

УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ

ФАКУЛТЕТ ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА

Бр. 01-1 / 519

13.02. 2017 год.

КРАГУЈЕВАЦ

**НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ  
ФАКУЛТЕТА ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА И ВЕЋУ ЗА ТЕХНИЧКО-ТЕХНОЛОШКЕ  
НАУКЕ УНИВЕРЗИТЕТА У КРАГУЈЕВЦУ**

**Предмет:** Извештај комисије о оцени научне заснованости теме докторске дисертације и испуњености услова кандидата Вукашина Славковића, дипл. маш. инж.

Одлуком Већа за техничко-технолошке науке Универзитета у Крагујевцу број IV-04-63/22 од 18.01.2017. године именовани смо за чланове Комисије за оцену научне заснованости теме и испуњености услова кандидата **Вукашина Славковића**, дипл. маш. инж. као и оцену теме докторске дисертације под насловом:

**РАЗВОЈ И ПРИМЕНА МАТЕРИЈАЛНОГ МОДЕЛА ПОЛИМЕРНИХ  
МАТЕРИЈАЛА СА СВОЈСТВОМ ПАМЋЕЊА ОБЛИКА**

која припада научној области Машинско инжењерство и ужој научној области Примењена механика. На основу увида у приложену документацију, Комисија подноси Наставно-научном већу Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу следећи:

**ИЗВЕШТАЈ**

**1. Научни приступ проблему предложеног нацрта докторске дисертације и процена научног доприноса крајњег исхода рада**

У предложеном нацрту докторске дисертације кандидат је дао образложен предмет истраживања наводећи актуелност и значај истраживања у области изучавања понашања полимера.

Полимери као материјали имају веома широку примену у индустрији, производњи и паковању хране, медицине и др. У предлогу је истакнут значај истраживања у области проучавања понашања полимера базираних на експерименталним проучавањима и нумеричком моделирању. Посебна пажња се поклања групи полимера са својством памћења облика. Наведена група полимера има велики значај и примену у области медицине, авио и ауто индустрији и аутоматици. Са становишта примене у медицини посебно је значајна биокомпатибилност и биоразградивост код израде стентова и импланата.

Предложена методологија истраживања је општа а у предложеном нацрту тезе посебан нагласак се даје групи полимера ПЛА и кополимера због погодност и примене у медицини и производњи из обновљивих извора. Делови од наведених полимера могу се производити поступцима 3Д штампе и имају ниску цену.

Кандидат је предложио програм истраживања у наведеној области који је у складу савременим научним методама истраживања. Истраживања се базирају на експерименталним истраживањима на расположивој опреми. Обрада експерименталних резултата и одређивања материјалних параметара и коришћење у предложеним моделима који описују понашање



полимера. Развој и побољшање модела за описивање понашања полимера и њихову уградњу и верификацију у софтверу базираном на методи коначних елемената.

Имајући у виду приказ проблема истраживања, полазне хипотезе и предложене научне методе истраживања приказани нацрт докторске дисертације садржи све елементе који су потребни да би се у изради докторске дисертације дао научни допринос значајан за даљи развој научних истраживања у области експерименталног и теоријског изучавања понашања полимера.

#### Веза са досадашњим истраживањима

Научно-истраживачка активност кандидата припада области примењене механике и рачунарског инжењерства, а уско је везана за нумеричке методе као што је метод коначних елемената. Такође, кандидат је радио на имплементацији материјалног модела у софтвер базиран на методи коначних елемената и решавању спрегнутих термомеханичких проблема. То доказују научни и стручни радови објављени у научним и стручним часописима, као и радови презентовани на међународним конгресима и националним скуповима. Прва интересовања кандидата била су усмерена на изучавање хипереластичних модела, док се касније кандидат фокусирао на материјалне модела полимерних материјала, а посебно на групу полимера са памћењем облика ПЛА. Рад у оквиру ове дисертације омогућава кандидату да оствари континуитет у свом истраживачком раду, што поред стручног усавршавања кандидата има за циљ и расветљавање проблематике у поменутој области истраживања.

## **2. Образложење предмета, метода и циља који уверљиво упућују да је предложена тема од значаја за развој науке**

#### Предмет, циљеви и хипотезе ове дисертације обухватају следеће:

Полимери са памћењем облика спадају у групу термопластичних материјала који могу обновити деформацију већу од 100% након што су деформисани од трајног на привремене облик у тзв. процесу програмирања. Ефекат памћења може се активирати неким од спољних стимуланса: грејањем, радијацијом, електричним или магнетним пољем. У примени су највише полимери са својством памћења облика са термичком активацијом памћења облика. Термопластике са памћењем облика немају хемијских међувеза могу бити топљене и реконфигурисане више пута. Велики број истраживача и тимова кроз специјализоване истраживачке пројекте се бави експерименталним истраживањима која имају за циљ истраживање понашања полимера у различитим условима примене. Посебно се анализира утицај промене температуре, напона и брзине деформација на понашање полимера.

У примени је већи број полимера са својством памћења облика који се добијају одговарајућим технологијама производње. У овом раду ће због својих особина, ниске цене погодности за производњу ЗД штампом а недовољно истраженим својствима структура предмет изучавања бити група полимера ПЛА (енг. polylactic acid) полимер. Постоје различити ко-полимери ПЛА (ПЛЛА, ПДЛА, ПДЛЛА). Методологија која се развија за нумеричко моделирање и експерименталне процедуре је општег карактера и може се применити у општем случају при проучавању понашања полимера.

ПЛА је постојана, биоразградива термопластика са својством памћења облика која се добија из обновљивих извора и у широкој је примени јер је одликује транспарентност, добре



механичке карактеристике, ниска токсичност, биоразградивост и биокомпатибилност. Као друге полимерне материјале ПЛА карактерише зависност од температуре и брзине деформације што резултује значајним падом механичких карактеристика на повишеним температурама. Температура фазне промене у ПЛА зависно од произвођача јесте између 55-60 степени целзијуса док се уочава значајан пад механичких карактеристика већ на температурама већим од 50 степени. Број научних радова и докторских дисертација који се баве истраживањем ПЛА и полимера са својством памћења облика порастао је у последњој деценији преко пет пута што јасно сведочи о актуелности предложене теме и поља истраживања.

У новије време делови од ПЛА полимера се израђују 3Д штампом. Посебно су актуелна експериментална и теоријска истраживања утицаја поступка штампе на механичка својства произведених делова. Планира се експериментално испитивање епрувета произведених 3Д штампом на затезање и притисак и експериментално истраживање ефекта памћења облика код делова произведених 3Д штампом. Посебна пажња у току истраживања биће посвећена утицају начина израде епрувета 3Д штампом на њихово механичко понашање као експерименталном проучавању ефеката главних параметара израде на механичке карактеристике делова израђених 3Д штампањем.

Предмет истраживања јесте и анализа и дискусија постојећих конститутивних модела који описују понашање полимера са својством памћења облика и предлог њиховог унапређења и имплементације ради нумеричке анализе методом коначних елемената.

Нумеричко моделирање понашања полимера са својством памћењем облика захтева испитивање и моделирање у случајевима различитих термо-механичког околности. Извршена експериментална испитивања показала су природу понашања ПЛА које предложени феноменолошки модел треба да задовољи како би тачно симулирао понашање материјала. Осим тачности у симулирању понашања материјала, једна од битних одлика јесте ефикасност и једноставност предложеног решења ради лакше имплементације и коришћења.

Главна предност наведених унапређења омогућава други циљ овог рада: могућност коришћења истог конститутивног модела за решавање проблема чија анализа захтева примену теорије великих деформација. Мере деформација које ће бити коришћене су логаритамска и Грин-Лагранжеова деформација и њима енергетски конјуговане мере напона.

Основне хипотезе предложене дисертације настале су као резултат детаљног проучавања досадашњег истраживања и најновијих достигнућа и сазнања у области полимерних материјала са памћењем облика. Математичко описивање и решавање проблема структура направљених од полимера са својством памћења облика, захтева увођење следећих претпоставки:

- Сматра се да полимерни материјали могу достићи деформацију која прелази 100% деформације у појединим применама,
- У зависности од температуре полимерни материјали се могу наћи у две фазе које имају различиту структуру и особине: гумаста (мека) и стакласта (чврста) фаза,
- Узимајући у обзир режиме деформација који се јављају при експерименталним истраживањима као нужно се намеће разматрање великих деформација,



- Могуће је укупни градијент деформације представити мултипликативном декомпозицијом еластичног и нееластичног градијента деформације,
- Правац прираштаја пластичне (вископластичне) деформације у појединим гранама је колинеаран са правцем еластичног девијатора напона,
- Брзина ефективне пластичне деформације зависи од девијатора напона, брзине деформације и температуре,
- Током фазних промена и деформације у материјалу долази до промене температуре што захтева термо-механичку спрегу при интеграцији напона,
- Однос две фазе (гумасте и стакласте) зависи од температуре на којој се материјал налази,
- Промена стања у полимерима са својством памћења облика је повезана са температуром и напоном фазне промене

Основни циљеви истраживања су:

- дефинисање и унапређење материјалног модела за понашање полимерних материјала са својством памћења облика у поређењу са предложеним постојећим конститутивним моделима и упрошћавање модела извођењем променљивих у функцији ефективне пластичне деформације, температуре и односа фазних запремина
- омогућавање симулације понашања полимера са својством памћења облика са утицајем брзине деформације и температуре
- термо-механичко спрезање и дефинисање енергије дисипације ради тачније симулације понашања полимера са својством памћења облика зависно од брзине деформације и температуре
- обављање експерименталних испитивања утицаја брзине деформације и промене температуре на понашање полимера са памћењем облика на расположивој опреми
- обрада експерименталних података и идентификација материјалних параметара
- побољшање постојећих модела и имплементација у 1Д и проширивање у 3Д моделе
- развијање материјалног модела за решавање спрегнутих термомеханичких проблема значајних за моделирање понашања полимера
- коришћење експериментално одређених карактеристика материјала у развијеном материјалном моделу и поређење нумеричких и експерименталних резултата у циљу верификовања предложених модела
- предлог унапређења предложених модела у погледу тачности и ефикасности
- примена развијеног материјалног модела за решавање реалних проблема и поређење резултата добијених експерименталним резултатима и резултатима из литературе
- верификација тачности конститутивног модела кроз поређење са експерименталним резултатима и резултатима из литературе
- примена полимера са својством памћења облика у великом порасту како у медицини тако и у практичној свакодневној употреби на основу резултата експерименталних истраживања показује се јасна потреба развоја модела који би се бавио проблемом великих деформација

Наведени циљеви су у складу са текућим стањем у области на основу којих је кандидат формулисао основне хипотезе и предложио научне методе рада на дисертацији.

## Методе истраживања

Метод коначних елемената представља једну од најпознатијих нумеричких метода за симулацију понашања структура која укључује структурну анализу, провођење топлоте, струјање флуида итд. У анализи савремених материјала а нарочито материјала са памћењем облика (легура и полимера) велики је међусобни утицај физичких величина која често има велики утицај на целокупно понашање материјала, што изискује да проблеми третирају као мултифизички. Покушајем да се реше савремени мултифизички проблеми и користе мултифункционални материјали, потреба за спрезањем поља физичких величина се наметнула као једно од могућих решења за што тачнију симулацију понашања структура и одређивање напона, деформација, промене температуре и њеног утицаја на материјалне карактеристике. За успешно спрезање потребно је развити одговарајућа софтверска решења или доградити постојећа.

Планира се примена и доградња софтвера за нелинеарну анализу базираног на инкрементално-итеративном поступку. Са циљем да се тачност резултата симулације приближи експерименталним резултатима, биће коришћен тзв раздвојен приступ (eng. partitioned approach) спрезања постојећих програма за структурну анализу и анализу провођења топлоте. Као интерфејс који спаја ове програме, биће коришћен CTL (Component Template Library), тзв. шаблон библиотека за спрезање компонената, развијена на Институту за научно рачунарство, Техничког универзитета у Брауншвајгу. Block-Gauss-Seidel алгоритам ће бити коришћен као процедура која дефинише заједнички критеријум конвергенције приликом спрезања.

За одређивање материјалних карактеристика и калибрацију параметара планира се извођење експерименталних истраживања на епруветама израђеним од ПЛА полимера.

Експериментална истраживања се планирају на опреми Shimadzu ENF-EV101K3-070-0A у Центру за инжењерски софтвер и динамичка испитивања. Расположена опрема пружа могућност за испитивање на различитим брзинама деформације и температурама при испитивању на затезање и притисак.

Епрувете за испитивање могу да се израде исецањем од материјала добијеног од произвођача или 3Д штампањем. Планира се израда епрувета 3Д штампом на LeapFrog 3D уређају у Центру за Информационе Технологије (ЦИТ).

## Оквирни садржај докторске дисертације

1. Увод
2. Преглед и анализа постојећих приступа и конститутивних модела полимерних материјала
3. Експериментална опрема, испитивања, калибрација модела, одређивање материјалних карактеристика.
4. Конститутивни модели за анализу полимерних материјала
5. Нумеричка имплементација модела
6. Термо-механичка спрега програма за структурну анализу и провођење топлоте код полимерних материјала при различитим брзинама деформисања



7. Верификација спрегнутог термо-механичког модела. Поређење нумеричких резултата са експерименталним и публикованим резултатима.
8. Нумеричка анализа проблема и моделирање реалних структура израђених од полимера
9. Закључна разматрања
10. Литература
11. Прилози

### **3. Образложење теме за израду докторске дисертације које омогућава закључак да је у питању оригинална идеја или оригиналан начин анализирања проблема**

Комисија закључује да је предложена тема докторске дисертације **Развој и примена материјалног модела полимерних материјала са својством памћења облика** кандидата **Вукашина Славковића** оригинална идеја.

### **4. Усклађеност дефиниције предмета истраживања, основних појмова, предложене хипотезе, извора података, метода анализе са критеријумима науке уз поштовање научних принципа у изради коначне верзије докторске дисертације**

Кандидат Вукашин Славковић ће у својој дисертацији обухватити све елементе савременог научно-истраживачког начина рада поштујући основне критеријуме науке и научних циљева и метода анализе, имплементацијом постојећих и развијањем оригиналних идеја научног истраживања. Кандидат ће детаљно проверавати полазне хипотезе анализом обимне литературе и извора, у већини случајева новијег датума. С обзиром на то да су циљеви истраживања проистекли из недовољне истражености материјалних својстава полимера са својством памћења облика на бази ПЛА и одговарајућих кополимера као и недоступности резултата експерименталних термо-механичких испитивања ових материјала добијени резултати представљали би оригинални допринос кандидата истраживачкој области. На основу актуелности и апликативности теме, може се закључити да би ова дисертација имала значајан теоријски и практичан допринос у развоју области материјалних модела као и експерименталних истраживања полимерних материјала са својством памћења облика, а нарочито ПЛА и његових кополимера.

### **5. Преглед научно-истраживачког рада кандидата**

Рођен је 05. августа 1983. године у Крагујевцу, Република Србија од оца Радована и мајке Бориславе. Основно образовање је завршио 1998. године у основној школи "Мирко Јовановић" у Крагујевцу. Школовање је наставио у Првој крагујевачкој гимназији, где је матурирао 2002. године. Исте године је уписао основне студије Машинског факултета у Крагујевцу. Основне студије завршио је са просечном оценом 9.45 и одбранио дипломски рад на смеру за Примењену механику и аутоматско управљање са оценом 10, после чега је уписао Докторске студије на истом факултету. Био је стипендиста МНТР у периоду 2010-2011. 2011. прешао је на научно-истраживачки пројекат МНТР и изабран у звање истраживач сарадник. Током рада на факултету у периоду од 2009. до данас био је ангажован у извођењу наставе на предметима Механика 1, Отпорност материјала и Механика 3.

Научно-истраживачка активност кандидата припада области примењене механике и рачунарског инжењеринга, а уско је везана за нумеричке методе као што је метод коначних елемената. Такође, кандидат је радио на имплементацији материјалног модела у софтвер базиран на методи коначних елемената и решавању спрегнутих термомеханичких проблема.



Кандидат је објавио 12 научних и стручних радова у домаћим и међународним часописима, као и на међународним скуповима. Учествовао је у реализацији 3 научно-истраживачка пројекта.

На основу података датих у оквиру биографије, као и на основу личног познавања кандидата, сматрамо да је кандидат Вукашин Славковић у досадашњем раду показао интересовање, самосталност, способност и креативност у научно-истраживачком раду. Кандидат говори и пише на енглеском језику, што је неопходно за научни рад.

Објављени радови кандидата

### **Радови објављени у истакнутим међународним часописима**

#### **Категорија М21**

1. Dunić Vladimir, Busarac Nenad, **Slavković Vukašin**, Rosić Bojana, Niekamp Rainer, Matthies Hermann, Slavković Radovan, Živković Miroslav, A thermo-mechanically coupled finite strain model considering inelastic heat generation, *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, Vol.28, No.4, pp 993–1007, ISSN 0935-1175, Doi <http://dx.doi.org/10.1007/s00161-015-0442-5>, 2016

### **Радови у националним часописима**

#### **Категорија М53**

2. Vladimir Dunić, Nenad Busarac, Dragan Rakić, **Vukašin Slavković**, Radovan Slavković, Miroslav Živković, Thermo-mechanical coupling procedure using partitioned approach – Application to arc welding simulation, *Journal of Serbian Society for Computational Mechanics*, Vol.6, No.1, pp. 29-44, ISSN 1820-6530, 2012

### **Саопштења са међународних научних скупова штампана у целини**

#### **Категорија М33**

3. Radovan Slavković, **Vukašin Slavković**, Miroslav Živković, Vladimir Dunić, Stress integration for FCC crystal plasticity by finite element method, *The 3rd International Conference of Serbian Society of Mechanics (IConSSM 2011)*, Vlasinsko Jezero, 2011, ISBN 978-86-909973-3-6

4. Vladimir Dunić, Nenad Busarac, **Vukašin Slavković**, Nenad Grujović, Miroslav Živković, Radovan Slavković, Partitioned thermo-mechanical coupling procedure of FEM components, *Fourth Serbian (29th Yu) Congress on Theoretical and Applied Mechanics*, Vrnjačka Banja, Serbia, 2013, 4-7 June 2013

5. Vladimir Dunić, Radovan Slavković, Nenad Busarac, **Vukašin Slavković**, Miroslav Živković, Implicit integration method of Shape Memory Alloys constitutive model, *SEECM III, 3rd South-East European Conference on Computational Mechanics*, Kos Island, Greece, 2013

6. Nenad Busarac, Vladimir Dunić, **Vukašin Slavković**, Radovan Slavković, Partitioned approach thermo-mechanical coupling with consideration to cyclic plasticity model at large deformations, *The 5th International Congress of Serbian Society of Mechanics*, Arandelovac, 2015, June 15-17, ISBN 978-86-7892-715-7

7. Vladimir Dunić, Nenad Busarac, **Vukašin Slavković**, Radovan Slavković, Thermo-mechanical Numerical Analysis of Stent Unit Cell, *15th IEEE International Conference on BioInformatics and BioEngineering*, Beograd, 2015, November 02-04, ISBN 978-1-4673-7982-3

8. Vladimir Dunić, Nenad Busarac, **Vukašin Slavković**, Radovan Slavković, Implicit thermo-mechanical stress integration of shape memory alloys, The 5th International Congress of Serbian Society of Mechanics, Arandelovac, 2015, June 15-17, 2015, ISBN 978-86-7892-715-7

9. **Vukašin Slavković**, Nenad Busarac, Vladimir Dunić, Radovan Slavković, Implicit stress integration algorithm for polymeric materials at wide range of strain rates and temperatures, The 5th International Congress of Serbian Society of Mechanics, Arandelovac, 2015, June, 15-17, ISBN 978-86-7892-715-7

#### Саопштења на међународним научним скуповима штампани у изводу

##### Категорија М34

10. Vladimir Dunić, Radovan Slavković, Nenad Busarac, **Vukašin Slavković**, Miroslav Živković, Implicit stress integration method of Shape Memory material model, GAMM – 84th Annual Meeting of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics, Novi Sad, Srbija, 2013, Proc. Appl. Math. Mech. pp. 151-152, ISBN 1617-7061, Doi <http://dx.doi.org/10.1002/pamm.201310071>

11. Vladimir Dunić, Elzbieta Pieczyska, Nenad Busarac, Radovan Slavković, **Vukašin Slavković**, Partitioned Thermo-Mechanical Coupling of SMA Constitutive Model, 39th SOLID MECHANICS CONFERENCE, Poljska, Zakopane, 2014, 01.09. - 05.09., pp. 255-256, ISBN 978-83-89687-89-0

#### Саопштења на скуповима националног значаја штампана у целини

##### Категорија М63

12. Vladimir Dunić, Nenad Busarac, **Vukašin Slavković**, Radovan Slavković, Miroslav Živković, Performance analysis of FEM software on different computer architectures, YuInfo2012 Conference, Kopaonik, 2012



На основу свега наведеног у претходним тачкама овог извештаја Комисија доноси следећи

### ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ КОМИСИЈЕ

Вукашин Славковић, дипломирани машински инжењер, испунио је све предвиђене услове за израду докторске дисертације.

Комисија предлаже Наставно-научном већу Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу и Већу за техничко-технолошке науке Универзитета у Крагујевцу да наведену предложену тему за докторску дисертацију:

#### РАЗВОЈ И ПРИМЕНА МАТЕРИЈАЛНОГ МОДЕЛА ПОЛИМЕРНИХ МАТЕРИЈАЛА СА СВОЈСТВОМ ПАМЋЕЊА ОБЛИКА

прихвати и одобри њену израду кандидату Вукашину Славковићу дипл. инж. маш.

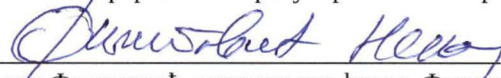
Комисија предлаже да ментор ове докторске дисертације буде др Ненад Грујовић, редовни професор Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу.

У Крагујевцу,  
10.02.2017.

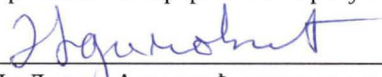
КОМИСИЈА:



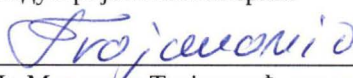
Др Мирослав Живковић, ред. професор, председник  
комисије,  
Факултет инжењерских наука, Универзитет у  
Крагујевцу,  
Уже научне области: Примењена механика,  
Примењена информатика и рачунарско инжењерство



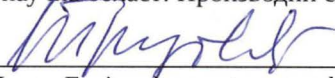
Др Ненад Филиповић, редовни професор, Факултет  
инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу,  
Уже научне области: Примењена механика,  
Примењена информатика и рачунарско инжењерство



Др Драгана Адамовић, редовни професор,  
Факултет инжењерских наука, Универзитет у  
Крагујевцу,  
Уже научне области: Производно машинство,  
Индустријски инжењеринг



Др Мирослав Трајановић, редовни професор,  
Машински факултет, Универзитет у Нишу,  
Уже научна област: Производни системи и технологије



Др Ненад Грујовић, редовни професор, Факултет  
инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу,  
Уже научне области: Примењена механика,  
Примењена информатика и рачунарско инжењерство