

УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
Факултет за машинство и грађевинарство
Доситејева 19
Краљево, 36 000

Факултет за машинство и грађевинарство
у Краљеву
Универзитета у Крагујевцу,
Број: 802
Датум: 21. 06. 2016. год.
Краљево, Доситејева 19.

НАСТАВНО – НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: *Извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата мр Мише Бјелића, дипл. маш. инж.*

На предлог Наставно – научног већа Факултета за машинство и грађевинарство у Краљеву, Одлука број 514/4 од 19.4.2016., као и Одлуке број IV-04-337/7 од 11.5.2016. год., Стручног већа за техничко – технолошке науке Универзитета у Крагујевцу, именовани смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата мр Мише Бјелића, дипл. маш. инж., под насловом:

"КАРАКТЕРИЗАЦИЈА ГЕОМЕТРИЈЕ И МИКРОСТРУКТУРЕ ШАВА НА БАЗИ ТОПЛОТНОГ И МЕТАЛУРШКОГ МОДЕЛА МАГ ПОСТУПКА ЗАВАРИВАЊА КАО ОСНОВА ЗА ОДРЕЂИВАЊЕ ПАРАМЕТАРА ТЕХНОЛОГИЈЕ."

На основу увида у приложену докторску дисертацију, Извештаја о подобности кандидата и теме докторске дисертације која је одобрена за израду Одлуком Факултета за машинство и грађевинарство, бр. 643/2 од 28.5.2013. године и Одлуком Стручног већа за техничко – технолошке науке Универзитета у Крагујевцу број 332/1 од 12.06.2013. године и Правилника о пријави, изради и одбрани докторске дисертације Универзитета у Крагујевцу, Комисија подноси Наставно – научног већи следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Значај и допринос докторске дисертације са становишта актуелног стања у одређеној научној области

Докторска дисертација кандидата, мр Мише Бјелића дипл. инж. маш., под називом: **"Карактеризација геометрије и микроструктуре шавана на бази топлотног и металуршког модела МАГ поступка заваривања као основа за одређивање параметара технологије"** је резултат научно – истраживачког рада кандидата у актуелној области која се односи на симулационо моделирање процеса заваривања и примену симулационих модела у циљу одређивања параметара технологије заваривања.

Поступци електролучног заваривања представљају доминантан начин спајања нераздивом везом за већину комерцијалних метала. Захтеви за повећаном продуктивношћу довели су до тренда аутоматизације процеса заваривања. Успешно спровођење процеса аутоматизације повезано је са могућношћу одређивања параметара технологије заваривања у

односу на захтеве који се тичу геометрије шава, механичких карактеристика завареног споја, итд.

Иако симулационо моделирање производних процеса има растући тренд последњих година, примена симулационих модела заваривачких процеса у циљу бољег разумевања наведених феномена као и у индустрији у циљу смањења трошкова и потребног времена за извођење експеримената, је још увек ограничена што је последица сложености и нелинеарност процеса заваривања.

Без обзира на развој рачунарске технике, време потребно за извођење симулација заваривачких процеса и даље је веома велико што доводи до немогућности примене симулационих модела у реалном времену као и до великих трошкова. Недовољно познавање вредности одређених улазних величина што као последицу даје недовољно поуздане излазне резултате без обзира на сложеност модела. Имајући у виду наведене разлоге, може се закључити да су два основна императива у формирању симулационих модела заваривачких процеса, смањење времена потребног за извођење симулација као и повећање поузданости излазних резултата симулационог модела.

Значај и допринос ове дисертације везани су за формирање аналитичког и нумеричком симулационог модела процеса размене топлоте током заваривања који представља одговарајућу меру између сложености модела и времена потребног за симулацију. Поузданост излазних резултата унапређена је развојем различитих модела калибрације у односу на експерименталне податке везане за геометријске и механичке карактеристике завареног споја, а у циљу проналажења вредности улазних величина које нису једнозначно одређене. Претходно наведени аспекти, у комбинацији са развијеном методологијом одређивања параметара технологије МАГ поступка заваривања на бази захтеваних вредности параметара геометрије шава и средње вредности тврдоће по Викерсу у низу мерних тачака представљају главне доприносе ове дисертације. Компаративна анализа експерименталних и резултата добијених применом наведених модела показала је да развијени модели имају велики потенцијал за практичну примену решавања реалних проблема везаних за одређивање вредности параметара технологије заваривања и да представљају добру основу за даља истраживања у области симулационог моделирања у заваривању.

2. Оцена да је урађена докторска дисертација резултат оригиналног научног рада кандидата у одговарајућој научној области

Комисија сматра да је докторска дисертација кандидата мр Мише Бјелића дипл. инж. маш., резултат оригиналног научног рада кандидата. Обрађена тема је актуелна и значајна за развој науке у области симулационог моделирања у заваривању, односно одређивање вредности параметара технологије процеса заваривања на бази захтеваних геометријских и механичких карактеристика завареног споја. Кандидат детаљно и студиозно обрадио тему, при чему је користио релевантна сазнања везана за тему из различитих научних области.

У оквиру дисертације анализирана су и систематизована научна и стручна достигнућа, публикована у релевантној литератури везаној за проблематику која је разматрана у дисертацији. Развијени је аналитички и нумерички симулациони модели процеса размене топлоте при заваривању лимова у сучеоном положају без припреме ивица. Такође, развијен је и низ калибрационих модела у циљу повећања тачности излазних резултата симула-

ционог модела. Поред теоријских истраживања, кандидат је спровео и обимна експериментална истраживања у циљу добијања података потребних за калибрацију и валидацију нумеричког модела процеса заваривања.

Применом разноврсних теоријских знања и искустава, уз развој одговарајућих симулационих модела и свеобухватна експериментална истраживања, кандидат је показао способност за самостално бављење научно – истраживачким радом.

3. Преглед остварених резултата рада кандидата у одређеној научној области

Мр Мишо Бјелић, дипл. инж. маш., рођен је 25. 04. 1976. године у Бањалуци. Дипломирао је 2000. године на Машинском факултету у Краљеву на смеру за производно машинство са оценом 10 (десет) и просечном оценом у току студирања 9,16 (девет и 16/100).

Као истраживач-приправник радио је од 2000 – 2003. године на Машинском факултету у Краљеву. У периоду 2003 – 2009. године радио је као асистент – приправник на Катедри за производне технологије Машинског факултет у Краљеву. На Машинском факултету у Краљеву одбранио је 2009. године, магистарску тезу под насловом „Симулација температурског поља при заваривању танких лимова МАГ поступком“.

По завршеним магистарским студијама, уписао је 2009. године, докторске студије на Машинском факултету Краљево, на смеру Моделирање и симулације у заваривању и положио све испите према наставном плану и програму. Од 2009. године ради у звању асистента за ужу научну област производно машинство на Факултету за машинство и грађевинарство у Краљеву. У току 2010. године, завршио је обуку и стекао звање међународног инжењера заваривања (IWE).

Као аутор и коаутор објавио је 3 рада у међународним часописима, већи број радова на домаћим и међународним конференцијама као и у домаћим часописима из области производног машинства. Коаутор је једног уџбеника и 5 техничких решења. Учествовао је и у реализацији 3 пројекта финансирана од стране Министарства за просвету и науку као и на пројектима за потребе привреде. У наставку су приказани само најважнији радови везани за област докторске дисертације.

Рад у међународном часопису – [M₂₂]

1. **Mišo B. BJELIĆ**, Karel KOVANDA, Ladislav KOLAŘÍK, Miomir N. VUKIĆEVIĆ, Branko S. RADIČEVIĆ, *Numerical modeling of two-dimensional heat-transfer and temperature – based calibration using simulated annealing optimization method: Application to gas metal arc welding*, Thermal Science, (2016), vol. 20, br. 2, pp. 655-665, doi:10.2298/TSCI150415127B, ISSN: 0354-9836

Рад у међународном часопису – [M₂₃]

1. Mijajlovic M., Milcic D., Andjelkovic B., Vukicevic M., **Bjelic M.**, *Mathematical Model for Analytical Estimation of Generated Heat During Friction Stir Welding – Part 1*, Journal Of The Balkan Tribological Association, (2011), vol. 17, br. 2, pp. 179-191, ISSN: 1310-4772
2. Mijajlovic M., Milcic D., Andjelkovic B., Vukicevic M., **Bjelic M.**, *Mathematical Model for Analytical Estimation of Generated Heat During Friction Stir Welding – Part 2*, Journal Of The Balkan Tribological Association, (2011), vol. 17, br. 3, pp. 361-370, ISSN: 1310-4772

Рад на међународном скупу штампан у целини – [М₃₃]

1. **Бјелић М.**, Вукићевић М., Миодраговић Г., *Мозгућности примене симулационих метода за одређивање геометрије шави*, XXXIII ЈУПИТЕР конференција, Proceedings, Машински факултет, Београд, 2007, стр. 2.67-2.72., ISBN: 978-86-7083-592-4
2. Vukicevic M., Petrovic Z., Kolarevic M., **Bjelic M.**, *Simulation Model of Initial Period of Spot Welding*, Mathematical Modelling of Weld Phenomena, No 9, Graz, 2010, pp. 955-966, ISBN: 978-3-85125-127-2
3. **M. Bjelic**, M. Vukićević, M. Kolarević, A. Petrović, *Numerical Simulation Of Welding Parameters Influence On Temperature Field During GMAW Welding*, The Seventh Triennial International Conference Heavy Machinery HM 2011, Faculty Of Mechanical Engineering, Proceedings, Vrnjačka Banja, pp. E 13 – 16, 2011, ISBN: 978-86-82631-58-3
4. **Мишо Бјелић**, Karel Kovanda, Ladislav Kolařík, Marie Kolaříková, Petr Vondrouš, *Modeling and numerical analysis of wire temperature in GMA welding*, Proceedings of the 8th International Conference Heavy Machinery HM 2014, Zlatibor, pp. B 79-82, 2014, ISBN: 978-86-82631-74-3

Рад у часопису националног значаја – [М₅₃]

1. Вукићевић М., Петровић З., **Бјелић М.**, Ђурић С., *Предикција примене симулационих модела у заваривању*, ИМК-14 - Истраживање и развој 2009, вол. 15, бр. 1-2, стр. 59-66, ISSN 0354-6829

Списак уџбеника:

1. Вукићевић, М., Петровић, З., Ђурић, С., **Бјелић М.**: *Заваривање гасним поступком*, уџбеник, I издање, Краљевски гласник, Краљево, 2007, ISBN 978-86-86283-02-3

4. Оцена о испуњености обима и квалитета докторске дисертације у односу на пријављену тему

Докторска дисертација кандидата, мр Мише Бјелића дипл. инж. маш., под називом: "**Карактеризација геометрије и микроструктуре шави на бази топлотног и металуршког модела МАГ поступка заваривања као основа за одређивање параметара технологије**" написана је на 150 страна, при чему је цитирана литература наведена у 105 библиографских јединица.

Докторска дисертација приказана је кроз осам поглавља:

1. Уводна разматрања
 2. Преглед стања у области истраживања
 3. Опште карактеристике МАГ поступка заваривања
 4. Симулациони модел процеса заваривања
 5. Експериментална истраживања
 6. Калибрација и валидација симулационог модела
 7. Одрађивање параметара технологије МАГ поступка
 8. Закључак
- Литература
Прилог

У првом, уводном поглављу, дат је опис проблема који се истражује, приказани су предмет и основни циљеви рада, дат је преглед полазних хипотеза, описана је методологија рада и значај истраживања. Поред тога, дат је и сажет приказ свих поглавља рада.

У другом поглављу приказан је преглед стања у области истраживања и извршена класификација и анализа постојеће литературе према предмету истраживања.

Треће поглавље приказује анализу електролучних поступака заваривања у заштитној атмосфери инертних и активних гасова, тј. МИГ/МАГ поступка. У оквиру овог поглавља приказана је структура опреме за МИГ/МАГ поступке и анализирани су физички феномени у течном купатилу који утичу на геометрију шава. Описани су и основни параметри технологије МИГ/МАГ поступка заваривања.

Четврто поглавље садржи теоријску анализу процеса размене топлоте при заваривању лимова МАГ поступком. У оквиру овог поглавља, развијен је аналитички квазистационарни модел размене топлоте при заваривању лимова МАГ поступком. Процес је описан нестационарном диференцијалном једначином елиптичког типа. За њено решавање као и за узмање у обзир почетних и граничних услова примењен је метод коначних разлика. Добијени систем од 27 диференцијалних једначина је због нелинеарности решен итеративним путем, применом мултигрид и релаксационог метода за тачку. Нелинеарност модела последица је зависности термо-физичких карактеристика материјала од температуре. Моделирање ових зависности изведено је комбинацијом Fe-Fe₃C и постојећих модела за одређивање температура трансформације у наведеном дијаграму. Модели су формиран за челик P355GH. За решавање система диференцијалних једначина развијен је програм МАГЗД у програмском пакету MATLAB који, на основу одговарајућих улазних података, као излаз даје симулацију температурског поља у тачкама мреже. Применом постојећих аналитичких модела микроструктурних трансформација, тј. разлагања аустенита при хлађењу завареног споја, формиран је, такође у програмском пакету MATLAB, програм који на основу симулираног температурског поља даје расподелу микроструктура, тј. израчунава тврдоћу по Викерсу у тачкама прорачунске мреже.

Пето поглавље даје приказ експерименталне опреме као и услова под којим су изведена експериментална истраживања. Експерименти су изведени на лимовима од челика P355GH, дебљине 6 mm, на заваривачком роботу FANUC ArcMate 100iC. Укупно су заварена три експериментална узорка. Из заварених узорака направљени су макро - пресеци на којима је извршено мерење геометрије шава, снимање микроструктуре у четири зоне завареног споја као и мерење микротврдоће у одговарајућим тачкама макро - пресека.

Шесто поглавље приказује поступак калибрације и валидације модела. У циљу смањења прорачунског времена, нумерички модел размене топлоте, замењен је метамоделима који описују различите параметре геометрије шава као и средње вредности тврдоће према Киркалдијевом и Лијевом моделу. Метамоделирање је изведено применом методе одзивних површина уз коришћење кубне интерполације. У оквиру овог поглавља, развијено је шест различитих модела за калибрацију симулационог модела применом вишекритеријумског генетског алгоритма на бази скупа експерименталних резултата. На овај начин, одређене су функционалне зависности неодређених параметара, у овом случају, коефицијента корисног дејства електричног лука и параметри топлотног извора од параметара технологије МАГ поступка. Поређењем симулираних и експерименталних вредности параметара геометрије о средње вредности тврдоће у мерним тачкама, изабран је калибрациони модел који даје најмању грешку.

Седмо поглавље приказује поступак одређивања параметара технологије МАГ поступка заваривања на бази тражених критеријума. Одређивање параметара је изведено применом вишекритеријумског генетског алгоритма при чему је функција циља формирана применом методе најмањих квадрата. Функција циља је заснована на захтеваним геометријским и механичким карактеристикама завареног споја. Такође у оквиру овог поглавља дата је упоредна анализа резултата симулације базиране на израчунатим вредностима параметара технологије и експерименталних резултата.

Последње, осмо поглавље, садржи критички осврт на добијене резултате теоријског и експерименталног дела дисертације, одговарајуће закључке у односу на постављене циљеве рада као и правце даљих истраживања.

На крају дисертације дат је преглед коришћене литературе и прилог у коме су приказане вредности геометријских параметара као и минималне, максималне и средње вредности тврдоће добијене коришћењем Киркалдијевог и Лијевог модела а које су коришћене за формирање метамодела у петом поглављу.

На основу свега наведеног, Комисија закључује да су у потпуности испуњени очекивани резултати наведени у Извештају комисије за оцену подобности теме и кандидата докторске дисертације, број 332/1 од 12.6.2013. године и да је испоштован оквирни садржај рада наведен у поменутом Извештају.

5. Научни резултати докторске дисертације

Кандидат је кроз докторску дисертацију извршио анализу и систематизацију постојећих знања из области симулационог моделирања у заваривању. Током истраживања, кандидат је дошао до резултата који имају значај и у научном и у практичном смислу:

- развијен је аналитички модел размене топлоте у завариваним лимовима, за случај сученог споја, без припреме ивица основног материјала,
- на бази аналитичког модела, развијен је и нумерички модел, при чему су узети у обзир и реални гранични услови на површинама завариваних лимова. На бази нумеричког модела, креиран је и софтвер МАГЗД који се показао као поуздан и веома ефикасан у погледу времена потребног за добијање крајњих резултата. У комбинацији са моделима разлагања аустенита, развијени модел размене топлоте током заваривања, омогућује карактеризацију геометрије и микроструктуре завареног споја,
- моделиране су температурске зависности густине, топлотне проводљивости и ефективног специфичног топлотног капацитета за челик P355GH,
- предложена је методологија калибрације симулационог модела на бази геометријских и механичких карактеристика завареног споја, а на бази ње је дефинисано и шест различитих модела калибрације за одређивање вредности два неодређена параметра,
- добијени калибрациони модели су тестирани у комбинацији са нумеричким моделом а затим је извршена и компаративна анализа грешака сваког од модела калибрације у односу на експерименталне резултате,
- предложена је методологија и алгоритам за одређивање параметара технологије МАГ поступка заваривања на бази захтеваних геометријских и механичких карактеристика завареног споја.

- предложена методологија и алгоритам, тестирани су на реалном проблему, при чему су добијена веома добра слагања са експерименталним резултатима.

6. Применљивост и корисност резултата у теорији и пракси

Применом развијеног аналитичко – нумеричког симулационог модела процеса заваривања, у комбинацији са предложеном методологијом калибрације симулационог модела, на бази малог скупа експерименталних података, као и методологијом за одређивање параметара технологије на бази вишекритеријумског оптимизационог алгоритма, могуће је одредити параметре технологије поступка заваривања на бази захтеваних геометријских и механичких карактеристика завареног споја независно од врсте основног и додатног материјала као и од поступка заваривања. Развијено софтверско решење, МАГЗД, представља полазну основу за валидацију технологије МАГ поступка заваривања, чиме се могу избећи скупа и дуготрајна експериментална истраживања.

7. Начин презентирања резултата научној јавности

Део резултата из ове дисертације је већ презентован објављивањем радова у међународним научним часописима као и на међународним научним конференцијама.

Комисија сматра да истраживања и резултати докторске дисертације представљају користан и обиман материјал за публикавање у међународним и националним научним часописима као и на међународним и националним конференцијама које се баве проблемима симулација у заваривању али и заваривања уопште.

8. Закључак и предлог Комисије

На основу увида у резултате истраживања презентоване у докторској дисертацији и на основу свега претходно наведеног Комисија доноси следећи

ЗАКЉУЧАК

Докторска дисертација кандидата мр Мише Бјелића, дипл. инж. маш., у потпуности је реализована сагласно плану истраживања и постављеним хипотезама. Дисертација представља оригиналан резултат вишегодишњег научно – истраживачког рада кандидата уз коришћење савремених метода као и савремене научне и стручне литературе. Кандидат је показао висок степен стручног знања као и способност и зрелост за самосталан научно – истраживачки рад.

Докторска дисертација кандидата мр Мише Бјелића, дипл. инж. маш., по квалитету, обиму и резултатима истраживања задовољава све формалне и суштинске услове одређене Законом о високом образовању и прописима Универзитета у Крагујевцу и Факултета за машинство и грађевинарство у Краљеву.

На основу свега наведеног, предлагемо Наставно – научном већу Факултета за машинство и грађевинарство у Краљеву и Већу за техничко – технолошке науке Универзитета у Крагујевцу, да прихвате докторску дисертацију кандидата мр Мише Бјелића дипл. маш. инж. под насловом:

"КАРАКТЕРИЗАЦИЈА ГЕОМЕТРИЈЕ И МИКРОСТРУКТУРЕ ШАВА НА БАЗИ ТО-ПЛОТНОГ И МЕТАЛУРШКОГ МОДЕЛА МАГ ПОСТУПКА ЗАВАРИВАЊА КАО ОС-НОВА ЗА ОДРЕЂИВАЊЕ ПАРАМЕТАРА ТЕХНОЛОГИЈЕ."

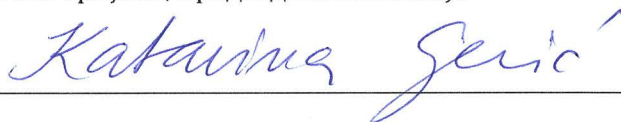
као успешно урађену и да позову кандидата на усмену јавну одбрану дисертације.

У Краљеву,

јун, 2016. године

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

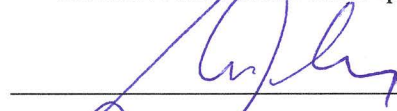
1. **др Катарина Герић**, редовни професор, Факултет техничких наука Универзитета у Новом Саду, ужа научна област: Наука о материјалима и инжењерски материјали, председник Комисије



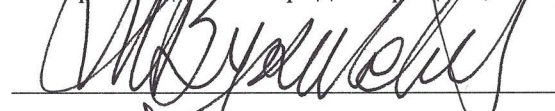
2. **др Вукић Лазич**, редовни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, ужа научна област: Производно машинство и индустријски инжењеринг, члан Комисије



3. **др Драган Милчић**, редовни професор, Машински факултет Универзитета у Нишу, ужа научна област: Машинске конструкције, члан Комисије



4. **др Миомир Вукићевић**, ванредни професор, Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву Универзитета у Крагујевцу, ужа научна област: Производни и обрадни процеси, члан Комисије



5. **др Мирко Бапић**, ванредни професор, Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву Универзитета у Крагујевцу, ужа научна област: Производно машинство, члан Комисије

