

НАЗИВ ФАКУЛТЕТА Факултет техничких наука  
FACULTY: Faculty of Technical Sciences

22.05.2020.

**ИЗВЕШТАЈ О ОЦЕНИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

**-обавезна садржина- свака рубрика мора бити попуњена**

(сви подаци уписују се у одговарајућу рубрику, а назив и место рубрике не могу се мењати или изоставити)

**REPORT ON THE EVALUATION OF PhD THESIS**

**-mandatory content- each section must be filled out**

(all data are entered in the appropriate box, and the name and location of the column can not be changed or omitted)

I ПОДАЦИ О КОМИСИЈИ
<p>1. Датум и орган који је именовео комисију</p> <p><b>26.03.2020., бр. 012-199/9-2019, Декан Факултета техничких наука на предлог Наставно научног већа ФТН</b></p>
<p>2. Састав комисије са назнаком имена и презимена сваког члана, звања, назива уже научне области за коју је изабран у звање, датума избора у звање и назив факултета, установе у којој је члан комисије запослен:</p> <ol style="list-style-type: none"><li>1. <b>Др Лепосава Шиђанин</b>, професор емеритус, уно: Материјали и технологије спајања 24.01.2008., Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, Нови Сад, Р. Србија, Председник;</li><li>2. <b>Др Саурав Гоел</b>, ванредни професор, уно: Прецизно инжењерство 01.12.2019., Лондон саут банк универзитет, Одсек за машинско инжењерство, Лондон, Велика Британија, Члан;</li><li>3. <b>Др Драган Рајновић</b>, доцент, уно: Материјали и технологије спајања, 13.11.2015., Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, Нови Сад, Р. Србија, Члан</li><li>4. <b>Др Себастиан Балаш</b>, ванредни професор, уно: Материјали и технологије спајања 19.05.2016., Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, Нови Сад, Р. Србија, Ментор;</li><li>5. <b>Др Жан Пјер Бергман</b>, редовни професор, уно: Производне технологије 01.11.2010., Технички универзитет Илменау, Машински факултет, Илменау Немачка, Ментор.</li></ol>
I INFORMATION ABOUT THE COMMITTEE
<p>1. Date and body that appointed the committee</p> <p><b>26.03.2020, no. 012-199/9-2019, Dean of the Faculty of Technical Sciences at the proposal of the Scientific Council of FTN</b></p>
<p>2. The elected members of the committee with an indication of the name and surname of each member, title, the title of the narrow scientific field for which he/she has been elected, the date of election and the name of the faculty, the institution where the committee member is employed:</p>

1. **Dr Leposava Šidanin**, Emeritus Professor, NSF: Materials and Joining Technologies; elected: 24.01.2008., University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, President;
2. **Dr Saurav Goel**, Associate Professor, NSF: Precision Engineering, elected: 01.12.2019., London South Bank University, Mechanical engineering division, London, United Kingdom Member;
3. **Dr Dragan Rajnović**, Assistant Professor, NSF: Materials and Joining Technologies; elected: 13.11.2015., University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, Member;
4. **Dr Sebastian Baloš**, Associate Professor, NSF: Materials and Joining Technologies; elected: 19.05.2016., University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, Mentor;
5. **Dr Jean Pierre Bergmann**, Full Professor, NSF: Production technologies, elected: 01.11.2010., Ilmenau University of Technology, Department of Mechanical Engineering Ilmenau, Germany, Mentor.

## II ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ

1. Име, име једног родитеља, презиме:  
Данка, Драгиша, Лабус Златановић
2. Датум рођења, општина, држава:  
25.11.1987., Сомбор, Р. Србија
3. Назив факултета, назив студијског програма дипломских академских студија – мастер и стечени стручни назив  
Факултет техничких наука Универзитета у Новом Саду, Производно машинство, Мастер инжењер машинства
4. Година уписа на докторске студије и назив студијског програма докторских студија  
2012. год., Машинство

## II INFORMATION ABOUT THE CANDIDATE

1. Name, parent's name, surname:  
Danka, Dragiša, Labus Zlatanović
2. Date of birth, municipality, country:  
November 25, 1987, Sombor, Republic of Serbia
3. Name of faculty, name of the study program of graduate academic studies - Master and professional title  
Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad, Production Engineering, Master in Mechanical Engineering
4. Year of enrollment in PhD studies and the title of the study program of PhD studies  
2012, Mechanical Engineering

5. Назив факултета, назив магистарске тезе, научна област и датум одбране:

-

5. Name of the faculty, title of Magister thesis, scientific field and date of defense:

-

6. Научна област из које је стечено академско звање магистра наука:

-

6. Scientific field from which is obtained academic degree of Magister:

-

## III НАСЛОВ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Тачкасто заваривање трењем са мешањем ултратанких лимова од легуре алуминијума и магнезијума

### **III THE TITLE OF PhD THESIS:**

Friction stir spot welding of ultrathin sheets made of aluminium – magnesium alloy

### **IV ПРЕГЛЕД ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:**

Навести кратак садржај са назнаком броја страна, поглавља, слика, шема, графикона и сл.

Докторска дисертација кандидаткиње Данке Лабус Златановић је прегледна и јасно изложена у оквиру осам поглавља:

1. Увод
2. Теоријска разматрања
3. Експерименталне методе
4. Експериментални резултати
5. Дискусија резултата
6. Закључци и даља истраживања
7. Литература
8. Прилози

Дисертација је написана на 148 страна А4 фомата, садржи 7 поглавља, 112 слика, 12 табела, 194 цитираних литературних извора и 5 прилога.

### **IV OVERVIEW OF PhD THESIS:**

Specify a short content with an indication of the number of pages, chapters, pictures, charts, etc.

The PhD thesis of candidate Danka Labus Zlatanović is clearly and concisely presented within eight chapters:

1. Introduction
2. Literature review
3. Experimental methods
4. Experimental results
5. Discussion
6. Conclusions and future work
7. References
8. Appendices

The dissertation is written on 148 pages of A4 format, containing 7 chapters, 112 images, 12 tables, 194 references and 5 appendices.

### **V ВРЕДНОВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ДЕЛОВА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:**

У оквиру поглавља **Увод** кандидаткиња је представила основне смернице ка развоју и унапређењу технологије тачкастог заваривања трењем са мешањем (ТЗТМ). Представила је проблематику технологије ТЗТМ у области преклопног тачкастог заваривања танких лимова као и у области заваривања више лимова истовремено. С обзиром да је ТЗТМ технологија развијена за преклопно тачкасто заваривање два лима или плоче дебљина преко 1 мм, изазов је био развити технологију ТЗТМ за заваривање више ултратанких лимова или фолија. Такође, један од важнијих параметара приликом развоја технологије је продуктивност тј. време заваривања. Уобичајено време заваривања приликом ТЗТМ је пет секунди што чини овај поступак неповољним у серијској и масовној производњи. Тренутно је поступак електроотпорног тачкастог заваривања доминантан поступак у ауто индустрији због времена заваривања испод једне секунде. У оквиру овог поглавља такође су дефинисани циљ и предмет истраживања у оквиру ове Докторске дисертације, а то су унапређење ТЗТМ у сврху заваривања више ултатанких лимова од легуре алуминијума са магнезијумом уз минимално време заваривања тј. максималну продуктивност.

Поглавље **Теоријска разматрања** приказује детаљни и систематски приказ технологије ТЗТМ као и основне проблеме који се јављају приликом заваривања овим поступком. Извршена је јединствена класификација поступака трењем са мешањем са детаљним описом сваког поступка у

оквиру подгрупе ТЗТМ са алатом без трна са акцентом на предности и мане свих појединачних поступака. Приказано је актуелно стање у области уз посебан осврт на геометрију алата и параметаре процеса као што су аксијално оптерећење, угаона брзина и дубина продирања алата. Затим је анализиран њихов утицај на микроструктуру, механичке особине и појаву дефеката у завареном споју. Такође је анализиран и утицај параметара и геометрије алата на напонско стање, трење и температуру у току процеса који имају значајан утицај на механизам формирања завареног споја. На крају је извршен приказ и анализа постојећих дефеката и њихов утицај на карактер лома.

Поглавље **Експерименталне методе** садржи на првом месту детаљан опис материјала (хемијски састав и механичке особине) као и димензије узорака коришћених приликом заваривања. Након тога су дати детаљи везани за геометрију и хемијски састав алата, као и детаљан опис поступка и уређаја за заваривање. Да би се обезбедио квалитетан заварени спој уз минимално време заваривања конструисана су два алата и варирани су параметри као што су аксијално оптерећење и угаона брзина, док је дубина продирања алата изабрана да буде константа. С обзиром да је угаона брзина показала највећи утицај на механичке особине и величину и изглед завареног споја, њен утицај на микроструктуру и механичке особине је посебно анализиран. Карактеризација заварених спојева након заваривања је извршена уз помоћу техника: Скенирајући акустични микроскоп (САМ), Светлосни микроскоп (СМ), Скенирајући електронски микроскоп (СЕМ), Трансмисиони електронски микроскоп (ТЕМ) са Енергетском дисперзионом спектрофотометријском анализом (ЕДХ) и Микроскоп атомских сила са Кевлиновом пробом док су механичке особине спојева анализирана са: уређајем за испитивањем микротврдоће, уређајем за испитивање нанотврдоће, и испитивање заварених спојева пробојним тестом са трном. У оквиру овог поглавља су описани уређаји и параметри коришћени приликом свих наведених анализа.

Јасан и индикативан приказ резултата добијених методама описаним у претходном поглављу је представљен у оквиру поглавља **Експериментални резултати**. Прво су представљене напонска анализа и анализа коефицијента трења у току процеса. Затим је представљен утицај угаоне брзине и геометрије алата на време заваривања и максималне температуре које се јављају у зони заваара. Ове анализе су помогле јасном разумевању самог поступка и понашања материјала у току самог процеса ТЗТМ. Након тога су представљени резултати добијени методом без разарања, као што су топографска мерења алата и узорка ради разумевања утицаја стања површине алата на стање површине узорка и резултати САМ-а који су приказали присуство и волумен дефеката у завареним спојевима. Затим су представљени резултати анализе макро и микро структура заварених спојева као и механичке особине добијене коришћењем наведених метода. У последњем делу овог поглавља су приказани детаљни резултати анализе међуконтактне површине завареног споја добијени помоћу уређаја за испитивање нанотврдоће, ТЕМ-а и ЕДХ-а и Микроскопа атомских сила са Келвиновом пробом. Сви ови резултати на јединствен и темељан начин описују сам поступак као и стање заварених спојева након поступка ТЗТМ. Резултати су представљени у виду мапа, табела, дијаграма и слика.

**Дискусија резултата** представља најзначајнији део докторске дисертације и као таквој јој је посвећена посебна пажња. У оквиру овог поглавља су на јединствен начин анализирани и коментарисани сви добијени резултати у оквиру ове Докторске дисертације а затим су доведени у међусобну логичку везу. Такође су упоређени са резултатима и запажањима других аутора, услед чега су потврђене већ постављене хипотезе али су и постављене неке нове које ће у оквиру даљих истраживања бити анализирани. Дискусију прати јасан и недвосмислен ток у складу са током претходних поглавља.

У оквиру поглавља **Закључци и даља истраживања** кандидаткиња је приказала јасне конкретне закључке изведене на основу резултата добијених у оквиру ове докторске дисертације. Закључци представљају концизан скуп чињеница до којих је кандидаткиња дошла експерименталним путем. С обзиром да ова докторска дисертација отвара нове могућности у области ТЗТМ за заваривање ситних компоненти, чак и у електронској индустрији, у оквиру овог поглавља су такође дати предлози за даља истраживања.

Коришћена **Литература** обухватила је велики број научних и стручних публикација који показују да кандидаткиња влада теоријским знањем из ове области. Највећи број цитираних публикација је у последњих неколико година објављиван у престижним међународним научним часописима са SCI листе.

**На основу свега наведеног, Комисија позитивно оцењује све наведене делове докторске дисертације.**

## V EVALUATION OF PhD THESIS CHAPTERS:

**Introduction** contains a clear presentation of basic guidelines for improvement and development of friction stir spot welding (FSSW). The detailed analysis of the state-of-the-art considering FSSW lap joining of ultrathin aluminium sheets was presented. Giving that FSSW technology was originally developed for spot welding of two sheets or plates >1 mm thick, the challenge was to develop FSSW technology for welding multiply ultrathin sheets or foils. Furthermore, for technology to be economically justified, it is very important to obtain high-quality joints with minimum welding time, to achieve high productivity. Usually, the welding time during FSSW is about five seconds, which makes FSSW to be unfavourable in serial and mass production compared to the resistance spot welding (RSW) where welding times are less than one second. Afterwards, within this chapter, the aim and subject of this PhD are explained in detail. The main aim was to develop FSSW for welding multiple ultrathin sheets of the aluminium-magnesium alloy (AA 5754 – H111) with the highest possible productivity, which can compete with RSW.

**Literature review** presents a detailed and systematic report of the theoretical background of FSSW and gives insight into the latest scientific achievements in the research area. Within this chapter, the candidate has proposed a unique classification of the Friction stir assisted manufacturing processes (FSAMP) and detail analysis of present literature for each process within the subgroup of FSSW with a pin-less tool with emphasis on the advantages and disadvantages of each individual process. The current state-of-the-art with a stressed end view on tool geometry and process parameters such as axial load, rotational speed and penetration depth of the tool was given. Thereafter, the broad analysis of their influence on microstructure, mechanical properties and defects in the weld zone was done. Furthermore, the influence of geometry on the stress state, kinetic friction and temperature during the process was analysed, which have a significant influence on the formation mechanism of welded joints. Finally, an overview of all existing types of defects and their influence on the fracture mechanism was studied.

In the **Experimental methods**, firstly the detailed description of the base material such as chemical composition and mechanical properties as well as the dimensions of the samples used during the welding were shown. Subsequently, details related to the geometry and chemical composition of the tool, as well as a detailed description of the welding process and equipment are given. To provide high-quality joints with minimal welding time, two tool geometries were designed. Process parameters such as axial load and rotational speed were varied while the penetration depth of the tool was kept constant. Since rotational speed had the highest influence on the mechanical properties and on the size and shape of weld joints, its influence on the microstructure and mechanical properties was analysed additionally. Characterization of the welds after welding process was performed by using following techniques: Scanning acoustic microscope (SAM), Light Microscope (LM), Scanning electron microscope (SEM), Transmission electron microscope (TEM) and Energy-dispersive X-ray analysis (EDX) and Frequency-Modulated Kelvin Probe Force Microscopy (FM - KPFM). The mechanical properties were obtained with Vickers microhardness tester, In-situ Scanning Probe Microscope (in-situ SPM) and Small punch test (SPT).

A clear and indicative presentation of the results obtained by the methods described in the previous chapter is presented in the **Experimental Results** section. First, the results of stress and frictional analysis during the FSSW process are presented. Afterwards, the influence of rotational speed and tool geometry on welding time and maximum temperatures obtained in the weld zone was presented. Those results provided insight in FSSW process and material flow within the samples during the process. Subsequently, the results of non-destructive methods such as surface topographic assessment of the tool and sample surface and results of SAM which have helped to detect the post-weld defects are given. Thereafter, the analysis of results of the macro- and microstructures of weld zones, as well as mechanical properties obtained by using the above-listed methods. The last part of this chapter shows the detailed results of the weld faying interface analysis. Those results were obtained by using techniques: in-situ SPM, TEM, EDX

and FM – KPFM. All these results uniquely and profoundly describe the FSSW process and post-weld state of the welds. Results are presented in the form of maps, tables, diagrams and figures.

**Discussion** section is the most significant part of PhD thesis and as such has received special attention. Within this chapter analysis and interpretation of all obtained results was done concisely, following logic correlations. Also, the obtained results and hypotheses were compared to the results of other authors. This led to the confirmation of some previously established hypotheses, but also to open new questions that will be addressed in future research. The discussion follows a clear and unambiguous course of the results presented in the above-mentioned section.

Within the chapter **Conclusion and future work**, the candidate has presented clear solid conclusions based on the results obtained within this PhD thesis. The conclusions represent a concise set of facts which were derived from experimental results obtained by the candidate. As this PhD thesis opens-up new possibilities in the area of FSSW of small components, even in the electronic industry, suggestions for future research are given within this chapter as well.

The **Literature** includes numerous scientific publications which indicate that the candidate understands theoretical background of the studied topic. Most of the cited scientific publications in this PhD thesis are up to date and published in international scientific journals with impact factors.

**After detailed analysis, the committee rates positively all aforementioned parts of this PhD thesis.**

## VI СПИСАК НАУЧНИХ И СТРУЧНИХ РАДОВА КОЈИ СУ ОБЈАВЉЕНИ ИЛИ ПРИХВАЋЕНИ ЗА ОБЈАВЉИВАЊЕ НА ОСНОВУ РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА У ОКВИРУ РАДА НА ДОКТОРСКОЈ ДИСЕРТАЦИЈИ

Таксативно навести називе радова, где и када су објављени. Прво навести најмање један рад објављен или прихваћен за објављивање у часопису са ISI листе односно са листе министарства надлежног за науку када су у питању друштвено-хуманистичке науке или радове који могу заменити овај услов до 01. јануара 2012. године. У случају радова прихваћених за објављивање, таксативно навести називе радова, где и када ће бити објављени и приложити потврду о томе.

## VI. LIST OF SCIENTIFIC PAPERS PUBLISHED OR ACCEPTED FOR PUBLICATION BASED ON RESEARCH RESULTS WITHIN THE WORK ON PhD THESIS

List all related publications, where and when were they published. First, state at least one article published or accepted for publication in the journal from the ISI list, or from the list of the ministry responsible for science when it comes to socio-humanistic sciences or works that can replace this requirement by January 1, 2012. In the case of papers accepted for publication, specify the names of the works, where and when they will be published, and provide a confirmation of their acceptance.

- [1] **Labus Zlatanovic D.**, Balos S., Bergmann J.P., Köhler T., Grätzel M., Sidjanin L., Goel S.: An experimental study on lap joining of multiple sheets of aluminium alloy (AA 5754) using friction stir spot welding, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020. doi:10.1007/s00170-020-05214-z (M22)
- [2] Balos S., Sidjanin L., Dramicanin M., **Labus Zlatanovic D.**, Antic A.: FSW welding of Al-Mg alloy plates with increased edge roughness using square pin tools of various shoulder geometries, *Materiali in Tehnologije*, 2016, Vol. 50, No 3, pp. 387-394, ISSN 1580-2949 (M23)
- [3] **Labus Zlatanovic D.** Balos S., Bergmann J. P., Grätzel M., Rajnovic D., Köhler T., Sidjanin L.: Friction Stir Spot Welding of Multiple Ultrathin Sheets of aluminium-magnesium alloy, 14th Multinational Congress On Microscopy, September 2019 (M33)
- [4] **Labus Zlatanovic D.**, Balos S., Dramicanin M., Janjatovic P., Sidjanin L.: Optimization of tool geometry and friction stir processing parameters in AA5754 h111 alloy, The 8th PSU-UNS International Conference on Engineering and Technology (ICET-2017), Novi Sad, Serbia, June 8-10, 2017 University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences (M33)
- [5] Balos S., Sidjanin L., Dramicanin M., **Labus Zlatanovic D.**, Antic A.: Influence of Tool Shoulder Geometry on Mechanical Properties and Roughness of FSW Joints, 3. The IIW South-East European Welding Congress, Timisoara, 3-5 Jun, 2015, pp. 1-6 (M33)
- [6] Balos S., Sidjanin L., **Labus Zlatanovic D.**, Dramicanin M., Rajnovic D.: Effect of tunnel-like formation on mechanical properties of FSW joints, 9. International seminar "Advanced

Manufacturing Technologies" - AMT, Sozopol, 25-30 Jun, 2015, pp. 89-94, ISBN 1313-4264 (M33)

- [7] Balos S., Labus Zlatanovic D., Janjatovic P, Dramicanin M., Rajnovic D: Sidjanin L.: Wear Resistance Increase by Friction Stir Processing for Partial Magnesium Replacement in Aluminium Alloys, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering (E-MRS 2017) 329 (2018) 012017doi:10.1088/1757-899X/329/1/012017 (M53)

## VII ЗАКЉУЧЦИ ОДНОСНО РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА

Кроз спроведену детаљну анализу експерименталних резултата у оквиру ове Докторске дисертације дат је значајан допринос развоју технологије тачкастог заваривања трењем са мешањем у области заваривања ултратанких лимова као и преклопном заваривању више лимова истовремено. У оквиру експерименталних резултата остварени су заварени спојеви између четири ултратанка лима (дебљине 0.3 mm) од легуре AA 5754-X111 са два алата и сетом параметара.

С обзиром на обим закључака изведених у оквиру ове Докторске дисертације, у наставку ће бити наведени само најважнији:

- Конструисани алати у оквиру експерименталних истраживања у комбинацији са адекватним параметрима омогућавају добијање преклопног завареног споја између четири лима уз време заваривања и до испод једне секунде.
- Успешно заваривање је постигнуто са угаоним брзинама од 1500 до 3500 o/min и аксијалним оптерећењем од 2 kN у оквиру прве серије (са алатом пречника 30 mm), и са угаоним брзинама од 1000 до 4500 o/min и аксијалним оптерећењем од 4 kN (са алатом пречника 45 mm)
- Угаона брзина има најзначајнији утицај на квалитет завареног споја. При заваривању са ниским угаоним брзинама заварени спојеви поседују већу тврдоћу и ефикасност завареног споја од основног материјала као и ширу зону завара у поређењу са узорцима завареним са високим угаоним брзинама, док са порастом угаоне брзине тврдоћа и ефикасност завареног споја опадају испод особина основног материјала.
- У току процеса ТЗТМ услед високих смицајних и нормалних напона, као и повишене температуре услед високог трења, долази до компетиције два механизма: деформационог ојачавања и термичког омекшавања. Приликом заваривања са ниским угаоним брзинама у току процеса деформационо ојачавања доминира над термичким омекшавањем док у току заваривања са високим угаоним брзинама ефекат је супротан.
- На граничној површини између два лима која се заварују долази до формирања комплексне зоне тзв. међуконтактне зоне. Ова зона је настала као последица додатне микропластичне деформације изазване трењем сучељених површина лимова које поседују одређену храпавост.
- У међуконтактној зони је дошло до динамичког таложења глобуларне фазе  $Al_3Mg_2$  по границама зрна као и игличасте фазе  $Al_3Mg_2$  унутар зрна. У средини међуконтактне зоне је остао заробљен оксидни слој ( $Al_2O_3$ , MgO) са нано рупицама. Међутим, на граничној површини између међуконтактне површине и рекристализоване зоне, количина глобуларних талога је веома велика, што узрокује деламинацију, док оксидни слој остаје заробљен унутар међуконтактне зоне.

**Комисија оцењује да су закључци јасно представљени и да су у складу са оствареним резултатима у оквиру ове Докторске дисертације.**

## VII CONCLUSIONS RELATED TO THE RESEARCH RESULTS

This PhD thesis gave a significant contribution to the development of FSSW of ultrathin sheets through the detailed analysis of the experimental results. Within the experimental results, lap welds were obtained between four ultra-thin sheets (0.3 mm thick) from AA 5754-H111 alloy with two tools and a range of parameters.

The most important conclusions within this PhD thesis are as following:

- During the experimental research, a designed tool with an optimal range of parameters provided obtaining a lap joint between four ultrathin sheets, reaching the welding time of under one second.
- The successful welding was achieved with rotational speed from 1500 to 3500 rpm and an axial load of 2 kN within the first batch of specimens (with a tool diameter 30 mm), and with the rotational speed of 1000 to 4500 rpm and an axial load of 4 kN (with a tool diameter 45 mm) within the second batch.
- Rotational speed is the most influential parameter on the weld quality. Welds processed with low rotational speeds have obtained higher, while welds processed at higher rotational speed obtained lower hardness and weld efficiency compared to the base material. Weld zone was wider in samples obtained at low rotational speeds compared to samples obtained at high rotational speeds.
- During the FSSW process, due to the high shear and normal stresses, as well as frictional heating, two main mechanism are competing: strain hardening and thermal softening. Welding processes at low rotational speeds were dominated by strain hardening over thermal softening, while the welding processes at high rotational speeds were dominated by thermal softening over strain hardening.
- At the boundary between two welding sheets a complex zone so-called *weld faying interface* is formed. This zone was developed as a result of the additional microplastic deformation, induced by the additional friction generated between rough surfaces of welded sheets.
- In weld faying interface, the dynamic precipitation caused the formation of globular phases  $Al_3Mg_2$  at the grain boundaries and rod-like phases  $Al_3Mg_2$  within the grains. An oxide interrupted layer ( $Al_2O_3$ , MgO) combined with nano pits has reminded entrapped at welding interface. However, at the boundaries between weld faying interface and recrystallised zone, there is a high volume of globular precipitates which have caused delamination to occur, while oxide layer has stayed entrapped inside of the weld faying interface.

**The committee finds that the conclusions are clearly presented and are consistent with the experimental results obtained within this PhD thesis.**

#### VIII ОЦЕНА НАЧИНА ПРИКАЗА И ТУМАЧЕЊА РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА

Експлицитно навести позитивну или негативну оцену начина приказа и тумачења резултата истраживања.

Резултати истраживања, остварени у оквиру ове Докторске дисертације, представљени су и тумачени на јасан и систематичан начин. Докторска дисертација садржи све битне елементе који су предвиђени методама научно истраживачког рада. Коришћењем великог броја научних радова кандидаткиња је јасно представила досадашње резултате и проблеме у области, који су довели до поставки основних хипотеза. Експериментални резултати су детаљно анализирани и јасно и систематски представљени. Дискусија резултата је праћена одговарајућим образложењима и критичким освртом на њихово вредновање у складу са резултатима других аутора. Резултати су у потпуности задовољили полазне циљеве истраживања.

Рад је проверен у софтверу за детекцију плагијаризма iThenticate, у Библиотеци ФТН-а.

**Комисија овим путем констатује да је начин на који су резултати у оквиру ове Докторске дисертације приказани и тумачени у потпуности одговара на постављене проблеме.**

#### VIII ASSESSMENT OF PRESENTATION AND INTERPRETATION OF THE RESEARCH RESULTS

Explicitly indicate a positive or negative assessment of how research results are presented and interpreted.

The research results, obtained within this PhD thesis, have been presented and interpreted clearly and systematically. The PhD contains all important elements which are predicted by scientific methods. By using numerous credible references, the candidate has clearly described previous researches and research problems. Experimental results have been studied in detail and clearly and systematically described. A discussion of the results is followed by appropriate descriptions and critical review in line with the results of other authors. The results fully met the initial research objectives.

The work was checked in the iThenticate plagiarism detection software, at the Library of Faculty of Technical Sciences.

**The committee hereby has concluded that the outcome of this PhD thesis is presented and interpreted in the way to answer all research questions.**



**IX КОНАЧНА ОЦЕНА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:**

Експлицитно навести да ли дисертација јесте или није написана у складу са наведеним образложењем, као и да ли она садржи или не садржи све битне елементе. Дати јасне, прецизне и концизне одговоре на 3. и 4. питање:

1. Да ли је дисертација написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме?

**Докторска дисертација је написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме.**

**IX FINAL ASSESSMENT OF THE PhD THESIS:**

Explicitly indicate whether the dissertation is or is not written in accordance with the above explanation and whether it contains or does not contain all the essential elements. Provide clear, precise and concise answers to questions 3 and 4:

1. Has the dissertation been written in accordance with the explanation stated in the thesis topic's application?

**The PhD is written in accordance with the explanation stated within the topic's application.**

2. Да ли дисертација садржи све битне елементе?

Дисертација садржи све битне елементе једне докторске дисертације у области техничко технолошких наука. Прегледним садржајем, јасно постављеним циљевима, хетерогеном методологијом, јасно презентованим резултатима, опсежном дискусијом и јасно формулисаним закључцима, задовољена је форма докторске дисертације.

**Стога комисија сматра да докторска дисертација садржи све неопходне елементе.**

2. Does the dissertation contain all the essential elements?

The PhD thesis contains all the essential elements attributed to the PhD thesis in the field of technical-technological sciences. With clear contents and objectives, heterogeneous methodology, clearly presented results, extensive discussion and clearly formulated conclusion the PhD thesis fulfills all requirements.

**Consequently, the committee considers that PhD contains all the essential elements.**

3. По чему је дисертација оригиналан допринос науци?

Према мишљењу комисије у оквиру ове Докторске дисертације основни допринос науци се огледа у развоју технологије тачкастог заваривања трењем са мешањем за заваривање ултратанких лимова, као и преклопно заваривање више лимова истовремено. Значајно смањење дебљине основног материјала могућег за заваривање са овом технологијом уз минимално време заваривања, које је једно од значајнијих проблема ТЗТМ отварају могућности овој технологији да се мери са електро отпорним тачкастим заваривањем и ултразвучним заваривањем.

Такође од посебног значаја је и јединствен и детаљан опис заварене међуповршине (међуконтактне површине између лимова) уз помоћ многобројних метода карактеризације од којих су поједине својеврсне за овакав вид истраживања. Такође, својеврсна детаљна анализа напонског стања и анализа механизма који се јављају у току поступка ТЗТМ са различитим процесним параметрима је допринела оригиналности ове дисертације.

**Сходно томе, комисија сматра да анализирана докторска дисертација представља оригиналан допринос науци.**

3. What is the dissertation's original scientific contribution?

The committee considers that within the framework of this PhD thesis, the basic scientific contribution is the development of friction stir spot technology for welding of ultrathin sheets and foils, as well as welding of multiple sheets simultaneously, which is of great importance for welding of electrical battery elements. A significant reduction in the thickness of the base material welded with FSSW opens the possibility for FSSW to become competitive to resistant spot welding or ultrasonic welding.

Also, a particular contribution is a unique and detailed description of the weld faying interface by using numerous characterization methods, some of which are exceptional for this type of research. Additionally,

a detailed analysis of the stress state and mechanisms driven by FSSW with different parameters contributed to the originality of this PhD thesis.

**Accordingly, the Committee considers that the analysed PhD thesis possesses an original scientific contribution .**

4. Недостаци дисертације и њихов утицај на резултат истраживања

**Комисија сматра да докторска дисертација нема недостатака који би битније утицали на резултате истраживања.**

4. Disadvantages of the dissertation and their impact on the research result

**The committee considers that a PhD has no disadvantages that would significantly influence the research results.**

**X ПРЕДЛОГ:**

На основу укупне оцене дисертације, комисија предлаже:

На основу свеобухватне анализе и укупне оцене Докторске дисертације „Тачкасто заваривање трењем са мешањем ултратанких лимова од легуре алуминијума и магнезијума” кандидаткиње Данке Лабус Златановић, Комисија предлаже Наставно-научном већу Факултета техничких наука и Сенату Универзитета у Новом Саду да се докторска дисертација прихвати и да се кандидаткињи одобри јавна одбрана.

**X PROPOSAL:**

Based on the overall assessment of the dissertation, the committee proposes:

**Based on the comprehensive analysis and overall assessment of the PhD thesis "Friction stir spot welding of ultrathin sheets made of aluminium – magnesium alloy" by candidate Danka Labus Zlatanović, the Committee proposes to the Teaching and Scientific Council of the Faculty of Technical Sciences and the Senate of the University of Novi Sad to accept the PhD thesis and that a candidate can be granted a public defence.**

НАВЕСТИ ИМЕ И ЗВАЊЕ ЧЛАНОВА КОМИСИЈЕ  
ПОТПИСИ ЧЛАНОВА КОМИСИЈЕ

THE NAME AND THE TITLE OF THE COMMITTEE MEMBERS  
SIGNATURES OF THE DEFENDING COMMITTEE MEMBERS

Др Лепосава Шиђанин, професор емеритус, Председник  
Dr Leposava Šidjanin, Emeritus Professor, President

Др Саурав Гоел, ванредни професор, Члан  
Dr Saurav Goel, Associate Professor, Member

Др Драган Рајновић, Доцент, Члан  
Dr Dragan Rajnović, Assistant Professor, Member

Др Себастиан Балаш, Ванредни професор, Ментор  
Dr Sebastian Baloš, Associate Professor, Supervisor

Др Жан Пијер Бергман, Редовни професор, Ментор  
Dr Jean Pierre Bergmann, Full Professor, Supervisor