

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ	Београд, 28. децембар 2010. године
Београд	04 Број:
Студентски трг 1	QMD/

Извештај комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације мр Дарка М. Вељића

Већу за мултидисциплинарне студије Универзитета у Београду

Одлуком Већа за мултидисциплинарне постдипломске студије Универзитета у Београду број: 612-338/VII-4382/2-10 донетој на седници одржаној 23. децембра 2010. године, именовани смо у Комисију за оцену научне заснованости теме докторске дисертације под насловом „Експериментална и нумеричка термо-механичка анализа процеса заваривања трењем мешањем легура алуминијума високе чврстоће“, кандидата мр Дарка Вељића, дипл. маш. инж.

На основу прегледа документације коју је кандидат дао на увид, Комисија подноси следећи:

ИЗВЕШТАЈ

1. Биографски подаци - Дарко (Мирољуб) Вељић

Рођен је 04. маја 1975. године у Беранама, Црна Гора, где је завршио основну и средњу машинско-техничку школу. На Машински факултет Универзитета у Београду уписао се 1993. године, где је и дипломирао 10. септембра 2001. године на смеру термотехника, са просечном оценом током студија 8.45 и оценом 10 на дипломском раду. Магистарску тезу са насловом “Технологија заваривања алуминијумских легура трењем помоћу алата“ одбранио је 05. маја 2006. године на Машинском факултету Универзитета у Београду, из области *машински материјали и заваривање*.

Јануара 2005. године положио је стручни испит, а у септембру исте године добија лиценцу за одговорног пројектанта и лиценцу за одговорног извођача радова термотехнике, термоенергетике, процесне технике и гасне технике.

У оквиру свог усавршавања, кандидат је завршио курс за међународне инжењере заваривања (IWE), курс за међународне инспекторе заваривања (IWI), курс за програмски пакет PRIMAVERA, AQUIT курс за *Project Management in IT Projects, Quality Management in IT Projects* и *CAD Systems*. Прошао је обуку за програмски пакет ABAQUS, који данас активно користи за нумеричке анализе.

По завршетку факултета кандидат је регулисао војну обавезу, а затим се запослио у предузећу АД „МОНТАЖА“, где је радио у пројектном бироу као пројектант термотехничких инсталација за објекте разних намена, у земљи и иностранству. Радио је као инжењер припреме, а затим као инжењер оперативе. Био је руководиолац градње Министарства иностраних послова – Казакстан-Астана и стручни сарадник на изградњи аеродрома у Сочију – Русија. Након тога је био, руководиолац производње, руководиолац истраживачког тима за развој производног програма опреме за термотехнику и руководиолац инжењеринга.

Од 01. априла 2010. године запослен је у Истраживачко развојном центру ИХИС као истраживач сарадник.

Списак објављених научно-стручних радова

Радови уско повезани са темом дисертације:

1. **Д. Вељић**, М. Перовић, Б. Међо, М. Ракин, А. Седмак, Н. Dascau, *Thermo-mechanical modeling of Friction Stir Welding*, The International Conference - ISIM Timisoara, June 10 - 11, 2010.
2. **Д. Вељић**, Н. Радовић, А. Седмак, М. Перовић, „Технологија заваривања алуминијумских легура трећем алатом“, часопис „Заваривање и заварене конструкције“ (1/2010), стр.13-20
3. М. Перовић, **Д. Вељић**, М. Ракин, Н. Радовић, Ј. Дакић, А. Живковић, „*Evaluation of characteristics FSW joints of forget panels made of high strenght aluminium alloys Al-Zn-Mg-Cu in A T652 temper*“, 1st International Scientific Conference on Engineering "Manufacturing and Advanced Technologies" MAT 2010, Mostar Bosnia and Herzegovina, November 2010
4. **Д. Вељић**, М. Перовић, А. Живковић, М. Ракин, А. Седмак, Н. Dascau, *Numerical simulation of the plunge stage in friction stir welding*, The International Conference - ISIM Timisoara, November 2010.

Остали радови:

5. М. Зрилић, М. Ракин, З. Цвијовић, **Д. Вељић**, А. Седмак, „Примена локалног приступа механике лома у оцени оштећења челика за пароводе“. Зборник резимеа радова са 20. међународног конгреса о процесној индустрији, ПРОЦЕСИНГ 2007, Београд (2007), стр. 60, ЦД
6. М. Перовић, **Д. Вељић**, А. Живковић, „Триболошке карактеристике и микроструктурна својства наварених спојева са најмањом и највећом

отпорношћу на хабање“. Зборник резимеа радова са 26. саветовања са међународним учешћем, ЗАВАРИВАЊЕ 2010, Тара (2010), стр.83, ЦД

Техничка решења

7. А. Петровић, **Д. Вељић**, М. Ракин, А. Седмак, М. Перовић, „*Регулатори протока ваздуха система за вентилацију и климатизацију простора*“, Машински факултет, 2010
8. А. Петровић, **Д. Вељић**, М. Ракин, А. Седмак, М. Перовић, „*Прикључна кутија система за вентилацију и климатизацију простора*“, Машински факултет, 2010
9. **Д. Вељић**, А. Петровић, М. Ракин, Б. Међо, М. Богнер, „*Фиксна и лебдећа округла жалузина система за вентилацију и климатизацију простора*“, Машински факултет, 2010
10. **Д. Вељић**, А. Петровић, Н. Радовић, Н. Бајић, Д. Зарић, „*Противпожарне кланне система вентилације и климатизације*“, Машински факултет, 2010
11. Н. Бајић, **Д. Вељић**, М. Мирковић, Б. Бобић, „*Ротациони гранулатор за производњу гранула универзалног агломерираниог прашка за заваривање ЕПП поступком*“, 2010

2. Предмет и садржај дисертације

Заваривање трењем мешањем (Friction Stirr Welding - FSW) је развијено и патентирано од стране Института за заваривање (TWI, Kembridž, UK) у децембру 1991. год. са мотивом да превазиђе проблеме који се јављају при заваривању пре свега алуминијумских легура процесима у којима долази до топљења. То је процес спајања материјала у чврстој фази, комбинованим деловањем топлоте и механичког рада, без уобичајених грешака које су карактеристичне за процес топљења. FSW је посебно погодно за спајање алуминијумских легура са великим распоном дебљина плоча. Могуће је заварити алуминијумске лимове дебљине до 50 мм у једном пролазу, односно до 75 мм дебљине формирањем двостраног завара. Поред могућности спајања готово свих врста алуминијумских легура, данас је могуће овим поступком успешно заваривати: бакар и њихове легуре, олово, титанијум и његове легуре, легуре магнезијума, цинк, меки челик, нерђајући челик, легуре никла.

Поступак заваривања трењем помоћу алата, као веома савремени поступак, нашао је своје место у производњи процесне опреме, производњи шинских возила, бродоградњи, аутомобилској индустрији, у авиоиндустрији, производњи космичких летилица, и тд. Овим поступком могу се заварити плоче, лимови, цилиндрични делови, склопни делови и то у свим могућим међусобним положајима.

Заваривање трећем мешањем може се описати на следећи начин. Две плоче које треба да се заваре сучељавају се (могућ је преклопни спој и друге конфигурације) и стежу јако за радну плочу машине. Алат, који се састоји од два концентрична дела (конусни трн и ваљак), ротира око своје осе одговарајућом брзином и продире трном у радни комад све док ваљак не направи контакт са горњом површином радног комада са довољном силом притиска да задржи материјал унутар зоне заваривања. На тај начин, трећем између контактних површина алата и плоча и пластичном деформацијом у зони мешања-око трна, производи се довољна количина топлоте која загрева ивице лимова у зони заваривања на температуру топле пластичне прераде (око $0.8 T_{\text{топљења}}$). Тада ротирајући алат почиње кретање дуж линије заваривања и мешајући материјал обе плоче формира спој.

Сам процес не захтева употребу додатног материјала, заштитног гаса, а пошто је аутоматизован није неопходно коришћење висококвалификоване радне снаге. Радна средина у којој се изводи овај поступак заваривања је чистија, нема штетних испаравања, дима, непријатних мириса, ултравиолентних и других штетних зрачења. Није потребна посебна припрема површина, ивица делова који се заварују, што умањује трошкове заваривања ових легура. Мали довод топлоте настале трећем и пластичном деформацијом на месту заваривања обезбеђује минимална кривљења и скупљања. Овим поступком заваривања добијају се заварени спојеви без прслина и порозности што је била пратећа појава код поступака заваривања топљењем. Такође, добија се квалитетан заварени спој одличних механичких карактеристика. Ефикасност споја овим поступком заваривања може достићи вредност 90%, па чак и 100% (однос чврстоће завареног споја и основног материјала), док типичан заварени спој, добијен заваривањем поступком топљења, за истоветне легуре алуминијума ојачане старењем, може достићи ефикасност свега 50%.

Процес заваривања трећем мешањем је сложен нелинеаран процес праћен великим деформацијама, високим температурама и пластичним течењем материјала у зони заваривања. Предмет ове докторске дисертације је, као што наслов говори, експериментална и нумеричка термо-механичка анализа процеса заваривања трећем мешањем (FSW) легура алуминијума високе чврстоће. Упоређење резултата моделирања (нумеричка термо-механичка анализа процеса) са расположивим експерименталним подацима је једини начин да се донесу неопходни закључци. Једанпут прихваћен, модел се може користити за избор облика алата и особина завареног споја и може да усмерава кориснике при одређивању оптималних параметара процеса, нпр. односа између брзина окретања и померања алата. Моделирање овог процеса има кључну улогу у убрзању развојног процеса и смањењу трошкова експеримента. Модели обезбеђују информацију за развој, оптимизацију и квалификацију тренутних и будућих примена FSW поступка. Могућност предвиђања утицаја параметара заваривања и геометрије алата на температуру, пластичне деформације и резултујуће микроструктуре завареног споја су од значаја за оптимизацију и контролисање FSW процеса.

Моделирање је један од важних развојних путева за FSW поступак, зато што је већина његових примена везана за велику одговорност, попут већине конструкционих компоненти израђених од легура алуминијума високе чврстоће за ваздухопловну, космичку, аутомобилску, морнаричку и другу сличну примену.

Кандидат је детаљним проучавањем литературе, са до сада осам одржаних међународних конференција посвећених овој области, анализом меродавних радова из часописа и израдом магистарског рада, такође из ове области, стекао велико практично и теоријско искуство потребно за целовит приступ предметној проблематици. При извођењу експерименталног дела, ради добијања оптималних параметара заваривања, варираће се са вредностима брзина заваривања и брзина ротације алата, а геометрија алата и дубина пенетрације чела ваљка биће иста за сваки експеримент. Параметри заваривања који ће варирати у експериментима и геометрија алата одабрани су на основу теоријских и практичних сазнања кандидата. У току процеса заваривања ће се мерити сила којом алат делује управно на радни комад и температурна радног комада у појединим тачкама. Након тога приступиће се анализи квалитета заварених спојева. Прва селекција се изводи визуелном контролом заварених спојева. Спојеви који прођу ову контролу излажу се радиографском снимању и на основу снимка одбацују се спојеви са уоченим грешкама које нису у граници прихватљивости. Овако одабрани заварени спојеви се подвргавају испитивању са разарањем. Извлачи се епрувета попречно на завар из сваког завареног споја и испитивањем на затезање, заварени спој чија затезна чврстоћа буде минимум 70% од затезне чврстоће основног материјала сматраће се добрим завареним спојем, а параметри са којима су заварене плоче оптималним. Урадиће се макроструктура попречног пресека прихваћених заварених спојева. За исправне заварене спојеве, добијени експериментални термо-механички резултати током процеса заваривања: временско-температурна историја и промена силе управне на радни комад, поредиће се са резултатима добијеним нумеричком симулацијом процеса, ради потврђивања исправности термо-механичког модела.

У нумеричкој термо-механичкој анализи посматраће се истовремено температура, померање и механичке реакције. Генерисање топлоте у FSW се узима као комбинација два различита механизма; (1) трења на контактної површини алата и радног комада и, (2) смицајних пластичних деформација метала у близини трна. Топлота која се ствара током заваривања расипа се путем проводности у радном комаду, алату и стезној оплати као и процесима зрачења и конвекције на површини радног материјала. Губитак топлоте услед зрачења је занемарљив због ниских температура које су укључене у процес и може се комбиновати са конвективним трансфером топлоте од горње површине радног комада ка окружењу коришћењем мало већег коефицијента трансфера топлоте.

За симулацију процеса заваривања трењем мешањем и израду термо-механичког тродимензионалног МКЕ користиће се ABAQUS програмски пакет. ABAQUS/Explicit програмски пакет користи произвољну Lagrangian-Eulerian формулацију (Arbitrary Lagrangian Eulerian - ALE) и Johnson-Cook - ов закон (Johnson-Cook material law). Lagrangian-Eulerian формулација је неопходна за очување правилног облика мреже коначних елемената у току процеса заваривања. Johnson-Cook-ов еласто-пластични модел дефинише зависност тока напона са температуром, пластичном деформацијом и брзином пластичне деформације, што је од суштинског значаја за моделирање процеса заваривања трењем мешањем. Контактни притисци су моделирани применом Кулоновог закона трења.

Спрегнути термо-механички модел биће развијен за проучавање температурних поља и пластичних деформација за једну легуру алуминијума високе чврстоће, при различитим процесним параметрима, у току заваривања трењем мешањем. Биће представљени тродимензионални резултати при различитим параметрима заваривања.

Предвиђа се следећи садржај и структура рада:

- Увод;
- Кратак преглед технологије заваривања трењем мешањем, предности, недостаци, утицајни фактори, алати, машине, структура завареног споја, заварљивост легура алуминијума, течење материјала, метарлушке трансформације, механичке особине заварених спојева и индустријска примена процеса заваривања;
- Опис експерименталног дела заваривања трењем мешањем легуре алуминијума високе чврстоће: карактеристике материјала алата и плоча, параметари заваривања, цртеж алата, опис коришћене опреме, приказ радиографског испитивања и резултата испитивања затезне чврстоће заварених спојева као и макроструктуре попречног пресека исправних заварених спојева, приказ промене температуре радног комада у појединим тачкама и силе којом алат делује управно на радни комад током процеса заваривања;
- Кратак историјски преглед симулације процеса заваривања трењем мешањем, детаљан опис термо-механичког модела са освртом на количину генерисане топлотне у току процеса заваривања настале трењем и пластичном деформацијом и формулацијом прописа и закона имплементираних у програмски пакет ABAQUS које користи овај модел;
- Приказ термо-механичког 3Д модела процеса заваривања трењем мешањем и термо-механичког 3Д модела процеса продирања алата-FSW у плочу која се заварује, приказ неких грешака које могу настати при изради термо-механичког 3Д модела процеса заваривања трењем мешањем и њихово одклањање;
- Анализа добијених експерименталних и нумеричких резултата и дискусија.

3. Научни циљ дисертације

Основни научни циљ дисертације је израда прихватљивог термо-механичког модела на основу експерименталних података који ће бити саставни део дисертације и прорачуна МКЕ, а у циљу убрзања развојног процеса, смањења трошкова експеримента и примене поступка заваривања трењем мешањем у индустријским условима. Поступци FSW се тренутно не користе у српској индустрији и поред предности које омогућавају при заваривању легура алуминијума високе чврстоће, од којих је већина незаварљива конвенционалним поступцима заваривања топљењем.

4. Значај истраживања

Истраживања у оквиру ове тезе треба да омогуће боље разумевање утицаја параметара заваривања (угаона брзина ротације алата, брзина линеарног кретања алата и сила притиска алата на основни материјал) на развој температурних поља и пластичних деформација у зони заваривања, што директно утиче на оптимизацију и контролисање процеса заваривања трењем мешањем, а у циљу добијања квалитетног завареног споја задовољавајуће затезне чврстоће.

5. Методологија истраживања

Основне хипотезе од којих се полази

Основна хипотеза рада је да се израдом прихватљивог термо-механичког модела на основу експерименталних података који ће бити саставни део дисертације и прорачуна МКЕ, може оптимизирати и контролисати процес заваривања трењем мешањем не трошећи време и новац на нова експериментална истраживања.

Методе које ће се у истраживању применити

Током израде овог рада користеће се различите методе, које доприносе формирању целовите експерименталне и нумеричке термо-механичке анализе процеса заваривања трењем мешањем. Основне фазе истраживања ће бити:

- Припрема плоча за заваривање сечењем машинским маказама, а затим обрадом скидањем струготине на потребну димензију уз интензивно хлађење да не дође до термичких утицаја на структуру материјала
- Израда алата за заваривање трењем мешањем од алатног челика и потребна термичка обрада
- Заваривање плоча, израђених од легуре алуминијума високе чврстоће, са одговарајућим параметрима заваривања уз истовремено мерење температуре истих и силе којом алат делује управно на њих

- Испитивање заварених спојева без разарања - визуелном методом и радиографски и са разарањем – одређивање затезне чврстоће, израда макроструктуре попречног пресека исправних заварених спојева
- Израда термо-механичког модела – нумеричка симулација процеса продирања алата-FSW у плочу која се заварује. Поређење резултата нумеричке симулације са експерименталним резултатима (промена температуре радног комада у појединим тачкама и силе којом алат делује управно на радни комад током процеса заваривања).
- Израда термо-механичког модела – нумеричка симулација процеса заваривања трењем мешањем. Поређење резултата нумеричке симулације са експерименталним резултатима (промена температуре радног комада у појединим тачкама и силе којом алат делује управно на радни комад током процеса заваривања).

6. Образложење мултидисциплинарног карактера дисертације

Експериментална и нумеричка термо-механичка анализа процеса заваривања трењем мешањем обједињује извођење заваривања, проучавање макроструктуре попречног пресека заварених спојева, стандардна испитивања без разарања и са разарањем материјала и нумеричке прорачуне применом методе коначних елемената (МКЕ). Ова теза захтева мултидисциплинарну анализу, која обухвата знања из различитих научних области, а нарочито инжењерства материјала и рачунске механике. Остварени научни доприноси омогућиће оптимизацију, боље контролисање процеса заваривања трењем мешањем, убрзање развојног процеса уз истовремено смањење трошкова експеримента и убрзање примене поступка заваривања трењем мешањем у индустријским условима.

7. Закључак комисије

На основу напред изнетог, комисија сматра да је пријављена тема докторске дисертације актуелна и мултидисциплинарна. Научни допринос ове дисертације је успостављање зависности између параметара заваривања (угаона брзина ротације алата, брзина линеарног кретања алата и сила притиска алата на основни материјал) и температурних поља, односно пластичних деформација у зони заваривања. Предвиђена експериментална и нумеричка анализа ће омогућити оптимизацију процеса заваривања трењем мешањем применом модела развијеног у овој дисертацији. На основу изнетог, комисија оцењује да је тема докторске дисертације под насловом „*Експериментална и нумеричка термо-механичка анализа процеса заваривања трењем мешањем легура алуминијума високе чврстоће*“, кандидата мр Дарка Вељића, дипл. маш. инж., научно заснована и предлаже Већу за мултидисциплинарне студије Универзитета у Београду да одобри израду дисертације.

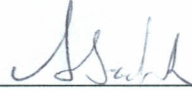
8. Предлог за менторе

Комисија предлаже Већу за мултидисциплинарне последипломске студије да се за менторе ове дисертације именују:

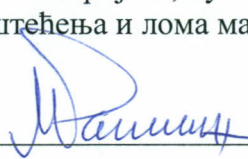
1. др Александар Седмак, редовни професор
Машински факултет Универзитета у Београду
Ужа област научно-истраживачког рада:
рачунска механика, интегритет заварених конструкција
2. др Марко Ракин, ванредни професор
Технолошко-металуршки факултет Универзитета у Београду
Ужа област научно-истраживачког рада:
инжењерство материјала, нумеричке методе у
механици оштећења и лома материјала

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ:

1. др Александар Седмак, редовни професор
Машински факултет Универзитета у Београду
Ужа област научно-истраживачког рада:
рачунска механика, интегритет заварених конструкција



2. др Марко Ракин, ванредни професор
Технолошко-металуршки факултет Универзитета у Београду
Ужа област научно-истраживачког рада:
инжењерство материјала, нумеричке методе у
механици оштећења и лома материјала



У Београду,
децембар
2010.

3. др Ненад Радовић, ванредни професор
Технолошко-металуршки факултет Универзитета у Београду
Ужа област научно-истраживачког рада:
металуршко инжењерство и инжењерство материјала



4. др Венцислав Грабулов, научни саветник
Институт за испитивање материјала Србије, Београд
Ужа област научно-истраживачког рада:
металургија и метални материјали



5. др Дарко Бајић, доцент
Машински факултет у Подгорици, Универзитет Црне Горе
Ужа област научно-истраживачког рада:
технологија заваривања и инжењерство материјала

