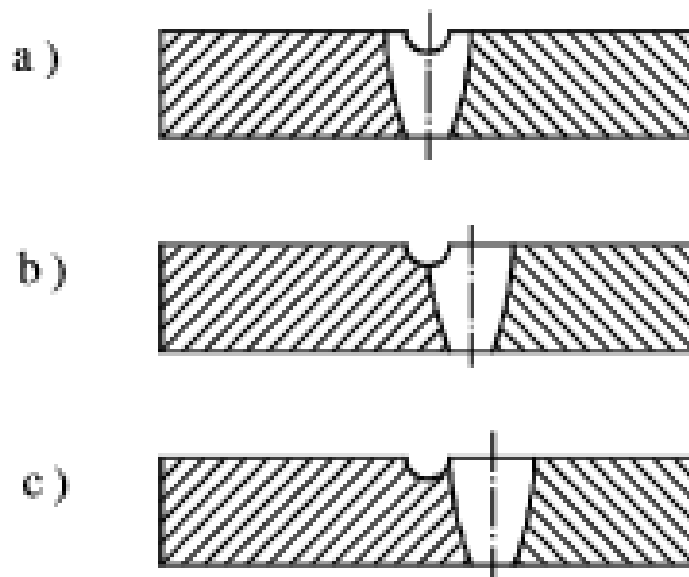


Слика 25. Испитивање савијањем a -дебљина узорка, D -пречник ваљка, L -дужина узорка, l -расстојање између ослонаца α -угао савијања [11]

Испитивање савијањем које има за циљ да се одреди деформациона способност шава и зоне утицаја топлоте, изводи се према стандардизованим условима датим на слици 25. Две пробе, једна са лицем шава у зони затезања, а друга са кореном шава у тој зони, испитују се непрекидним савијањем брзином око 2 mm/s , све до појаве прслине величине преко 2 mm . Мера пластичности је угао савијања при појави прслине [11].

5.2.3 Испитивање ударне жилавости

Циљ овог испитивања је да се одреди отпорност материјала на дејство ударних динамичких сила. Стандардизована ударна жилавост одређује се на сучеоним спојевима дебљине преко 10 mm, јер то одговара стандардном попречном пресеку епрувете (пробе) за методу Шарпи. Одређује се жилавост: метала шави, зоне стапања и зоне утицаја топлоте (слика 26) [11].



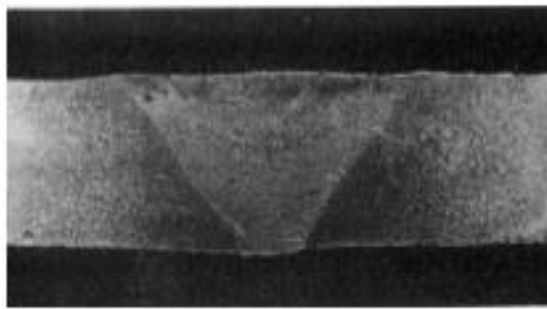
Слика 26. Пробе за испитивање жилавости [11]

Ударна жилавост одређује се помоћу Шарпијевог клатна на коме се читава расположиви рад (A_1) и неутрошени рад (A_2) и затим рачуна утрошени рад за лом епрувете (A_0):

$$A_0 = A_1 - A_2, J$$

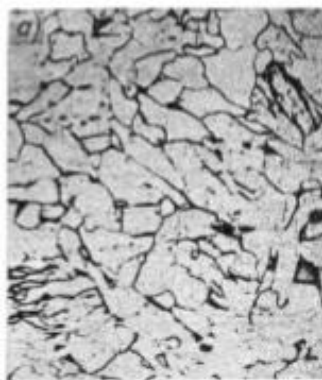
5.3 Металографска испитивања

Разликују се макроскопска и микроскопска испитивања. Макроскопска испитивања се заснивају на посматрању, голим оком или са лупом повећања до $20\times$ малог узорка исеченог из завареног споја. После брушења и полирања површине попречног пресека добија се тзв. "шлиф", који се нагриза специјалним хемијским средством. Нагризање омогућава да се уоче метал шав, ЗУТ и основни метал (слика 27). На основу макроскопских испитивања утврђује се линија стапања, регуларност зоне утицаја топлоте, као и грешке облика шавови и спољни мехурови, налепине, укључци треске и сл.



Слика 27. Макроструктура завареног споја [11]

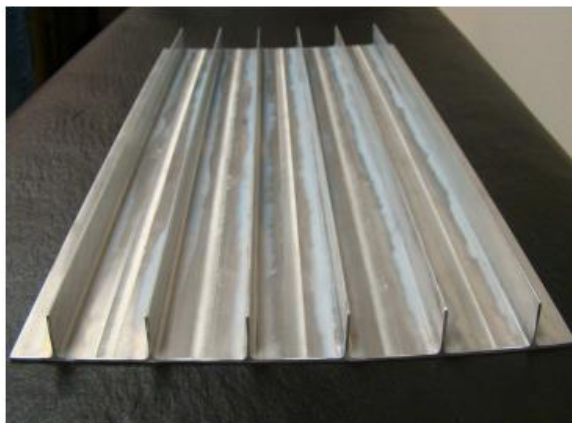
Микроскопска испитивања заснивају се на посматрању пробе под микроскопом при повећању $200-500\times$ (и више). После полирања и нагризања пробе, постаје видљива микроструктура шавови и завареног метала. Груби кристали у шаву или зони утицаја топлоте указују на прегревање шавови (слика 28). Овакви спојеви су обично крти што се може поправити ако се заварени део нормализационо жари чиме се добија уједначена и ситнозрнаста структура [11].



Слика 28. Микроскопска метода [11]

6. Алати и машине у практичној примени *FSW* поступка у индустрији транспорта

Примена заваривања поступком *FSW* у индустрији почела је најприје 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*. Бродоградња је дакле први сектор у коме је поступак *FSW* добио своју пуну примену. У овој индустријској грани поступак *FSW* се користи у изградњи палуба (Слика 31.), бокова брода, подова, преграда, конструкције брода, јарбола, чамаца за једрење итд., закључно са платформама за слетање хеликоптера на бродовима. Последњих година поступак *FSW*, се интензивно користи у производњи железничких вагона, вагона цистерни, путничких вагона, трамваја, теретних вагона, тела контејнера, итд. При изради возова нове генерације поступак *FSW* се користи при заваривању: носеће конструкције, страница воза, кровова, подова (Слика 32.) и многих других елемената који се израђују од легура алуминијума. Уместо традиционалних поступака заваривања, сада се у железничкој индустрији користи искључиво поступак *FSW*.



Слика 31. Заваривање палубе брода [6]

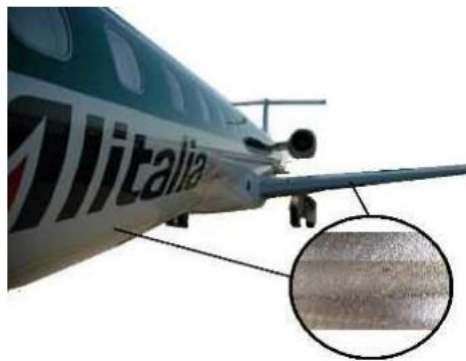


Слика 32. Производња подова у железничкој индустрији [6]

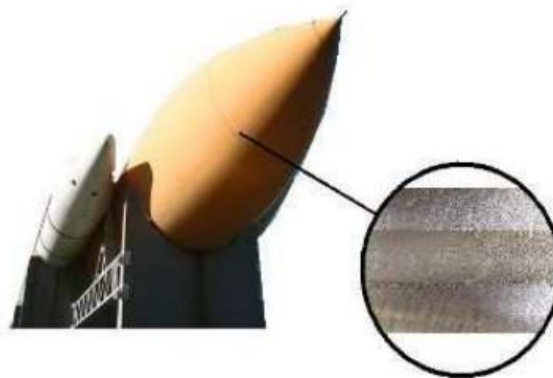
Добре карактеристике и висока поузданост заварених спојева добијених поступком *FSW* дошле су до изражаја у изради великог броја различитих делова у авио и свемирској индустрији. Код *Space Shuttle* – а спојеви спољашњих резервоара за гориво се раде

искључиво поступком *FSW*. 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 Боинг је скраћено са 23 на 6 дана, а укупни трошкови су смањени за 60%.

Примери примене поступка *FSW*, у авио и свемирској индустрији дати су на Слици 33. и 34.



Слика 33. Заваривање трупа авиона коришћењем поступка *FSW* [6]



Слика 34. Заваривање резервоара ракете коришћењем поступка *FSW* [6]

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 и смањује 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. Примена у аутомобилској индустрији је и код производње бандажа.

Заваривања поступком *FSW*, користи се и при производњи: кућишта електромотора, расхладних плоча, кухињске опреме, беле технике, бензинских резервоара и плинских боца, итд.

Применом поступка *FSW*, једнако добри резултати добијени су и при спајању лимова од Cu , Zn , Mg и њихових легура, затим код многих врста челичних лимова али и код комбинација различитих метала, као што је Ti 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 поступком у нормалним спољашњим условима. Али код заваривања челика са великим садржајем легирајућих елемената, 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 двострано [6].

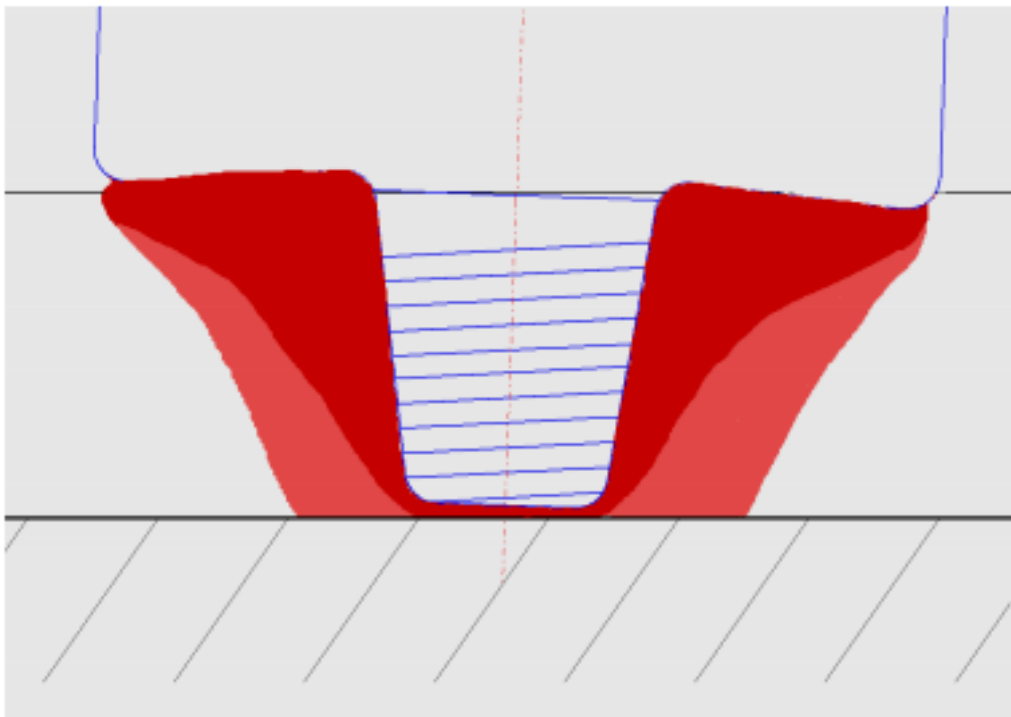
Дизајн алата је критичан фактор који може да утиче на побољшања, квалитет шави и максималну брзину заваривања. Пожељно је да материјал који се користи за израду алата поседује довољну чврстоћу и тврдоћу на температури заваривања. Даље би требало да има добру отпорност на оксидацију и ниску топлотну проводљивост да би се смањио губитак топлоте и топлотна оштећења на машинама.

Побољшања у конструкцији алата су показала велика унапређења продуктивности и квалитета. Институт за заваривање *TWI* је развио специјално конструисане алате и на тај начин повећао дебљине плоча које могу да се заварују. Пример је спирала која има зашиљен трн алата где се постиже бољи проток материјала. Додатне конструкције алата укључују *Trifluete* и *Trivex* серију. *Trifluete* је сложен систем од три зашиљена трна алата са завојницом, који побољшавају кретање материјала око алата, односно омогућавају боље мешање алата. *Trivex* серија користи једноставније нецилиндричне трнове алата, који доприносе смањењу сила које делују на алат.

Већина алата има конкаван профил чела алата, који спречава да материјал који је изашао услед продирања трна алата остане испод чела алата. *Trifluete* серија алата користи алтернативни систем са низом концентричних жљебова који су намењени да произведу додатно кретање материјала у горњим слојевима шави [6].

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 шавва. Продирање испод површине материјала повећава притисак испод алата, а то може довести до закривљења осе алата од 2° до 4° , као што је приказано на слици 35. 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 плочу ослањања, што може довести до лома трна алата или до лошег квалитета шавва. 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 шавва. На Институту за заваривање *TWI*, 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 36. дат је приказ система за контролу дубине продирања чела алата [6].



Слика 35. Продирање чела алата у материјал и угао нагиба осе алата [6]



Слика 36. Систем за контролу дубине продирања чела алата у материјал који се састоји од два помоћна ваљка [6]

6. 1 Машине за FSW заваривање

Машине за заваривање поступком FSW, највише су развијене у скандинавским земљама и у Јапану. Највећи број патената из области конструктивних изведби машина има у Јапану. Машина за дуге шавове развијена од „ESAB“ (Шведска) (Слика 37.), користи се у „Marine Aluminium Werft“ (Норвешка), за заваривање бродских панела и за железничке вагоне. Ова машина се користи и за: тешке профиле, *H*-носаче, *T*-носаче и платформе; израђују се панели дужине 6 *m* x 16 *m* и висине до 155 *mm*. Код израде носача дужина је без ограничења, висина до 300 *mm* и ширина до 400 *mm*. Материјали који се заварују су Al легуре, дебљине од 1.6 *mm* до 15 *mm*. Легура алуминијума (AA6082-T6) дебљине 5 *mm*, заварује се брзином од 0.7 *m/min* до 1.0 *m/min*. Машина је у целини аутоматизована. „ESAB“ производи и машине мањег радног простора, од 1 *m* до 2 *m* (Слика 38.). Последњих година у TWI институту израђен је прототип машине за заваривање са радним простором 3.3 *m* x 4 *m* x 1.5 *m* и брзином заваривања од 1.7 *m/min* [6].



Слика 37. Машина за заваривање поступком FSW, за дуге шавове произведена у „ESAB“-у [6]



Слика 38. Мања машина за заваривање поступком FSW произведена у „ESAB“-у [6]

Закључак

У раду је представљен нови метод спајања легура алуминијума, који се изводи у чврстом стању без топљења материјала познатији под именом Фрикционо спајање (*Friction Stir Welding-FSW*). Овај поступак је врло актуелан у свету, а у савременој индустрији има велику примену. Због својих карактеристика, примјењује се скоро у свим гранама индустрије (аутомобилској, железничкој, свемирској, бродоградњи). Поступак *FSW* је могуће аутоматизовати, што доводи до повећања продуктивности и смањења трошкова производње. *FSW* је еколошки чист процес, 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. Због своје способности заваривања разнородних материјала има изузетно значајну примену због све израженије потребе за новим материјалима и њиховим спајањем. Са обзиром на све већу примену, користи се овај нискоенергетски поступак код кога се користи чиста механичка енергија, у односу на друге високоенергетске поступке који су по својој природи штетни по околину. Због енергетске ефикасности, остварују се значајне уштеде енергије на глобалном нивоу. Како је процес недовољно истражен појављује се потреба за истраживањем технолошких параметара, првенствено за легуре разних материјала које се не могу спајати конвенционалним поступцима заваривања.

Литература

- [1] Данијела Д. Живојиновић (2013): Примена механике лома на процену интегритета заварених конструкција од легура алуминијума, докторска дисертација, Универзитет у Београду
- [2] Хрвоје Кос (2014): Заварљивост алуминијумске легуре AW 6082, дипломски рад, Универзитет у Загребу
- [3] Technical Handbook-ESAB: Friction Stir Welding
- [4] Katarina Leković, Varun Sharma, Nenad Grujović, Dragan Adamović, Slobodan Mitrović, Fatima Živić (2017): High friction coefficient materials. Paper presented at the 15th International Conference on Tribology, Faculty of Engineering, University of Kragujevac, Serbia, 17-19 May 2017
- [5] J. A. Lee, R. W. Carter, and J. Ding (1999): Friction Stir Welding for Aluminium Metal Matrix Composites, Marshall Space Flight Center, Alabama 1999
- [6] Студија случаја (2012): Заваривање трењем, WBC – Vmnet, Подгорица, 2012.
- [7] Marcello Cabibbo, Archimede Forcellese and Michela Simoncini(2016): New Approaches to the Friction Stir Welding of Aluminium Alloys, Department of Industrial Engineering and Mathematics, Marche Polytechnic University, Ancona, Italy, ISBN 978-953-51-2597-6
- [8] Мирослав Б. Ђурђановић (2003): Перспектива примене топлоте генерисане трењем у обради метала. Рад је презентован на 8. Интернационалној конференцији трибологије, Београд, 8.- 10. Октобра 2003.
- [9] Душан С. Стаменковић, Мирослав Б. Ђурђановић, Драган Ј. Митић: Заваривање поступком FSW, Ниш 2006, UDK/UDC: 621.791.14
- [10] Данијела Д. Живојиновић (2013): Анализа раста прслине у зонама споја фриксионо завареног мешањем коришћењем проширене методе коначних елемената, Универзитет у Београду, UDK/UDC: 621.791.05:669.715
- [11] Лука Радуловић, Лазар Марковић, Филип Савић, Марко Радисављевић (2017): Фриксионо заваривање алуминијума, семинарски рад из Мерења, контроле и квалитета, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу
- [12] G.Thamizharasi, S. Kathiresan (2012): Friction Stir Welded Cast and Wrought Aluminium Alloy Joint and & Effect of Process Parameters, International Journal of Computer Trends and Technology-volume 3 Issue 2 Number 3-Mar 2012
- [13] K. Kimapong, T. Watanabe (2005): Friction Stir Welding of Aluminium Alloy to Steel, Niigata University, Japan, Vol.46, No. 4, pp. 835 to 841

- [14] Grain Refinement, Thermal Stability and Tensile Properties, Alexandre Goloborodko, Tsutomu Ito, Xiaoyong Yun, Yoshinobu Motohashi, Goroh Itoh (2004): Friction Stir Welding of Commercial 7075 – T6 Aluminium Alloy: Ibaraki University, Japan, Vol. 45, No. 8, pp. 2503 to 2508
- [15] R. R. Ambriz and V. Mayagoitia (2011): Welding of Aluminium Alloys, Mexico, pp. 63-86 ISBN 978-953-307-734-5
- [16] N. T. Kumbhar and G. K. Dey (2011): Friction Stir Welding of Aluminium Alloys, Mumbai, India, Asian J. Exp. Sci., Vol. 22, No. 2, 2008, pp. 63-74
- [17] A. Suresh Babu, C. Devanathan (2013): An Overview of Friction Stir Welding, Anna University, India, ISSN:2249-5762
- [18] K. Colligan (1999): Material Flow Behavior during Friction Stir Welding of Aluminium, Supplement to the Welding Journal, July 1999
- [19] Wei Yuan (2008): Friction stir spot welding of aluminium alloys, Missouri University of Science and Technology
- [20] Daniela Lohwasser and Zhan Chen (2010): Friction stir welding, Cambridge, ISBN 978-1-84569-771-6
- [21] Rajiv Sharan Mishra, Partha Sarathi De Nilesh Kumar (2014): Friction Stir Welding and Processing, Springer, DOI 10.1007/978-3-319-07043-8_1
- [22] N Ravinder Reddy, G Mohan Reddy (2016): Friction stir welding of aluminium alloys – a review, Vidya Jyothi Institute of Technology, Hyderabad, International Journal of Mechanical Engineering and Technology, Volume 7, Issue 2, pp. 73-80
- [23] Sheikh Mohammed Shakil, Yagnesh B Chauhan (2015): Optimization of Friction Stir Welding Process Parameters for Welding Aluminium Alloys, Department of Mechanical Engineering, Dahod, International Journal of Science Technology and Engineering, Vol. 2, Issue 02, ISSN:2349-784X
- [24] Gene Mathers (2002): The welding of aluminium and its alloys, Cambridge, ISBN:9781855737631
- [25] R. Rai, A. De, H. K. D. H. Bhadeshia and T. DebRoy, Review (2011): Friction stir welding tools, Institute of Materials, Minerals and Mining, DOI:10.1179/1362171811Y.0000000023
- [26] I.M. Hutchings (2016): Leonardo da Vinci's studies of friction, Wear, Vol 360–361, pp 51–66
- [27] P.J. Blau (2001): The significance and use of the friction coefficient, Tribology International, Vol. 34, No. 9, pp. 585-591
- [28] H. Czichos, T. Saito, L. Smith (Eds.)(2006): Springer Handbook of Materials Measurement Methods, Berlin

- [29] P.J. Blau (2001): Introduction to the Special Issue on Friction Test Methods for Research and Applications, Tribology International, Vol. 34, No. 9, pp. 581-583
- [30] N.K. Myshkin, A.Y. Grigoriev, S.A. Chizhik, K.Y. Choi, M.I. Petrokovets (2003): Surface roughness and texture analysis in microscale, Wear Vol. 254, pp. 1001–1009
- [31] E. Gnecco, E. Meyer (2015): Elements of Friction Theory and Nanotribology, Cambridge University Press
- [32] G. Straffelini (2015): Friction and Wear, Methodologies for Design and Control, Springer Tracts in Mechanical Engineering, Springer International Publishing Switzerland
- [33] R.S. Mishra, P. Sarathi, N. Kumar (2014): Fundamentals of the Friction Stir Process, Springer International Publishing Switzerland
- [34] D. Maharaj, B. Bhushan (2015): Friction, wear and mechanical behavior of nano-objects on the nanoscale, Materials Science and Engineering, Vol. 95, pp. 1–43
- [35] Y. Tian, N. Pesika, H. Zeng, K. Rosenberg, B. Zhao, P. McGuiggan, K. Autumn, J. Israelachvili (2006): Adhesion and friction in gecko toe attachment and detachment, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, Vol. 103, No. 51, pp. 19320–19325
- [36] Material Properties, Engineering toolbox, www.engineeringtoolbox.com.
- [37] Y-G. Kim, I-J. Kim, Y-P. Kim, S-M. Joo (2016): A Feasibility Study on the Three-Dimensional Friction Stir Welding of Aluminum 5083-O Thin Plate, Materials Transactions, Vol. 57, No. 6, pp. 988 – 994
- [38] J-G. Ren, L. Wang, D-K. Xu, L-Y. Xie, Z-C. Zhang (2017): Analysis and Modeling of Friction Stir Processing-Based Crack Repairing in 2024 Aluminum Alloy, Acta Metall Sin (Engl. Lett.), Vol. 30, pp. 228–237
- [39] A. Ramadan S. Essa, M. Mohamed, Z. Ahmed, A-K. Yousif, A. Mohamed, A.E. El-Nikhai (2016): An analytical model of heat generation for eccentric cylindrical pin in friction stir welding, The Journal of Materials Research and Technology, Vol. 5, pp 234-240
- [40] E Maleki (2015): Artificial neural networks application for modeling of friction stir welding effects on mechanical properties of 7075-T6 aluminum alloy, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. Vol. 103, No. 012034.
- [41] P. Singh, P. Biswas, S.D. Kore (2016): A three-dimensional fully coupled thermo-mechanical model for Self-reacting Friction Stir Welding of Aluminium AA6061 sheets, J. Phys.: Conf. Ser. 759 01204
- [42] B. Panda, A. Garg, Z. Jian, A. Heidarzadeh, L. Gao (2016): Characterization of the tensile properties of friction stir welded aluminum alloy joints based on axial force, traverse speed, and rotational speed, Front. Mech. Eng., Vol. 11, pp. 289–298

- [43] J-H Cho, S.H. Han, C.G. Lee (2016): Cooling effect on microstructure and mechanical properties during friction stir welding of Al-Mg-Si aluminum alloys, *Materials Letters*, Vol. 180, pp. 157–161
- [44] W. Zhang, Y. Shen, Y. Yan, R. Guo (2017): Dissimilar friction stir welding of 6061 Al to T2 pure Cu adopting tooth-MARK shaped joint configuration: Microstructure and mechanical properties, *Materials Science & Engineering A*, Vol. 690, pp. 355–364
- [45] M.M. Hasan, M. Ishak, M.R.M. Rejab (2017): Effect of backing material and clamping system on the tensile strength of dissimilar AA7075-AA2024 friction stir welds, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, In Press, pp. 1-17, DOI: 10.1007/s00170-017-0033-7
- [46] S. Aliasghari, M. Ghorbani, H. Karami, M. Movahedi (2017): Effect of plasma electrolytic oxidation on joining of AA 5052 aluminium alloy to polypropylene using friction stir spot welding, *Surface & Coatings Technology*, Vol. 313, pp. 274–281
- [47] Q. Zheng, X. Feng, Y. Shen, G. Huang, P. Zhao (2017): Effect of plunge depth on microstructure and mechanical properties of FSW lap joint between aluminum alloy and nickel-base alloy, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 695, pp. 952-961
- [48] S. Zhao, Q. Bi, Y. Wang, J. Shi (2017): Empirical modeling for the effects of welding factors on tensile properties of bobbin tool friction stir-welded 2219-T87 aluminum alloy, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 90, pp. 1105-1118
- [49] M. Ahmadnia, S. Shahraki, M.A. Kamarposhti (2016): Experimental studies on optimized mechanical properties while dissimilar joining AA6061 and AA5010 in a friction stir welding process, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 87, pp. 2337–2352
- [50] G. Sun, Y. Chen, S. Chen, D. Shang (2017): Fatigue modeling and life prediction for friction stir welded joint based on microstructure and mechanical characterization”, *International Journal of Fatigue*, Vol. 98, pp. 131–141
- [51] Антонио Сатиновић, (2016): Анализа пуцања заварених спојева алуминијумских оквира за бицикле, дипломски рад, Универзитет у Загрбу, http://repozitorij.fsb.hr/7072/1/Satinovic_2016_diplomski.pdf
- [52] Gene Mathers (2002): *The welding of aluminium and its alloys*, Cambridge England, ISBN:9781855737631
- [53] Chalmers, Bruce (1977): *Principles of Solidification*. Huntington, New York: Robert E. Krieger Publishing Company, str. 254, ISBN: 0-88275-446-7
- [54] Michael Shillingberg, The Aluminum Association, Inc. and John Green, JASG Consulting (2007): *Aluminum Applications in the Rail Industry*