

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ
ТЕХНОЛОШКО-МЕТАЛУРШКОГ ФАКУЛТЕТА
УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Игора Радисављевића, дипломираног инжењера металургије и металних материјала.

Одлуком бр.35/27 од 03.03.2014. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Игора Радисављевића, дипломираног инжењера металургије и металних материјала, под насловом

**УТИЦАЈ ПАРАМЕТАРА ЗАВАРИВАЊА НА СВОЈСТВА ЗАВАРЕНИХ СПОЈЕВА
АЛУМИНИЈУМСКИХ ЛЕГУРА ДОБИЈЕНИХ ПОСТУПКОМ ЗАВАРИВАЊА
ТРЕЊЕМ АЛАТОМ**

После прегледа достављене Дисертације и других пратећих материјала и разговора са Кандидатом, Комисија је сачинила следећи

РЕФЕРАТ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Кандидат Игор Радисављевић, дипл. инж. металургије, дипломирао је 30.11.2005. године на Технолошко-металуршком факултету, Универзитета у Београду и стекао стручни назив Дипломирани инжењер металургије и металних материјала.

2008. година Кандидат Игор Радисављевић, дипл. инж. металургије, је школске 2008/2009. године уписао докторске академске студије трећег степена на Технолошко-металуршком факултету, Универзитета у Београду. У оквиру изабраног студијског програма Металуршко инжењерство положио је све испите.

06.10.2011. Кандидат Игор Радисављевић, дипл. инж. металургије је одбранио завршни испит.

21.03.2013. Кандидат Игор Радисављевић, дипл. инж. металургије је Наставно-научном већу Технолошко-металуршког факултета пријавио тему за израду докторске дисертације под насловом: „Утицај параметара заваривања на својства заварених спојева алуминијумских легура добијених поступком заваривања трењем алатом“.

28.03.2013. Наставно научно веће Технолошко-металуршког факултета у Београду на својој седници усвојило је састав Комисије за оцену подобности кандидата и научне заснованости предложене теме.

30.05.2013. На седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета донета је Одлука о одобравању предлога теме докторске дисертације кандидата Игора Радисављевића, дипл. инж. металургије, под насловом: „Утицај параметара заваривања на својства заварених спојева алуминијумских легура добијених поступком заваривања трењем алатом“. За ментора ове докторске дисертације именован је др Ненад Радовић, ванредни професор ТМФ-а.

08.07.2013. На седници Већа научних области техничких наука Универзитета у Београду дата је сагласност на предлог теме докторске дисертације кандидата Игора Радисављевића, дипл. инж. металургије, под насловом: „Утицај параметара заваривања на својства заварених спојева алуминијумских легура добијених поступком заваривања трењем алатом“.

28.02.2013. На седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета донета је Одлука о именовању чланова Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Игора Радисављевића, дипл. инж. металургије, под насловом: „Утицај параметара заваривања на својства заварених спојева алуминијумских легура добијених поступком заваривања трењем алатом“.

1.2. Научна област дисертације

Истраживања у оквиру ове докторске дисертације припадају научној области Металуршко инжењерство, за коју је матичан Технолошко-металуршки факултет Универзитета у Београду. Ментор др Ненад Радовић, ван. проф. Технолошко-металуршког факултета је до сада из ове области публиковао више од 10 радова у часописима који су на СЦИ листи, руководио израдом две докторске, шест магистарских теза и био члан три комисије одбрањених докторских дисертација. На основу досадашњег искуства, сматрамо да је ментор компетентан да руководи израдом ове дисертације.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Игор Радисављевић, дипл.инж. металургије, рођен је 26.09.1974. године у Књажевцу. Основну и средњу школу завршио је у Београду. Дипломирао је на Технолошко-металуршком факултету у Београду на Одсеку за металургију и металне материјале 30.11.2005. године одбраном дипломског рада под насловом „Модификација површине одливака Al-Si легура млазом плазме“. Од 2006. године ради у Одељењу за металне материјале, Сектора за материјале и заштиту Војнотехничког института, где се бави истраживањима у области металургије и инжењерства металних материјала, испитивањем металних компоненти средстава наоружања и бојне опреме (НВО) која се налазе у развоју и експлоатацији, као и према захтевима цивилног сектора. Због остварених изузетних резултата, за веома кратко време у периоду од 2006. до 2010. године, напредовао је од звања истраживач-сарадник до вишег истраживача. Посебно се стручно и научно исказао у подручју заваривања и заварљивости челика и легура алуминијума, као и у развоју поступка заваривања трењем алатом – Friction Stir Welding. Такође је веома значајно његово ангажовање у подручју побољшања постојеће балистичке заштите борбених возила применом предклопа. Влада великим бројем метода које се користе при испитивању физичких, структурних, механичких и технолошких особина металних материјала. За остварене резултате у области истраживања и развоја НВО похваљен је 2009. године од стране Директора ВТИ-а. Током досадашњег истраживачког рада у Војнотехничком институту константно је ангажован на реализацији задатка „Истраживање у области

металургије и инжењерства металних материјала за НВО“. Непосредно је одговоран за спровођење истраживачких активности везаних за подручје оклопне заштите и заваривање металних материјала. Као члан радног тима, учесник је и на другим истраживачко-развојним и функционалним задацима из надлежности ВТИ-а. Активно је у периоду 2008.-2010. год. учествовао на пројекту Министарства науке и технолошког развоја ТР 19050 „Освајање производње компоненти конструкција поступком заваривања трењем алатом“. У текућем пројектном циклусу (2011.-2014. год.) Министарства просвете, науке и технолошког развоја ангажован је на пројекту ТР 34018 – „Развој технологије производње и заваривања Al-Mg легуре високе чврстоће за примену у конструкцијама друмских и железничких транспортних средстава“. Од 2013. године ангажован је и на пројекту Универзитета одбране „Прилог развоју форензичког инжењеринга у домену анализе узрока и генезе отказа цилиндричних структура“ (2013.-2015. год.). Члан је Друштва за унапређење заваривања у Србији – ДУЗС. Кандидат је активни официр Војске Србије са службеном оценом одличан.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација Игора Радисављевића, дипл. инж. металургије, написана је на 155 страна, у оквиру којих се налази 7 поглавља, са укупно 100 слика, 24 табеле и 156 литературна навода. Докторску дисертацију чине следећа поглавља: Увод, Претходна истраживања, Експериментални део, Резултати, Дискусија, Закључак, Литература и Прилози, као и изводи на српском и енглеском језику.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У Уводу је у општим цртама описан значај проблематике и примене заваривања трењем алатом са освртом на утицај који технолошки параметари имају на заваривање и квалитет завареног споја. Такође, постављени су циљеви и обим истраживања.

У поглављу Претходна истраживања дат је кратак преглед алуминијумских легура са освртом на заварљивост и специфичности њиховог заваривања. Укратко су представљени најзаступљенији класични поступци заваривања алуминијумских легура и металуршки аспекти заваривања термички обрадивих и термички необрадивих алуминијумских легура. Описана је поступак заваривања трењем алатом и објашњени су основни принципи и карактеристике процеса. Објашњена је улога алата и његове геометрије. Наведене су предности и недостаци процеса као и његова применљивост са становишта заваривања других материјала сем алуминијумских легура и практичне примене. С обзиром на комплексност термопластичног процеса заваривања, детаљно су изложени процес формирања споја, течења материјала током заваривања, утицај алата и параметара заваривања на одвијање процеса и добијање завареног споја. Презентоване су и описане специфичности самог процеса а као последица тога и присуство нестандартних области споја, као што су грумен и зона термомеханичког утицаја. У посебном делу приказане су механичке и структурне карактеристике спојева алуминијумских легура серије 2xxx и 5xxx, као типичних представника термички обрадивих и необрадивих легура, заварених FSW поступком.

У поглављу Експериментални део детаљно су представљене активности експерименталног истраживања, дат је опис материјала, методе испитивања и план експеримента. Рад на експерименталном делу истраживања састојао се из две фазе и обухватао је активности везане за овладавање технологијом заваривања трењем мешањем помоћу алата, добијање квалитетног завареног споја без грешака и његову карактеризацију. Спроведене активности имале су за циљ имплементацију и потврду теоријских навода, практично упознавање са карактеристикама и феноменима процеса, дефинисање оптималне геометрије алата, избор параметара заваривања и анализу кумулативног утицаја свих процесних параметара на

карактеристике завареног споја. На основу претходно стечених теоријских сазнања извршено је прилагођавање постојеће опреме захтевима FSW процеса, избор материјала за израду алата и помоћног алата (потпорне плоче) као и израда истих. Током експеримента моделовано је и израђено укупно 23 варијанти алата различите геометрије и конструкције. У првој фази експерименталног рада за заваривање је одабрана добро заварљива алуминијумска легура серије 5xxx - AlMg2,5 (5052-H32). Да би се оценио утицај геометријских карактеристика алата и унете енергије на могућност добијања квалитетног завареног споја и понашање материјала (како завариваног тако и алата) током заваривања, експериментисано је са алатима различитих геометрија и различитим параметрима заваривања. Извршена су механичка и структурна испитивања добијених заварених спојева а након сагледавања и анализе добијених резултата приступило се другој фази експерименталног рада. У другој фази експерименталног рада за заваривање је одабрана тешко заварљива алуминијумска легура високе чврстоће серије 2xxx - AlCu4,5Mg (2024-T351). Добијени заварени спојеви подвргнути су структурним, механичким и корозионим испитивањима. У зависности од фазе експерименталног рада, заваривани су плочасти узорци димензија 200x65x7 mm у првој односно 260x65x6 mm у другој фази. При томе је дужина оствареног завареног споја код сваке појединачне пробе износила око 150 односно 210 mm, респективно. Укупно је заварена 101 проба, од чега 41 у првој и 60 у другој фази експерименталног рада. Параметри заваривања, брзина ротације алата (V_{rot}) и брзина заваривања (V_{zav}), варијани су у широком опсегу од 450 до 1500 obr/min односно од 23 до 380 mm/min, респективно, при чему је однос брзине ротације и брзине заваривања (V_{rot}/V_{zav}) износио од 3,16 до 51,30. Угао нагиба алата у односу на вертикалу износио је 1 и 2°. Испитивања заварених спојева састојала су се од неструктивних и деструктивних метода. Испитивања без разарања обухватала су визуелни преглед, ултразвучну и радиографску контролу као и испитивања пенетрантима а од испитивања са разарањем спроведена су механичка, структурна и корозиона испитивања. Карактеризација добијених заварених спојева спроведена је у 12 корака према утврђеној методологији.

У поглављу Резултати представљени су резултати спроведених испитивања заварених спојева. Прво су, као прелиминарни резултати, приказане и објашњене уочене појаве везане за понашање завариваног материјала под дејством алата а које су перманентно праћене, бележене и анализиране током и након извршеног заваривања. Резултати у овом делу се углавном односе на проблеме који су пратили моделирање и израду одговарајућих алата као и освајање технологије заваривања трећем алатом у почетној фази истраживања. У наставку поглавља приказани су резултати испитивања без разарања, односно визуелне, пенетрантске, радиографске и ултразвучне контроле. Након тога дати су резултати затезних и савојних испитивања, расподеле тврдоће кроз спој, одређивања енергије удара, структурне карактеризације, фрактографске анализе и корозионе постојаности. Упоредо са резултатима затезних испитивања приказана је и изведена величина, ефикасност споја, која представља однос затезне чврстоће споја и основног материјала изражена у процентима. Резултати расподеле тврдоће обрађени су на начин којим је омогућено мапирање и графички приказ простирања карактеристичних области завареног споја. Резултати одређивања енергије удара су математички обрађени тако да је приказан и однос укупних енергија удара завареног споја ($E_{укЗС}$) и ОМ ($E_{укОМ}$), однос енергија стварања прслине завареног споја ($E_{ствЗС}$) и ОМ ($E_{ствОМ}$), однос енергија ширења прслине завареног споја ($E_{ширЗС}$) и ОМ ($E_{ширОМ}$) као и удео енергија стварања и ширења у укупној енергији удара.

Поглавље Дискусија по својој структури прати резултате истраживања. Успостављена је, корелација између геометрије алата и параметара заваривања са финалним микроструктурама и особинама завареног споја. Објашњено је кретање материјала под дејством алата током формирања завареног споја и утицај који геометрија алата има на поступак заваривања и карактеристике добијеног завареног споја. Корозионо понашање је

тумачено у светлу укупних унетих енергија заваривања које зависе од параметара заваривања.

У поглављу Закључци таксативно су наведена и објашњена најважнија нова сазнања до којих је аутор дошао радом на овој дисертацији. На крају дисертације наведена је Литература, која садржи све коришћене референце.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Заваривање А1 легура повишене чврстоће је повезано са бројним потешкоћама, тако да се велики број њих сматра незаварљивим, те се за спајање користе традиционална решења, као на пример заковице (за оплату авиона). Управо у циљу проширења експлоатације постојећих и/или развоја нових А1 легура повишене чврстоће, савремени захтеви су усмерени ка решавању проблема њиховог заваривања, пре свега развијањем поступка заваривања трењем алатом, пошто у њему изостаје топлeње. Овај савремени приступ зато има велики значај, јер је један од циљева рада био и да се освоји технологија заваривања различитих алуминијумских легура повишене чврстоће за које је најизраженији ограничавајући фактор у експлоатацији везан за добијање заварених спојева захтеваних особина

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Коришћена је уџбеничка литература из области заваривања, физичке металургије термомеханичке прераде алуминијумских легура и корозије, затим класични радови из области утицаја структуре на финална својства и корозионо понашање, као и најновији чланци, саопштења и извештаји, који се баве испитивањима утицаја параметара заваривања на својства заварених спојева добијених поступком заваривања трењем алатом. У дисертацији су коришћени резултати саопштени на неколико последњих светских конференција посвећених заваривању трењем алатом.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

За експериментална заваривања коришћена је алатна глодалица прилагођена потребама процеса заваривања трењем алатом. Ограничење коришћене машине, је немогућност мерења и праћења притисне силе, тј. силе у вертикалном правцу дуж z – осе. Овај проблем је делимично превазиђен континуалним мерењем дубине урањања трна алата у основни материјал и положаја чела ваљка алата у односу на површину завариваних узорака. Мерење је вршено постављањем контактнoг микрометра на носач главе у коју је стегнут алат за заваривање и контролом промене растојања у односу на сто глодалице. На овај начин контролисано је да ли током заваривања долази до промене положаја алата дуж z – осе.

Методологија испитивања заварених спојева спроведена је у 12 корака а састојала се од: визуелног прегледа, испитивања пенетрантима, радиографске и ултразвучне контроле, одређивања затезних и савојних карактеристика, расподеле тврдоће, одређивања енергије удара, развоја макро и микроструктуре, испитивања на SEM-у и корозионих испитивања. Испитивања су урађена у складу са одговарајућим стандардима; визуелни преглед - SRPS EN-970, испитивање пенетрантима - SRPS EN 571-1, радиографска контрола - SRPS EN 1435. Затезна испитивања урађена су на епруветама израђеним према стандарду ASTM E-8M а испитивања су спроведена према одредбама стандарда SRPS EN 10002-1. Епрувете за затезна испитивања у свом радном делу имају обухваћен ОМ, ЗУТ, ЗТМУ и грумен, у дужини која је већа од 4 дебљине узорка. Овакав начин израде и испитивања епрувета омогућио је одређивање затезних карактеристика споја као целине и место прелома. Испитивање савојних карактеристика заварених спојева урађено је савијањем у три тачке, око лица и око корена споја, према одредбама стандарда SRPS C.T3.051 и SRPS C.T3.055. Ова испитивања

су спроведена у циљу одређивања деформационих способности завареног споја. Бележена је величина угла при појави прве прслине као и сила при којој долази до појаве прве прслине. Након појаве прве прслине, савијање је настављено све до потпуног прелома епрувете или достизања угла од 180° . Расподела тврдоће одређивана је према одредбама стандарда SRPS C.A4.040 и SRPS C.T3.051 на узорцима за макроструктурну анализу. Коришћењем узорака на којима је развијена макроструктура омогућено је прецизно позиционирање и контролисање места мерења (ОМ, ЗУТ, ЗТМУ и грумен). Великим бројем извршених мерења по једном узорку (183 у уздужном и 187 у вертикалном правцу), омогућено је мапирање и графички приказ простирања карактеристичних области завареног споја. Енергија удара одређивана је у складу са одредбама стандарда SRPS EN 10045-1 и SRPS C.T3.051. Испитивања су изведена на собној температури на инструментираном клатну које поседује интегрисани систем за аквизицију података чиме је омогућено да се поред укупне енергије удара утрошене за прелом, одреде и енергија стварања и ширења прслине. Микроструктурна испитивања су извршена оптичком микроскопијом и скенирајућом електронском микроскопијом, уз употребу софтвера за квантитативну анализу слика. Фрактографија је извршена на скенирајућем електронском микроскопу опремљеним са уређајем за енергетски дисперзивну спектроскопију X-зрака (EDAX), који је коришћен за детекцију и анализу честица секундарних фаза. У циљу добијања што квалитетније површине металографских узорака, за припрему је поред стандардних метода брушења брусним папирима и полирања дијамантским пастама коришћена и метода електролитичког полирања и нагризања. Корозиона испитивања имала су за циљ анализирање понашање спојева заварених FSW поступком у корозионој средини а спроведена су према одредбама стандарда ASTM G 34-01 и ASTM G 110-03.

3.4. Применљивост остварених резултата

Тема ове дисертације је проистекла из константних захтева индустријског сектора за коришћењем алуминијумских легура које ће имати захтевана механичка и корозиона својства, уз ниже трошкове производње, побољшану енергетску ефикасност и ниже трошкове одржавања у току експлоатације. Овај савремени приступ зато има велики значај, јер је један од циљева рада био и да се освоји технологија заваривања различитих алуминијумских легура повишене чврстоће. На овај начин се отвара могућност за елиминацију спајања путем заковица (летелице) или за формирање разнородних спојева од којих нпр. биметали могу имати веома велике димензије. Резултати истраживања добијени у овој дисертацији представљају солидну основу за коначну примену у средстваима наоружања и војне опреме.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат Игор Радисављевић је током израде докторске дисертације испољио изузетну стручност и систематичност у припреми и реализацији експеримената, коришћењу различитих техника карактеризације материјала и анализи резултата. Кандидат је оспособљен за свеобухватни приступ сваком сегменту истраживања и поседује све квалитете који су неопходни за самостални научни рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Остварени су следећи научни доприноси:

- одређен је утицај примењених параметара заваривања на величину, облик и положај карактеристичних зона завареног споја;

- одређен је утицај примењених параметара заваривања на микроструктуру завареног споја, односно на промену морфологије зрна у карактеристичним зонама споја;
- утицај процесних параметара на корозиону постојаност оних заварених спојева чије су механичка својства задовољила прописане вредности, према стандардним испитивањима;
- утврђени су место настанака и механизам раста прскотине и њихова зависност од примењених услова заваривања.
- истражен је и окарактерисан утицај који геометрија алата има на поступак заваривања и карактеристике добијеног завареног споја;
- ближе је разјашњено кретања материјала под дејством алата током формирања завареног споја;
- освојена је технологија заваривања трењем алатом алуминијумских легура из два различита система легирања, AA5052 и AA2024, и дефинисани технолошки параметари заваривања;

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Резултати истраживања представљају хронолошки ток процеса упознавања и освајања савременог поступка заваривања трењем алатом у нашим условима. У том циљу успешно су моделовани и израђени одговарајући алати за заваривање и извршено заваривање алуминијумских легура 5052-H32 и 2024-T351. Дисертација истовремено има и инжењерску и академску вредност. У инжењерском смислу, она представља конкретно освајање технологије заваривања трењем алатом (FSW). Издваја се успешно заваривање алуминијумске легуре 2024-T351 која са становишта заварљивости спада у групу тешко заварљивих, односно незаварљивих, алуминијумских легура. Са друге стране, дисертација у академском смислу представља допринос изучавању феноменолошких процеса заваривања и свеобухватне карактеризације заварених спојева испитиваних легура. У дисертацији је приказан велики број резултата, како структурних, механичких и корозионих испитивања, тако и фрактографске анализе електронском микроскопијом. Коначно, ова дисертација представља добру основу за даља истраживања у овој области.

На основу стечених теоријских сазнања и прилагођавањем постојеће опреме захтевима FSW процеса, изведен је низ експерименталних проба заваривања чији је крајњи циљ био добијање квалитетног завареног споја без грешака и практично упознавање са основним законитостима и захтевима поступка заваривања трењем алатом.

Истраживања су показала да су челици $\check{C}$.1531 и $\check{C}$.4830 неодговарајућих карактеристика за израду FSW алата којима би се заваривала алуминијумска легура 2024. Код алата израђених од ових челика, без обзира на геометријске карактеристике трна и чела ваљка, при оштријим режимима заваривања долазио до лома трна алата. Најбољи резултати добијени су код спојева заварених алатом 310. Нешто слабији резултати постигнути су применом алата 310-О, код кога је изведен обли тип завојнице, док су остале геометријске карактеристике исте као и код алата 310. Ово се објашњава утицајем геометрије трна алата на количину генерисане топлоте, интензитета мешања и ток материјала током заваривања. Обли тип завојнице генерише мање топлоте и проузрокује слабији интензитет мешања.

Експериментисано је са различитим параметрима заваривања да би се оценио утицај унете енергије на понашање материјала и квалитет завареног споја. Поновљивост процеса обезбеђена је применом истог алата и истих параметара заваривања. Заваривање је изведено при различитим параметрима заваривања, при чему се однос брзине ротације и брзине заваривања кретао од 3,16 до 51,30. Брзина ротације алата износила је 450, 600, 750, 950, 1180 и 1500 obr/min а брзина заваривања је варирана је од 23 до 380 mm/min. Угао нагиба алата износио је 1° .

Сагледан је утицај параметара заваривања, пре свега брзине ротације и брзине заваривања, на могућност добијања квалитетног споја и одређен њихов оптимални однос $V_{\text{rot}}/V_{\text{zav}}$. Однос $V_{\text{rot}}/V_{\text{zav}}$ указује да ли је за дате параметре заваривања могуће добити спој без присуства грешака. Однос $V_{\text{rot}}/V_{\text{zav}}$ указује да ли је за дате параметре заваривања могуће добити спој без присуства запреминске грешке типа тунела, али не и какве ће он механичке карактеристике поседовати. Резултати ове дисертације указују да се на основу овог односа може само оријентационо претпоставити понашање споја. Иако се иста или приближно иста вредност односа $V_{\text{rot}}/V_{\text{zav}}$ може остварити применом различитих параметара заваривања (нпр. $1180/116=10,17$; $950/93=10,21$; $750/73=10,27$), добијени резултати дају основу да се претпостави да се услови одигравања процеса заваривања и формирања споја феноменолошки разликују. Поред односа $V_{\text{rot}}/V_{\text{zav}}$, велику улогу у добијању споја задовољавајућег квалитета има величина и константност притисне силе у вертикалном правцу.

Повећање брзине ротације алата (V_{rot}) има позитиван утицај на механичке карактеристике завареног споја. Смањење брзине заваривања проузрокује деградацију изгледа површине споја услед прегоривања материјала. Смањење брзине заваривања има позитивног ефекта на повећање величине угла савијања при коме долази до појаве прслине. Резултати одређивања енергије удара указују да смањење брзине заваривања позитивно утиче на повећње жилавост споја. Са друге стране при $V_{\text{rot}}=1180 \text{ obr/min}$ са смањењем брзине заваривања долази до смањења вредности енергије удара. Овакво понашање може се објаснити улогом коју различита количина генерисане топлоте, при различитим параметрима заваривања, има на формирање споја. Остварене вредности у енергије удара заварених спојева у нивоу од 90% од енергије удара ОМ могу се сматрати изразито задовољавајућим. Енергије стварања прслине на нивоу од 34 до 43% укупне енергије удара су веће од енергије стварања прслине ОМ, која износи 30%. Са друге стране енергије ширења прслине на нивоу од 57 до 66% укупне енергије удара су мање од енергије ширења прслине ОМ која износи 70%

Макро испитивањима попречног пресека заварених спојева уочено је постојање области грумена, ЗТМУ и ЗУТ-а, њихов положај и облик. Јасно изражене линије течења материјала указују на карактер и смер тока материјала при одвијању процеса заваривања и у сагласности су са литературним подацима. Положај, простирање и израженост линија течења зависи од количине унете енергије, односно параметара заваривања. Величина грумена се при истој брзини ротације алата повећава при смањењу брзине заваривања, услед веће количине унете енергије

Микроструктурна испитивања су потврдила литературне наводе, да у области грумена и ЗТМУ, услед истовремене изложености и повишеној температури и механичком оптерећењу, долази до значајних промена у микроструктури и механичким особинама. Добијена рекристализована ситнозрна структура је нарочито изражена у области грумена и рукавца. Област ЗУТ-а је, због мале количине унете енергије, слабо изражена и не може се јасно одредити.

Добијене вредности затезне чврстоће завареног споја су на веома задовољавајућем нивоу јер је при различитим параметрима заваривања остварена висока ефикасност споја од преко 80%. Испитивања затезањем су показала да је најкритичније место завареног споја као целине, део који се налази у ЗТМУ непосредно уз област грумена. Расподела тврдоће кроз пресек споја показује да је у целом завареном споју дошло до пада нивоа тврдоће у односу на основни материјал, што је последица процеса отпуштања до кога долази услед топлоте створене трењем током заваривања FSW поступком. Највећи пад тврдоће забележен је у ЗТМУ. Област грумена је део завареног споја са највећом тврдоћом. До пораста тврдоће у грумену долази услед смањења величине зрна и/или издвајања секундарне фазе а последица су изражене рекристализације у овој области споја. Смањење V_{zav} повећава ниво тврдоће у грумену. У области ЗТМУ и грумена, ниво тврдоће у близини лица шава (зона испод алата) је изразито већи у односу на средину и корену страну споја. Ово се објашњава двоструким

утицајем алата у овој зони. Наиме, са једне стране услед делимичне рекристализације која се одвија у тој зони долази до уситњавања зрна и/или издвајања секундарних фаза а са друге стране долази до израженог присуства термомеханичког напрезања, што за последицу има пораст тврдоће у овој зони. Резултати испитивања тврдоће су у сагласности са резултатима затезних карактеристика. Мапирањем области споја на основу расподеле тврдоће, одређени су положај и простирање најслабијих критичних области у којима долази до лома а у сагласности су са резултатима механичких и металографских испитивања.

Фрактографском анализом преломних површина уочено је постојање три типичне области прелома, које по локацији одговарају различитим условима који владају у овим зонама током формирања завареног споја. Ове области се формирају под утицајем алата током заваривања и зависе како од његове геометрије тако и од параметара заваривања. Карактеристично је присуство „тракавости“ у области грумена. Ове траке се на макроструктурном пресеку у грумену уочавају као „прстенови“.

Установљено је да је област ЗТМУ најподложнија корозији. Испитивањима није утврђено присуство питинг корозије, већ само ексфолиације (раслојавања). Губитак масе код узорка завареног при брзини ротације од 1180 obr/min није разјашњен.

4.3. Верификација научних доприноса

Из рада на дисертацији „Утицај параметара заваривања на својства заварених спојева алуминијумских легура добијених поступком заваривања трењем алатом“, коју је урадио Игор Радисављевић дипл. инж., објављено је 8 радова а произишла су и 3 техничка решења.

Рад објављен у водећем међународном часопису, категорија M21

1. **Радисављевић И.**, Живковић А., Радовић Н., Грабулов В, Influence of FSW parameters on formation quality and mechanical properties of Al 2024-T351 butt welded joints, Transaction of Nonferrous Metals Society China, 2013, Vol. 23, pg. 3525-3539 (ISSN:1003-6326, IF=0,917; Metallurgy and Metallurgical Engineering 22/76)

Рад објављен у међународном часопису, категорија M23

2. **Радисављевић И.**, Живковић А., Грабулов В, Радовић Н., Influence of pin geometry on mechanical and structural properties of butt Friction Stir Welded 2024-T351 aluminum alloy, Хемијска индустрија, 2014, DOI:10.2298/HEMIND131206020R (ISSN: 0367-598X; IF=0,463; Engineering, Chemical 104/133)

Рад објављен у часопису међународног значаја верификован посебном одлуком, категорија M24

3. **Радисављевић И.**, Живковић А., Радовић Н., Avoidance of tunnel type defect in FSW welded Al 5052-H32 plates, Заваривање и заварене конструкције, 2012, Vol. 57, No. 1, pg. 5-12, ISSN 0354-7965

Предавање по позиву са међународног скупа штампано у целини, категорија M31

4. **Радисављевић И.**, Живковић А., Радовић Н., Influence of Process Parameters on Quality of FSW Welded Plates, 4th International Conference Processing and Structure of Materials, Palic, 27–29 May 2010, Proceedings, pg. 117-123, ISBN 978-86-87183-17-9.

Радови саопштени на скупу међународног значаја штампани у целини, категорија M33

5. Мијајловић М., Живковић А., Милчић Д., **Радисављевић И.**, Утицај параметара FSW поступка заваривања на квалитет завареног споја алуминијумске легуре 5052, Саветовање са међународним учешћем „ЗАВАРИВАЊЕ 2010“, Тара, 2-4 Јун 2010, зборник резимеа радова, I тематска група, стр. 74, рад бр. 47.
6. Живковић А., Noria D., **Радисављевић И.**, Перовић М., Седмак А., Петровски Б., The effect of tool geometry on the quality of Al 2024 friction stir welded joint, The 4th

International Conference Innovative Technologies for joining advanced materials, TIMA 10, Romania, Timisoara, 10–11 June 2010.

7. **Радисављевић И.**, Радовић Н., Грабулов В., Никачевић М., Influence of process parameters on tunnel type defect appearance and weld quality in FSW welded Al 2024 plates, 5th International Scientific Conference on Defensive Technologies, OTEH 2012, Serbia, Belgrade, 18-19 September 2012, Proceedings on CD, pg 625-630.

Рад саопштен на скупу националног значаја штампан у целини, категорија М63

8. Живковић А., Радовић Н., Мијајловић М., **Радисављевић И.**: Утицај геометрије чела алата на квалитет завареног споја оствареног поступком FSW на легурама Al 5052-H3 и Al 2024-T3, Зборник радова са саветовања „ЗАВАРИВАЊЕ 2012“, Србија, Дивчибаре, 9-12 октобар 2012

Битно побољшан постојећи производ или технологија, категорија М84

9. Радовић Н., **Радисављевић И.**, Живковић А., Танасковић Ј.: Технологија заваривања плоча дебљине 6.0mm AlMg2.5 легуре поступком заваривања трењем алатом, Пројекат Министарства науке ТР 19050, Освајање производње компоненти конструкција поступком заваривања трењем алатом, Рецензенти: Ромхањи Е, Седмак А., Корисник: ГОША – ФОМ, Прихваћено од: ГОША – ФОМ, 2010.
10. Радовић Н., **Радисављевић И.**, Живковић А., Вељић Д.: Технологија заваривања плоча дебљине 6.0mm алуминијумске легуре 2024 поступком заваривања трењем алатом, Пројекат Министарства науке ТР 34018, Развој технологије производње и заваривања Al-Mg легуре високе чврстоће за примену у конструкцијама друмских и железничких транспортних средстава, Рецензенти: Седмак А. и Грабулов В., Корисник: ГОША – ФОМ, Прихваћено од: ГОША – ФОМ, 2012
11. Вељић Д., Радовић Н., Ракин М., **Радисављевић И.**, Живковић А., Грабулов В.: Технологија заваривања плоча дебљине 3.0mm алуминијумске легуре 2024 поступком заваривања трењем алатом, Пројекат Министарства науке ТР 34018, Развој технологије производње и заваривања Al-Mg легуре високе чврстоће за примену у конструкцијама друмских и железничких транспортних средстава, Рецензенти: Камберовић Ж., Седмак А., Корисник: ГОША – ФОМ, Прихваћено од: ГОША – ФОМ, 2014

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Кратак осврт на дисертацију у целини

На основу свега напред изнетог, Комисија сматра да је докторска дисертација Игора Радисављевића, дипл. инж. металургије и металних материјала, под насловом: „Утицај параметара заваривања на својства заварених спојева алуминијумских легура добијених поступком заваривања трењем алатом“, испунила циљеве истраживања и да представља значајан и оригинални научни допринос у области Металургије, што је потврђено објављивањем радова у часописима међународног значаја и саопштењима на међународним конференцијама. Комисија предлаже Наставно-научном већу ТМФ-а да прихвати овај РЕФЕРАТ и да га заједно са поднетом дисертацијом Игора Радисављевића, достави на увид јавности у законски предвиђеном року, и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду, те да након завршетка ове процедуре, позове кандидата на усмену одбрану дисертације, пред Комисијом у истом саставу.

У Београду, 24.03.2014.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

Др Ненад Радовић, ван. проф., ментор
Технолошко-металуршки факултет Универзитета у Београду

Др Зорица Цвијовић, ред. проф.
Технолошко-металуршки факултет Универзитета у Београду

Др Ендре Ромхањи, ред. проф.
Технолошко-металуршки факултет Универзитета у Београду

Др Венцислав Грабулов, научни саветник,
Институт ИМС, Београд

Др Александар Живковић, научни сарадник
ГОША ФОМ