

УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
ФАКУЛТЕТ ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА
УНИВЕРЗИТЕТА У КРАГУЈЕВЦУ

ФАКУЛТЕТ ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА
УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ

Бр. 0111418

4.05. 2022 год.
КРАГУЈЕВАЦ

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидаткиње Јелене Живковић, мастер инжењера машинства

Одлуком Већа за техничко-технолошке науке Универзитета у Крагујевцу број IV-04-312/2 од 27.04.2022. године, на предлог Наставно-научног већа Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу (одлука бр. 01-1/1239-11 од 21.04.2022. године), именовани смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидаткиње Јелене Живковић, мастер инжењера машинства, под насловом:

„УНАПРЕЂЕЊЕ, ИМПЛЕМЕНТАЦИЈА И ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ВЕРИФИКАЦИЈА НУМЕРИЧКОГ МОДЕЛИРАЊА ОШТЕЋЕЊА И ЛОМА МЕТАЛА ПРИМЕНОМ ФАЗНОГ МОДЕЛИРАЊА“

На основу увида у приложену докторску дисертацију и Извештаја комисије о оцени научне заснованости теме докторске дисертације и испуњености услова кандидаткиње, која је одобрена за израду одлуком Наставно-научног већа Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу бр. 01-1/2868-6 од 29.08.2019. године и одлуком Већа за техничко-технолошке науке бр. IV-04-715/8 од 11.09.2019. године, а на основу Правилника о пријави, изради и одбрани докторске дисертације Универзитета у Крагујевцу, Комисија подноси Наставно-научном већу Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу следећи

ИЗВЕШТАЈ

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

Докторска дисертација кандидаткиње Јелене Живковић, мастер инжењера машинства, под насловом „Унапређење, имплементација и експериментална верификација нумеричког моделирања оштећења и лома применом фазног моделирања“, представља резултат оригиналног научно-истраживачког рада кандидаткиње у области моделирања оштећења и лома применом фазног поља оштећења помоћу експерименталних и нумеричких метода. Ова докторска дисертација

представља јединствен научни рад у погледу предмета истраживања и добијених експерименталних и нумеричких резултата.

Оштећење и лом материјала доводе до финансијских губитака, а могу представљати и опасност по околину и људски живот. Предвиђање и спречавање појаве отказа у конструкцијама у фазама пројектовања, израде и експлоатације је од великог значаја у инжењерству. Нумеричке симулације Методом коначних елемената (МКЕ) постепено постају примарни начин за превенцију појаве оштећења и лома у конструкцији. Потребно је развити поуздану нумеричку методу за анализу оштећења и лома која ће омогућити пројектовање нових конструкција, као и процену интегритета, поузданости и века трајања већ постојећих конструкција или њихових компонената у којима су већ уочене прслине. Дискретне методе се најчешће користе за нумеричко моделирање појаве и развој оштећења до настанка лома и у њима је прслина представљена као оштар геометријски дисконтинуитет. Недостатак дискретних метода је увођење додатних критеријума за иницирање, правац ширења и смер раста прслине, а проблем може бити и нумеричко праћење дисконтинуитета прслина које је нарочито сложено код 3Д проблема. Алтернативни приступ дискретном моделирању прслине је континуални приступ који уводи параметар оштећења који утиче на крутост материјала и релаксацију напона повезаних са стварањем прслина.

Модел фазног поља оштећења (енг. Phase Field Damage Model - PFDM) је једна од најсавременијих метода у прорачунској механици чврстих тела за симулацију предвиђања развоја оштећења и прслина у материјалу. Ова метода је у предности у односу на постојеће поступке моделирања оштећења и лома јер моделира прслину као континуалну промену од неоштећеног до потпуно оштећеног материјала кроз увођење параметра фазног поља оштећења. Овај параметар глатко интерполира између вредности додељених различитим фазама чиме се избегава појава дисконтинуитета. У овој дисертацији је модификован и унапређен приступ PFDM и имплементиран у софтверски пакет ПАК који ради на принципу МКЕ, заједно са модификованим фон Мизесовим материјалним моделом за пластичност метала, у циљу нумеричке симулације жилавог понашања метала. Имплементација је извршена кроз дискретизацију помоћу стандардних коначних елемената и наизменичну шему спрезања. Имплементирана унапређења PFDM су: нов облик променљиве спрезања пластичности и оштећења која се активира након достизања критичне вредности еквивалентне пластичне деформације и проширење фон Мизесовог модела двоинтервалском функцијом течења која се састоји од 1) перфектне пластичности или линеарног ојачања и 2) проширене Симове функције ојачања. Алгоритам интеграције напона за фон Мизесову пластичност је заснован на мултипликативној декомпозицији градијента деформације и на природној (логаритамској) мери деформације. Имплементирани унапређени приступ PFDM је прво верификован на примеру са једним коначним елементом из литературе. Спроведена су експериментална испитивања једноосним затезањем епрувета легуре алуминијума 5083 (стања Н111 и Н321) и конструкционог челика S355 у циљу идентификације материјалних параметара који су након калибрације коришћени у нумеричким симулацијама одговарајућих МКЕ модела. Забележено је одлично квалитативно и квантитативно преклапање кривих зависности

сила-померање добијених експериментално и нумерички. Предности предложених модификација имплементираних PFDM су боља контрола симулације развоја оштећења у конструкцијама направљеним од легуре алуминијума или челика, као и лако проширење постојећег фон Мизесовог модела пластичности.

Због свега наведеног, Комисија сматра да резултати и закључци ове дисертације отварају простор за даља истраживања у овој научној области, јер спроведена обимна експериментална испитивања, као и модификован PFDM за предвиђање настанка и развоја оштећења у металима, имају велики потенцијал за даљи развој у области механике лома и оштећења.

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

Докторска дисертација кандидаткиње Јелене Живковић, мастер инжењера машинства, под насловом „Унапређење, имплементација и експериментална верификација нумеричког моделирања оштећења и лома метала применом фазног моделирања“ представља резултат оригиналног научно-истраживачког рада кандидаткиње у актуелној научној области. На основу експерименталних резултата и резултата добијених нумеричком анализом на примеру два стања алуминијумске легуре 5083 (H111 и H321), као и конструкционог челика S355, приказаних у овој докторској дисертацији, може се закључити да дисертација представља оригинални научни рад. Кандидаткиња је тему обрадила темељно детаљном анализом доступних литературних извора из разматране области.

На основу детаљног прегледа и анализе научних радова из области докторске дисертације може се закључити да постоје значајне фундаменталне разлике у односу на друга научна истраживања, па је у том смислу докторска дисертација оригинална.

Оригиналност научног рада, истраживања и добијених резултата у оквиру ове дисертације огледа се у следећем:

- Епрувете са попречним пресеком у облику правоугаоника за експериментална испитивања једноосним затезањем припремљене су у три правца сечења, под углом од 0° , 45° и 90° у односу на правац ваљања у компанији Siemens Mobility doo Црновац од легуре алуминијума 5083 (стања H111 и H321) и од конструкционог челика S355 у компанији АММ у оквиру MIND Групе у Лужницама;
- Металографска испитивања и хемијска анализа припремљених епрувета изведени су у IMW Институту Лужницама;
- Испитивања једноосним затезањем припремљених епрувета спроведена су на собној температури у Центру за инжењерски софтвер и динамичка испитивања Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу у циљу верификације реформулисаних и унапређених PFDM;
- Коришћењем експериментално добијених резултата идентификовани су материјални параметри који су калибрисани помоћу методе најмањих квадрата за коришћење у нумеричким симулацијама;

- Модификовани PFDM имплементиран је у МКЕ софтверски пакет ПАК кроз дискретизацију помоћу стандардних коначних елемената и наизменичну шему спрезања померања и фазног поља оштећења;
- Уведена је двоинтервалска функција ојачања која омогућава прецизну симулацију понашања испитаних метала, где први интервал представља перфектну пластичност или линеарно ојачање, а други интервал је проширена Симова функција течења са ојачањем;
- Приступ PFDM је реформулисан тако да зависи од ефективних вредности напона и деформације;
- Променљива спрезања померања и фазног поља оштећења је модификована тако да узима у обзир утицај оштећења изазваног пластичним деформацијама тек после постизања максималног напона;
- Имплементирани алгоритам интеграције напона за фон Мизесову пластичност за случај великих деформација је заснован на мултипликативној декомпозицији градијента деформације и на природној (логаритамској) мери деформације;
- Анализиран је утицај величине инкремента задатог оптерећења, као и утицај густине мреже коначних елемената на добијене резултате нумеричке симулације;
- Експерименталним испитивањима епрувета алуминијумске легуре 5083 кандидат је дошао до резултата који показују зависност материјалних параметара од брзине деформације.

Потврђивањем постављених хипотеза, изведено је једно обимно истраживање са циљем реформулисања и унапређења приступа PFDM за анализу настанка и развоја оштећења и лома код металних материјала. Кандидаткиња је дошла до актуелних и оригиналних научних резултата који налазе примену у пракси.

3. Преглед остварених резултата кандидаткиње у одређеној области

3.1 Биографија кандидаткиње

Јелена Живковић је рођена 10. јуна 1989. године у Крагујевцу, Република Србија. Завршила је основну школу „Мома Станојловић“ у Крагујевцу и „Прву крагујевачку гимназију“ у Крагујевцу.

Машински факултет у Крагујевцу, у току студија промењено име у Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, уписала је 2008. године. Основне академске студије је завршила 2011. године са просечном оценом 9.57 (девет и 57/100) на смеру за Примењену механику и аутоматско управљање и оценом 10 на завршном раду под називом „Анализа тачности проширене методе коначних елемената“ под менторством проф. др Гордане Јовичић. Мастер академске студије је уписала 2011. године на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, смер за Примењену механику и аутоматско управљање, које завршава 2013. године са просечном оценом 9.88 (девет и 88/100). Мастер рад под називом „Развој нумеричког модела Ј-интеграла у еласто-пластичној механици лома применом методе еквивалентног

домена интеграције“ под менторством проф. др Гордане Јовичић одбранила је са оценом 10. Током основних и мастер студија била је стипендиста Министарства просвете, науке и технолошког развоја и Фонда за младе таленте Министарства омладине и спорта.

Докторске академске студије уписала је школске 2013/2014. године на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу. Положила је све предмете предвиђене планом и програмом са просечном оценом 10 и одобрена јој је израда докторске дисертације под насловом „Унапређење, имплементација и експериментална верификација нумеричког моделирања оштећења и лома метала применом фазног моделирања“ под менторством др Владимира Дунића, ванредног професора, Одлуком Већа за техничко-технолошке науке бр. IV-04-715/8, одржаног 11.09.2019. године.

На Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу запослена је као истраживач-сарадник од јануара 2014. године на пројекту Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије TR32036 „Развој софтвера за решавање спрегнутих мултифизичких проблема“, а тренутно ради у звању виши стручни сарадник. Током рада на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу била је ангажована у извођењу вежби на предметима Механика 1 (2014-), Механика 2 (2014-2015) и Механика 3 (2014-).

Током свог истраживања објавила је 31 научни рад у научно-стручним часописима и на међународним и домаћим конференцијама као аутор или коаутор. Учествовала је на две тренинг школе „From nano- to macro- biomaterials (design, processing, characterization, modelling) and applications to stem cells regenerative orthopaedic and dental medicine“ у оквиру COST пројекта NAMABIO, које су одржане 2013. у Италији и 2014. године на Кипру. Као КММ-VIN стипендиста боравила је месец дана 2015. године на Институту за механику материјала и конструкција, Технички универзитет у Бечу, Аустрија. Боравила је шест месеци на Департману за конструкције и геотехничко инжењерство, Sapienza Универзитет у Риму, Италија, у оквиру Erasmus+ међународног програма кредитне мобилности.

3.2 Референце кандидаткиње

Јелена Живковић је као аутор или коаутор објавила укупно **31** научни рад. Међу њима се истичу два рада објављена у врхунском међународном часопису као резултат истраживања током израде ове докторске дисертације. Објављени радови кандидаткиње су:

Рад у врхунском међународном часопису - категорија M21

1. Vladimir Dunić, **Jelena Živković**, Vladimir Milovanović, Ana Pavlović, Andreja Radovanović, Miroslav Živković, Two-Intervals Hardening Function in a Phase-Field Damage Model for the Simulation of Aluminum Alloy Ductile Behavior, *Metals*, Vol.11, No.11, 1685, ISSN 2075-4701, Doi 10.3390/met11111685, 2021
2. **Jelena Živković**, Vladimir Dunić, Vladimir Milovanović, Ana Pavlović, Miroslav Živković, A Modified Phase-Field Damage Model for Metal Plasticity at Finite Strains: Numerical Development and Experimental Validation, *Metals*, Vol.11, No.1, 47, ISSN 2075-4701, Doi 10.3390/met11010047, 2021

3. Branko Tadić, Saša Randelović, Petar Todorović, **Jelena Živković**, Vladimir Kočović, Igor Budak, Đorđe Vukelić, Using a High-Stiffness Burnishing Tool for Increased Dimensional and Geometrical Accuracies of Openings, Precision Engineering, Vol.43, No.-, pp. 335-344, ISSN 0141-6359, Doi 10.1016/j.precisioneng.2015.08.014, 2016

Рад у међународном часопису - категорија M23

1. Dušan Arsić, Vukić Lazić, Aleksandar Sedmak, Srbislav Aleksandrović, **Jelena Živković**, Milan Đorđević, Goran Mladenović, Effect of the elevated temperatures on mechanical properties of the ultra high strength hot-work tool steel H11, Transactions of FAMENA, Vol.44, No.2, pp. 71-82, ISSN 1333-1124, Doi <https://doi.org/10.21278/TOF.44207>, 2020
2. Vladimir Milovanović, Miroslav Živković, Gordana Jovičić, **Jelena Živković**, Dražan Kozak, The Influence of Wagon Structure Part Shape Optimization on Ultimate Fatigue Strength, Transactions of FAMENA, Vol.39, No.4, pp. 23-35, ISSN 1333-1124, 2016
3. Dušan Arsić, Milan Djordjević, **Jelena Živković**, Aleksandar Sedmak, Srbislav Aleksandrović, Vukić Lazić, Dragan Rakić, Experimental-Numerical Study of Tensile Strength of the High-Strength Steel S690QL at Elevated Temperatures, Strength of Materials, Vol.48, No.5, pp. 687-695, ISSN 0039-2316, Doi 10.1007/s11223-016-9812-x, 2016

Рад у часопису међународног значаја верификованог посебном одлуком - категорија M24

1. Dragan Adamović, Milentije Stefanović, Miroslav Živković, Slobodan Mitrović, **Jelena Živković**, Fatima Živić, Influence of the Lubricant Type on the Surface Quality of Steel Parts Obtained by Ironing, Tribology in Industry, Vol.37, No.2, pp. 215-224, ISSN 0354-8996, 2015

Саопштења са међународног скупа штампана у целини - категорија M33

1. **Jelena Živković**, Vladimir Dunić, Vladimir Milovanović, Miroslav Živković, Simulation of damage evolution in metal structures, 8th International Congress of the Serbian Society of Mechanics, Session M.3B: Mechanics of Solid Bodies (part III), Kragujevac, Serbia, 2021, 28-30 June, pp. 210-215, ISBN 978-86-909973-8-1
2. Dragan Adamović, **Jelena Živković**, Miloš Lazarević, Bogdan Nedić, Fatima Živić, Tomislav Vujinović, Application of the Ces Edupack Software in the Selection of the Aluminium Truss Joining, 38th International Conference on Production Engineering of Serbia - ICPE-S 2021, Cacak, Serbia, 2021, 14-15 October, pp. 250-260, ISBN 978-86-7776-252-0
3. Snežana Vulović, Vladimir Dunić, Miroslav Živković, Vladimir Milovanović, **Jelena Živković**, Redesign of PAK's interfaces to fit OSICE and CloudiFacturing requirements, ICIST 2020 - 10th International Conference on Information Society and Technology, Kopaonik, Serbia, 2020, Mar 8-11, pp. 226-229, ISBN 978-86-85525-24-7
4. Marija Rafailović, Miroslav Živković, **Jelena Živković**, Milan Bojović, Vladimir Milovanović, Correction of the strain field of linear tetrahedral finite element using

- strain smoothing method, The 7th International Congress of Serbian Society of Mechanics, Sremski Karlovci, Serbia, 2019, 24-26 June, pp. S1b:1-8, ISBN 978-86-909973-7-4
5. Vladimir Dunić, Miroslav Živković, Snežana Vulović, **Jelena Živković**, Vladimir Milovanović, Penalty method applied to structural strength assessment of the axial ball joint, The 7th International Congress of Serbian Society of Mechanics, Sremski Karlovci, Serbia, 2019, 24-26 June, pp. S1a:1-8, ISBN 978-86-909973-7-4
 6. Dragan Adamović, **Jelena Živković**, Bogdan Nedić, Fatima Živić, Slobodan Mitrović, Miroslav Živković, Analysis of the process parameters influence on the change of mean contact pressure in ironing process, 16th International Conference on Tribology, Serbiatrib '19, Kragujevac, Serbia, 2019, 15-17 May, pp. 474-481, ISBN 2620-2832
 7. Snežana Vulović, Miroslav Živković, Rodoljub Vujanac, **Jelena Živković**, Solution of Contact Problems Using the Finite Element Method, 4th International Scientific Conference COMETA 2018, Jahorina, Bosnia and Herzegovina, 2018, 27-30 November, pp. 253-260, ISBN 978-99976-719-4-3
 8. Andreja Ilić, Lozica Ivanović, Danica Josifović, Vukić Lazić, **Jelena Živković**, Effects of welding on mechanical and microstructural characteristics of high-strength low-alloy steel joints, The 10th International Symposium Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering (KOD 2018), Novi Sad, Serbia, 2018, 6-8 June, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 393(1):012020, doi:10.1088/1757-899X/393/1/012020
 9. Marija Rafailović, Miroslav Živković, Vladimir Milovanović, **Jelena Živković**, E4 and MITC4+ Shell Finite Element Performance Analysis, 6th International Congress of Serbian Society of Mechanics, Tara, 2017, June 19-21, pp. S4b:1-10, ISBN 978-86-909973-6-7
 10. Dragan Adamović, Miroslav Živković, Tomislav Vujinović, Slobodan Mitrović, **Jelena Živković**, Dragan Džunić, Damage and Destruction of Workpiece and Tool Surfaces in Ironing Process, 15th International Conference on Tribology - SERBIATRIB '17, Kragujevac, Serbia, 2017, 17 - 19 May, pp. 388-393, ISBN 978-86-6335-041-0
 11. Vladimir Milovanović, Nikola Jovanović, **Jelena Živković**, Aleksandar Dišić, Snežana Vulović, Miroslav Živković, Thermo-mechanical Analysis of Tank Wagon for Transportation of Molten Sulfur, 7th International Scientific and Expert Conference of the International TEAM Society, TEAM2015, Beograd, Srbija, 2015, 15-16 Oktobar, pp. 485-488, ISBN 978-86-7083-877-2
 12. **Jelena Živković**, Dragan Adamović, Miroslav Živković, Milentije Stefanović, Slobodan Mitrović, Fatima Živić, Electronic Databases for Materials Selection, 12th International Conference on Accomplishments in Electrical and Mechanical Engineering and Information Technology - DEMI 2015, Banja Luka, BiH, 2015, 29 - 30 May, pp. 569-576, ISBN 978-99938-39-53-8
 13. Dragan Adamović, Milentije Stefanović, Miroslav Živković, Slobodan Mitrović, **Jelena Živković**, Fatima Živić, Influence of Lubricant Type on the Surface Quality of Aluminium Parts Obtained by Ironing, 14th International Conference on Tribology SERBIATRIB '15, Belgrade, Serbia, 2015, 13-15 May, pp. 397-406, ISBN 978-86-7083-857-4

14. Radovan Petrović, Nenad Todić, **Jelena Živković**, Zoran Glavčić, Mathematical Modeling, Identification and Optimization of Parameters of the Valve Plate of the Water Hydraulic Piston-Axial Pump/Motor, VIII Triennial International Conference „Heavy Machinery-HM 2014“, Zlatibor, Serbia, 2014, 25-28 June, pp. D. 29-34, ISBN 978-86-82631-74-3
15. Radovan Petrović, **Jelena Živković**, Marko Topalović, Miroslav Živković, Gordana Jovičić, Analytical Stress Calculation in Spherical Tank and Experimental Verification, 13th Youth Symposium on Experimental Solid Mechanics, Decin, Czech Republic, 2014, 29 June – 2 July, pp. 92-95, ISBN 978-80-01-05556-4
16. **Jelena Živković**, Gordana Jovičić, Snežana Vulović, Željko Stepanović, Miroslav Živković, The Numerical Assessment of the Structural Integrity of the Tibia-Implant Using Failure Criteria, 4th International Congress of Serbian Society of Mechanics, Vrnjačka Banja, Serbia, 2013, 4-7 June, pp. 497-502, ISBN 978-86-909973-5-0
17. **Jelena Živković**, Gordana Jovičić, Miroslav Živković, Radovan Slavković, Accuracy Analysis of Extended Finite Element Method for Tension of Plate With a Central Crack, 11th Youth Symposium on Experimental Solid Mechanics, Brasov, Romania, 2012, 30th May – 2nd June, pp. 98-103, ISBN 978-606-19-0078-7

Саопштење са међународног скупа штампано у изводу - категорија M34

1. **Jelena Živković**, Vladimir Dunić, Vladimir Milovanović, Miroslav Živković, Phase-field modelling of damage in metallic materials, 37th Danubia-Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics, Linz, Austria, 2021, 21-24 September, pp. 37-38, ISBN 978-3-9504997-0-4
2. **Jelena Živković**, Vladimir Dunić, Miroslav Živković, Nenad Grujović, Numerical analysis of ductile fracture, 36th Danubia-Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics, Plzeň, Czech Republic, 2019, 24–27 September, pp. 163-164, ISBN 978-80-261-0876-4
3. Nenad Petrović, Nenad Kostić, Nenad Marjanović, **Jelena Živković**, Ileana Ioana Cofaru, Effects of structural optimization on practical roof truss construction, 9th International Scientific Conference on Research and Development of Mechanical Elements and Systems, IRMES 2019, Kragujevac, Serbia, 2019, 5-7 September, pp. 30-31, ISBN 978-86-6335-061-8

Рад у часопису националног значаја - категорија M52

1. Vladimir Milovanović, Miroslav Živković, Aleksandar Dišić, Dragan Rakić, **Jelena Živković**, Experimental and Numerical Strength Analysis of Wagon for Transporting Bulk Material, IMK-14 – Research & Development, Vol.20, No.2, pp. EN61-66, ISSN 0345-6829, 2014

Рад у научном часопису - категорија M53

1. Vladimir Dunić, **Jelena Živković**, Nenad Grujović, Material Modeling of Concrete, In: Brabzon D. (ed) Encyclopedia of Materials: Composites (Vol 2), Elsevier, br. strana: 8, ISBN 9780128197318, Amsterdam, Netherlands, 2021

2. **Jelena Živković**, Dragan Adamović, Miroslav Živković, Milentije Stefanović, Slobodan Mitrović, Fatima Živić, Electronic databases for materials selection, ANNALS of Faculty Engineering Hunedoara – International Journal of Engineering, Vol.14, No.2, pp. 177-182, ISSN 1584-2665, 2016

Саопштење са скупа националног значаја штампано у целини - категорија М63

1. Dragan Adamović, Fatima Živić, **Jelena Živković**, Miroslav Živković, Uticaj habanja na radni vek alata za duboko izvlačenje sa stanjenjem zida, 37. Savetovanje proizvodnog mašinstva Srbije, SPMS 2018, Kragujevac, Srbija, 2018, 25-26 October, pp. 19-27, ISBN 978-86-6335-057-1

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

Докторска дисертација кандидаткиње Јелене Живковић, мастер инжењера машинства, под насловом „Унапређење, имплементација и експериментална верификација нумеричког моделирања оштећења и лома метала применом фазног моделирања“ одговара по садржају теми прихваћеној од стране Наставно-научног већа Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу одржаној 29.08.2019. (број одлуке: 01-1/2868-6) и Већа за техничко-технолошке науке Универзитета у Крагујевцу одржаној 11.09.2019. (број одлуке: IV-04-715/8). Ова докторска дисертација по квалитету, обиму и резултатима истраживања у потпуности задовољава све научне, стручне и законске услове за израду докторских дисертација. Наслов докторске дисертације, урађена истраживања, као и циљеви проучавања су у складу са онима који су наведени у пријави теме.

Дисертација је написана на 117 страна, садржи 109 слика и 6 табела, а цитирана су 92 библиографска податка.

Дисертација је организована у 9 поглавља, и то:

1. Увод;
2. Преглед и анализа постојећих приступа моделирања лома;
3. Експериментална испитивања;
4. Моделирање лома применом модела фазног поља оштећења;
5. Имплементација у МКЕ софтвер ПАК;
6. Верификација модификованог модела фазног поља оштећења;
7. Закључак;
8. Литература;
9. Додатак.

Поглавље 1 приказује уводна разматрања проблема, мотивацију и циљ истраживања, уз релевантан преглед литературе у области механике лома и оштећења. У овом поглављу су такође наведене и методе коришћене током истраживања, као и садржај дисертације по поглављима.

У поглављу 2 је дат преглед и анализа постојећих приступа моделирања лома код метала. Објашњена је разлика између дискретног и континуалног приступа моделирању лома и приказана је предност моделирања лома применом фазног поља оштећења у односу на та два приступа.

Поглавље 3 садржи преглед спроведених експерименталних испитивања да би се верификовала наизменична итеративна шема и реформулисани и унапређени приступ PFDM. Извршена су једноосна испитивања затезањем за епрувете израђене од једних од најчешће коришћених материјала у индустрији: легуре алуминијума 5083 (стања H111 и H321), и од конструкционог челика средње чврстоће S355. Епрувете за испитивање су сечене под углом од 0° , 45° и 90° у односу на правац ваљања.

Детаљан опис PFDM је дат у поглављу 4. Представљено је извођење и спрезање водећих равнотежних једначина за PFDM, закона еволуције фазног поља оштећења, закона пластичног течења и ојачања, као и граничних услова Neumann-овог типа.

У поглављу 5 приказана је детаљна имплементација модификованог PFDM у МКЕ софтвер ПАК кроз дискретизацију помоћу стандардних коначних елемената и наизменичну шему спрезања. Приказана су главна побољшања PFDM: модификована променљива спрезања, која узима у обзир утицај оштећења изазваног пластичним деформацијама после постизања максималног напона, као и двоинтервалска функција течења за нумеричку симулацију понашања металних материјала. Та двоинтервалска функција течења обухвата два интервала у зони пластичности: 1) перфектна пластичност или линеарно ојачање и 2) проширена Симова функција течења са ојачањем. На крају поглавља, дат је алгоритам интеграције напона за фон Мизесову пластичност за случај великих деформација заснован на мултипликативној декомпозицији градијента деформације и на природној (логаритамској) мери деформације. Теорија је прилагођена да одговара наизменичној итеративној шеми за решавање померања и фазног поља оштећења.

Поглавље 6 садржи верификацију имплементираног модификованог PFDM применом репрезентативног примера са једним коначним елементом доступног у литератури, и уз помоћ резултата добијених експериментално једноосним затезањем S355 челичних и алуминијумских 5083 епрувета (стања H111 и H321). Помоћу методе најмањих квадрата калибрисани су материјални параметри за нумеричку симулацију и поређење са експерименталним резултатима. Поређење криве сила-померање експерименталног испитивања и резултата симулације дало је одлично квалитативно и квантитативно поклапање, док поље еквивалентне пластичне деформације у поређењу са деформисаном конфигурацијом епрувете даје добре резултате квалитативног поређења. Такође, приказана је и анализа утицаја величине корака, као и утицаја густине мреже коначних елемената на добијене нумеричке резултате.

У поглављу 7 дата су закључна разматрања резултата постигнутих током рада на изради дисертације, као и идеје за могуће правце даљих истраживања.

Поглавље 8 садржи списак коришћене литературе за израду ове докторске дисертације.

Поглавље 9 је додатак ове дисертације и садржи приказ микроструктуре испитиваних епрувета алуминијумске легуре 5083 и анализу утицаја брзине деформације на карактеристике материјала приликом њиховог испитивања једноосним затезањем.

5. Научни резултати докторске дисертације

Кандидаткиња Јелена Живковић, мастер инжењер машинства, је у оквиру своје докторске дисертације систематизовала и детаљно анализирала постојећа знања и искуства из области механике лома и оштећења, моделирања фазног поља оштећења и експерименталног испитивања металних материјала. У оквиру рада на докторској дисертацији, кандидаткиња је дошла до резултата и закључака који су и од научног, и од практичног значаја.

Најважнији научни резултати ове докторске дисертације су:

- На основу резултата експерименталног испитивања једноосним затезањем епрувета конструкционог челика S355 и легуре алуминијума 5083, који представљају једне од најзаступљенијих материјала у шинској индустрији, уведена је проширена двоинтервалска функција течења која омогућава прецизну симулацију њиховог понашања;
- Приступ PFDM је реформулисан тако да зависи од ефективних вредности напона и деформације;
- У циљу контролисаног почетка развоја поља оштећења, променљива спрезања између пластичне деформације и поља оштећења модификована је тако да почиње линеарно да расте од тренутка достизања критичне вредности еквивалентне пластичне деформације;
- Помоћу усвојене стратегије наизменичног решавања поља померања и фазног поља оштећења као секвенцијално спрегнутих поља и увођењем историје поља густине унутрашње потенцијалне енергије добијен је стабилни модел за имплицитну интеграцију напона;
- Унапређење се односи и на мултипликативну декомпозицију градијента деформације на еластичан и пластичан део у односу на тренутну конфигурацију и логаритамске деформације ради решавања проблема великих деформација;
- Алгоритми унапређеног приступа PFDM су развијени и имплементирани у МКЕ софтвер ПАК и предложени модел је успешно верификован поређењем са резултатима спроведених експеримената и резултатима који су доступни у литератури.

Научни резултати докторске дисертације верификовани су објављивањем два рада у врхунском међународним часопису категорије M21.

6. Применљивост резултата у теорији и пракси

Резултати докторске дисертације кандидаткиње Јелене Живковић, мастер инжењера машинства, под насловом „Унапређење, имплементација и експериментална верификација нумеричког моделирања оштећења и лома метала применом фазног

моделирања“ применљиви су и корисни, како у теоријском, тако и у практичном смислу. Приказано истраживање нуди низ значајних резултата у области идентификације параметара и нумеричке симулације оштећења и лома метала применом модела фазног поља оштећења.

Резултати добијени експерименталним испитивањима, калибрација параметара и верификација модификованог PFDM представљају значајан допринос у области моделирања настанка и развоја оштећења због врло оскудних експерименталних испитивања у литератури. Модификације PFDM представљене у овој дисертацији ће омогућити бољу контролу над почетком ојачавања материјала после интервала са константним нивоом напона/линеарним ојачањем после појаве течења и над симулацијом иницирања и развоја оштећења у металима.

Приказана метода може унапредити процес пројектовања нових конструкција, а требало би је увести и као обавезан корак у процени оштећења код санације већ постојећих конструкција. Такође, приказани резултати отварају могућност даљег истраживања у овом пољу и даљу модификацију методе за примену код замора метала или испитивања корозије материјала. Даљим развојем се може омогућити примена на бетонским конструкцијама, а самим тим и примена у анализи оштећених зграда, мостова, брана и других инфраструктурних објеката.

Експериментална и нумеричка методологија представљена у оквиру дисертације се може применити на све металне материјале.

7. Начин презентовања резултата научној јавности

Део научних резултата кандидаткиње је већ верификован објављивањем научно-стручних радова у врхунском међународном часопису и на међународним конференцијама. Кандидаткиња је као непосредни резултат рада на дисертацији објавила два рада под називом „*A Modified Phase-Field Damage Model for Metal Plasticity at Finite Strains: Numerical Development and Experimental Validation*“ и „*Two-Intervals Hardening Function in a Phase-Field Damage Model for the Simulation of Aluminum Alloy Ductile Behavior*“ у врхунском међународном часопису Metals (категија M21), који су у директној вези са истраживањима која је обављала током израде дисертације. У овим радовима кандидаткиња је приказала предложена побољшања фон Мизесовог материјалног модела за пластичност метала и модела фазног поља оштећења (PFDM) која су имплементирана у оквиру дисертације. Приказан је и део експерименталних испитивања једноосним затезањем епрувета конструкционог челика S355 и легуре алуминијума 5083, стање H111, респективно, у циљу идентификације материјалних параметара потребних за верификацију имплементираних побољшаних PFDM у софтверски пакет ПАК.

Поред наведених радова, кандидаткиња је објавила два рада на међународним конференцијама (категија M33) под насловом „*Simulation of damage evolution in metal structures*“ на 8. Међународном конгресу Српског друштва за механику одржаном од 28. до 30. јуна 2021. године у Крагујевцу и „*Phase-field modelling of damage in metallic materials*“ на 37. Danubia-Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics

одржаном од 21. до 24. септембра 2021. године у Линцу, Аустрија. Оба рада су такође настала као резултат рада на докторској дисертацији и у њима је представљен део експерименталних резултата добијених испитивањем челичних епрувета и верификација у дисертацији модификованог PFDM.

Комисија сматра да истраживања и још необјављени резултати ове докторске дисертације представљају обиман и користан материјал за даље објављивање радова у међународним часописима, као и међународним научним скуповима који се баве примењеном механиком и проблемима појаве и развоја оштећења и лома код металних материјала.

ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ КОМИСИЈЕ

Докторска дисертација кандидаткиње Јелене Живковић, мастер инжењера машинства, под насловом „Унапређење, имплементација и експериментална верификација нумеричког моделирања оштећења и лома метала применом фазног моделирања“, одговара прихваћеној теми од стране Наставно-научног већа Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу.

Кандидаткиња је у приказу свог рада користила одговарајућу стандардизовану стручну терминологију, а структура докторске дисертације и методологија излагања су у складу са универзитетским нормама.

Докторска дисертација по квалитету, обиму и приказаним резултатима истраживања у потпуности задовољава законске услове и универзитетске норме прописане за израду докторске дисертације.

Кандидаткиња је показала да влада методологијом научно-истраживачког рада и поседује способности системског приступа и коришћења литературе. При томе је, користећи своје професионално образовање, показала способност да сложеној проблематици приступи свеобухватно, у циљу добијања конкретних и применљивих резултата.

С обзиром на актуелност проблематике која је обрађена и остварене резултате, чланови Комисије сматрају да кандидаткиња Јелена Живковић, мастер инжењер машинства, и поднета докторска дисертација, испуњавају све услове, који се у поступку оцене писаног дела докторске дисертације захтевају Законом о високом образовању, Статутом Универзитета у Крагујевцу и Статутом Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу.





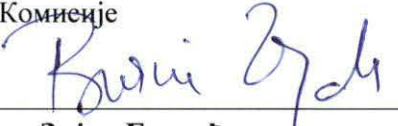
На основу свега наведеног, Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Јелене Живковић, мастер инжењера машинства, предлаже Наставно-научном већу Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу и Већу за техничко-технолошке науке Универзитета у Крагујевцу да докторску дисертацију кандидата под називом:

**„УНАПРЕЂЕЊЕ, ИМПЛЕМЕНТАЦИЈА И ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА
ВЕРИФИКАЦИЈА НУМЕРИЧКОГ МОДЕЛИРАЊА ОШТЕЋЕЊА И ЛОМА МЕТАЛА
ПРИМЕНОМ ФАЗНОГ МОДЕЛИРАЊА“**

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

У Крагујевцу и Београду, 04.05.2022. године

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

1. 
др **Ненад Грујовић**, редовни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу; уже научне области: Примењена механика, Примењена информатика и рачунарско инжењерство, председник Комисије
2. 
др **Гордана Јовичић**, редовни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу; уже научна област: Примењена механика, члан Комисије
3. 
др **Драган Ракић**, ванредни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу; уже научна област: Примењена механика, члан Комисије
4. 
др **Владимир П. Миловановић**, доцент, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу; уже научна област: Експериментална механика, члан Комисије
5. 
др **Зијах Бурзић**, научни саветник, Војно-технички институт у Београду; научна област: Техничко-технолошке науке - машинство, члан Комисије