

ОБРАЗАЦ 6

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ
ФАКУЛТЕТА ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА У КРАГУЈЕВЦУ

и

ВЕЋУ ЗА ТЕХНИЧКО-ТЕХНОЛОШКЕ НАУКЕ
УНИВЕРЗИТЕТА У КРАГУЈЕВЦУ

На седници Већа за техничко-технолошке науке Универзитета у Крагујевцу одржаној 19.3.2026. године (број одлуке: 01-1/841-10) одређени смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације под насловом: „**Модел трошкова процеса производње адитивним технологијама**”, кандидата мр Слободана Малбашића, дипл. инж маш, студента докторских академских студија Индустрijско инжењерство и инжењерски менаџмент, за коју је именован ментор др Александар Ђорђевић, ванредни професор.

На основу података којима располажемо достављамо следећи:

ИЗВЕШТАЈ

О ОЦЕНИ УРАЂЕНЕ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

1. Подаци о докторској дисертацији
1.1.Наслов докторске дисертације:
Модел трошкова процеса производње адитивним технологијама
1.2.Опис докторске дисертације (навести кратак садржај са знаком броја страница, поглавља, слика, шема, графикона, једначина и референци) (до 500 карактера):
<p>Докторска дисертација мр Слободан Малбашић дипл. инж. маш под називом „Модел трошкова процеса производње адитивним технологијама“ садржи 57 слика, 26 табела, 12 математичких формула, 157 библиографских података и 169 страница распоређених у укупно 8 поглавља и 2 прилога који су приказани јасно, прегледно и логичним распоредом.</p> <p>Поглављима претходи резиме рада на српском и енглеском језику, садржај рада, списак слика и табела и списак скраћеница. На крају рада налази се списак литературе, укупно два прилога, биографија и изјаве кандидата.</p> <p>Поглавља у дисертацији су поређана према следећем редоследу:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Увод. 2. Производни процеси класичне и адитивне технологије. 3. Концепт адитивне производње. 4. Пројектовање производа и процеса за примену адитивне технологије – предлог новог

- оквира и избор критеријума за оптимизацију.
5. Анализа актуелног стања истраживања у изабраним областима оптимизације са предлогом новог модела трошкова, оптималне оријентације и критеријума оптимизације.
 6. Развој новог модела трошкова за L-PBF методу.
 7. Студија случаја.
 8. Закључак.

1.3.Опис предмета истраживања(до 500 карактера):

Предмет ове докторске дисертације је развој модела трошкова и примена квантитативних метода и оптимизационих техника као кључних алата у процесу доношења одлуке у процесима припреме и планирања адитивне производње.

Адитивна производња, позната и као 3D штампа, је производни процес у којем се објекти креирају додавањем материјала слој по слој, како би се на крају формирао тродимензионални објекат. Адитивну производњу чини неколико кључних технологија које својом применом трансформишу класичан начин пројектовања производа и процеса и планирања производње. У оквиру дисертације предмет истраживања је била адитивна L-PBF технологија (спајање металног праха ласером) која се користи за производњу делова од метала.

У оквиру дисертације рађена су теоријска, аналитичка и експериментална истраживања. Теоријска истраживања су се првенствено односила на истраживање заступљених модела трошкова, њихова критичка анализа и дефинисање предлога за израду новог модела трошкова. Такође, део теоријских истраживања је обухватио и примену квантитативних метода у адитивној производњи у процесу одлучивања, могуће методе оптимизације трошкова и оријентације делова на радној плочи машине а све у циљу избора адекватних метода и критеријума за примену у дисертацији.

Након спроведених теоријских истраживања приступило се примени аналитичких истраживања кроз развој модел трошкова, анализи различитих сценарија оптимизације и тестирању хипотеза са циљем доношења адекватних закључака.

Експериментална истраживања су послужила као основ за тестирање функционалности и примену свих предложених модела и метода оптимизације, као и испитивање геометријских, механичких и микроструктурних карактеристика.

1.4.Анализа испуњености полазних хипотеза:

На почетку истраживања дефинисане су полазне хипотезе чија је анализа испуњености дата у наставку.

X₁: Избор адекватних параметара и карактеристика дела у фази планирања и припреме адитивне производње може се извршити квантитативним методама и техникама.

У фази планирања адитивне производње неопходно је извршити избор кључних параметара битних за процес доношења одлуке (трошкови, време израде, карактеристике оријентација дела). Доношење адекватне одлуке може се решити применом одређених метода вишекритеријумске анализе, а најпогодније је кроз хибридни приступ, што је у овој дисертацији и успешно извршено применом АНР и метода ВАО (TOPSIS, COPRAS, VIKOR), уз анализу осетљивости и високу сагласност резултата. Стога се хипотеза сматра доказаном.

X₂: Могуће је применити тополошке оптимизационе методе за утврђивање оптималног положаја предмета израде дела на радној површини са циљем постизања дефинисаних (задатих) карактеристика дела

Тополошка оптимизација је процес који применом адекватних алгоритамских решења врши смањивање масе дела без утицаја на његове механичке карактеристике. На овај начин добијају се делови изузетно сложене геометрије. Различитим оријентацијама претходно тополошки оптимизованог дела на радној плочи машине утиче се на трошкове израде дела као и на механичке карактеристике. Резултати из спроведене студије случаја показали су да су као крајњи резултат добијене задовољавајуће механичке карактеристике на изабраном делу чиме је ова хипотеза потврђена.

X₃: Могуће је развити модел трошкова за L-PBF методу спајање металног праха ласером.

На основу анализе и синтезе претходно развијених модела трошкова дефинисан је свеобухватни модел (кроз математичку формализацију и софтверско решење) који на најбољи начин репрезентује све фазе адитивног L-PBF процеса и са њима повезане трошкове. На овај начин постављена хипотеза је доказана.

X₄: Методе и технике у пројектовању и производњи металних делова класичним субтрактивним методама могу бити унапређене применом савремених адитивних технологија и метода производње у погледу ефикасности, економичности и побољшања квалитета.

Указано је да технике адитивне производње неоспорно пружају знатно више позитивних елемената у производњи делова од метала у односу на класичне (субтрактивне методе). Адитивна технологија „додавања“ материјала (на местима где је потребно и колико је потребно) пружа јасну предност са аспекта технолошког поступка и потрошње материјала у односу на класичну субтрактивну технологију (одузимање-скидање материјала и самим тим стварање непотребног шкарта). Анализом различитих сценарија примене објашњена је ефикасност и економичност у примени адитивне L-PBF методе и исто доказано поређењем трошкова израде дела класичним и адитивним путем. Анализом осетљивости на промене одређених параметара указано је на директну зависност укупних трошкова на варијације у њиховим вредностима. Постављена хипотеза је на овај начин и доказана.

1.5. Анализа примењених метода истраживања:

Сам истраживачки метод је заснован на прикупљању и анализи података кроз теоријске и експерименталне методе, анализу реалног проблема, тестирање развијеног модела трошкова и анализу предложених решења оптимизације у реалним условима производње. С тим у вези, у истраживањима у оквиру докторске дисертације која има теоријски и експериментални карактер, примењено је више метода истраживања:

- Анализа и синтеза, генерализација прикупљених података и доношење закључака.
- Моделовање и компаративна метода у процесу формирања модела трошкова.
- Метода мерења и симулација за добијање улазних параметара у експерименталном делу истраживања.
- Експерименталне методе (студија случаја).

У процесу формирања адекватног модела трошкова као алата за подршку одлучивању о примени адитивне производње извршена је анализа до сада развијених модела трошкова (за производњу делова од метала технологијом ласерског спајања металног праха). На основу утврђених предности и недостатака извршена је синтеза свих резултата и сазнања са циљем дефинисања даљих праваца истраживања.

За дефинисање тежинских критеријума изабраних параметара у процесу одлучивања при избору оптималне оријентације примењена је метода анкетирања доносиоца одлука у циљу укључивања њихових преференција у процес.

За предложени нови модел трошкова коришћена је метода моделовања (израда аналитичког модела трошкова адитивне L-PBF методе и пратеће софтверско решење) а у процесу тестирања и могућности примене модела коришћена је компаративна метода (поређење трошкова израде адитивним и класичним производним технологијама, поређење различитих сценарија у оквиру

адитивне L-PBF методе). За проналажење адекватних улазних података у модел трошкова коришћена је метода мерења реалних процеса. Развијени софтверски модел се користи за израчунавање трошкова изабраних оријентација изабраног дела на радној плочи, док су комерцијална софтверска решења коришћена за тополошку оптимизацију и израчунавање времена израде за сваку оријентацију.

Предложена методологија планирања и доношења одлука у фази планирања, као и развијени модел трошкова представљају основу за експерименталну фазу дисертације. У оквиру експерименталне методе извршено је повезивање хардверске и софтверске структуре у циљу реализације студије случаја, на бази добијених података примењена је и метода симулације, док је за испитивање димензионих, механичких и микроструктурних карактеристика примењена метода мерења.

1.6. Анализа испуњености циља истраживања:

Општи циљ дисертације дефинисан је на начин да се прикажу и анализирају неки од кључних параметара процеса и метода за доношење одлука у оквиру савременог концепта адитивне производње, као и избор адекватних метода оптимизације.

Општи циљ дисертације разложен је на неколико подциљева чијом реализацијом се он и у потпуности испунио:

- Развој новог оквира за пројектовање производа и процеса применом адитивне L-PBF методе.
- Развој модела трошкова за адитивну L-PBF методу.
- Анализа примене тополошке оптимизације у циљу смањења трошкова.
- Анализа утицаја оријентације дела на радној плочи на укупне трошкове.
- Укључивање преференција доносиоца одлуке кроз квантитативне методе у процесу одлучивања.

1.7. Анализа добијених резултата истраживања и списак објављених научних радова кандидата из докторске дисертације (аутори, наслов рада, назив часописа, волумен, година објављивања, странице од-до, DOI број¹, категорија):

Кандидат мр Слободан Малбашић, дипл. инж. маш. је на јасан и детаљан начин систематизовао и приказао резултате својих истраживања. Извршена је анализа предности и специфичности основних адитивних технологија, актуелних трендова и будућих праваца развоја. Посебан акценат дат је технологијама за израду делова од метала. Као конкретан пример разматрана је адитивна L-PBF технологија (спајање металних прахова ласером) која омогућава производњу готових делова од метала. Неки од кључних резултата дати су у наставку.

Развијени оквир за пројектовање производа и процеса применом адитивне L-PBF технологије омогућава примену одређених оптимizacionих техника и метода у циљу обезбеђивања ефикасности и економичности у производњи чиме је проширен, до сада заступљен, општи приступ у процесу пројектовања код адитивне производње. Садржи три фазе (са подфазама): 1) пројектовање производа (методологија избора дела за адитивну производњу, промена методе коначних елемената и тополошка оптимизација), 2) пројектовање процеса (генерисање алтернативних оријентација, израчунавање вредности изабраних критеријума за доношење одлуке у процесу вишекритеријумске анализе, избор оптималне оријентације) и 3) анализа и верификација резултата (поређење оптималне оријентације са почетно постављеним условима).

¹Уколико публикација нема DOI број уписати ISSN и ISBN

У циљу смањења масе изабраног дела спроведена је оптимизација топологије. За анализу структуре оптерећења дела пре и после оптимизације коришћена је метода коначних елемената. Након анализе могућих оријентација на радној плочи изабран је концепт препознавања кључних облика (feature recognition) и исти примењен кроз студију случаја. Утврђено је да истовременом оптимизацијом топологије и оријентације на радној плочи постиже се синергетски ефекат који доводи до смањења трошкова производње.

Ново развијеним моделом трошкова (са пратећим софтверским решењем - Visual basic for Excel application) јасно су рашчлањени и идентификовани сви генератори трошкова по фазама производње код адитивне L-PBF технологије, што је омогућило њихову даљу анализу и оптимизацију. Извршена је оптимизација трошкова производње изабраног дела и дефинисано који параметри имају највећи утицај на укупне трошкова (кроз анализу осетљивости) а затим је извршено поређење трошкова производње изабраног дела класичним и адитивним путем и донети одређени закључци. Модел трошкова је показао да различите оријентације дела на радној плочи значајно утичу на укупне трошкове.

Кроз студију случаја извршено је тестирање и потврђени су позитивни ефекти у примени предложеног оквира за пројектовање и планирање и новог модела трошкова. Такође, у оквиру студије случаја извршено је и мерење механичких карактеристика (тврдоћа, затезна чврстоћа, модул еластичности, издужење, енергија удара), микроструктуре тополошки оптимизованог дела и димензионих карактеристика за одређене оријентације дела на радној плочи машине. Утврђена је директна зависност између оријентације дела и одређених механичких и димензионих карактеристика и донети кључни закључци везани за оријентацију дела на радној плочи 3D машине.

За доношење одлуке при избору оптималне оријентације коришћене су методе вишекритеријумске оптимизације при чему је примењен хибридни приступ од три методе (COPRAS, TOPSIS, VIKOR) а за одређивање тежинских коефицијента изабраних критеријума коришћена је АНП метода. Ради обезбеђивања поузданости и стабилности добијених решења извршена је и анализа осетљивости. За избор оптималне оријентације, а на основу доступне литературе и применљивих приступа, поред основних критеријума (трошкови, цена, запремина потпорних ослонаца) дефинисана су и два потпуно нова критеријума (површина ослонаца на радној плочи, број површина радног дела са ослонцима) што је и новина коју доноси ова дисертација. Ови нови критеријуми директно утичу на трошкове и квалитет готовог производа. Такође, у процесу одлучивања уведене су и преференције доносиоца одлука што није био случај у ранијим истраживањим код других аутора.

На основу увида у публиковане радове може се закључити да је кандидат Слободан Малбашић на систематичан начин приступио анализи технологија и савремених приступа у адитивној производњи, а процес истраживања је праћен и објављеним радовима у међународним и домаћим часописима и конференцијама у којима су и представљени резултати истраживања. У наставку су приказани објављени радови по хронолошком реду:

- **Slobodan Malbašić**, Srdjan Živković, Veljko Petrović, Aleksa Grubić. (2022). Digital thread for additive manufacturing. *10th International Scientific Conference on Defensive Technologies – OTEH 2022*, Belgrade Serbia, 13-14 October 2022. ISBN 978-86-81123-85-0. [M33]
- Živković, S., **Malbašić, S.**, Grubić, A. (2022). AM potencijal – projektovanje za aditivnu proizvodnju. 43. JUPITER konferencija, oktobar 2022, Beograd Srbija. ISBN 978-86-6060-137-9.[M63]
- Strahinja Djurović, Dragan Lazarević, **Slobodan Malbašić**, Živče Šarkoćević, Milan Blagojević. (2022). Slope angle influence on the quality of surface overhangs on low-cost 3D printers. *6th International Conference on Mechanical Engineering Technologies and Applications (COMETA)*, 17th – 19th November 2022, East Sarajevo, RS, B&H. ISBN 978-99976-947-6-8.[M33]

- **Malbašić, S., Nedić, B., Đorđević, A., & Živković, S.** (2023). The role of the cost and quality in additive manufacturing. *Journal of Engineering, Management and Information Technology*, 1(1), 11–18. <https://doi.org/10.61552/JEMIT.2023.01.002>. [M33]
- **Malbašić, S., Živković, S., Nedić, B., Đorđević, A., & Grubić, A.** (2023). Process planning and optimization techniques in additive manufacturing. *Scientific Technical Review*, 73(2), 33–41. <https://doi.org/10.5937/str2302033M>. [M51]
- **Slobodan Malbašić, Bogdan Nedić, Aleksandar Đorđević, Srdjan Živković.** (2023). Applications and economics of additive metal production technologies. *39th International conference on production engineering of Serbia - ICPEs 2023*, 26-27 October 2023, Novi Sad, Serbia. ISBN: 978-86-6022-610-7. [M33]
- **Malbašić, S., Đorđević, A., Živković, S., Džunić, D., & Sokolović, V.** (2024). Topology Optimization, Part Orientation, and Symmetry Operations as Elements of a Framework for Design and Production Planning Process in Additive Manufacturing L-PBF Technology. *Symmetry*, 16(12), 1616. <https://doi.org/10.3390/sym16121616>. [M22]
- **Živković, S., Malbašić, S., & Stepanović, M.** (2024). Coordinate metrology data management of machine parts made by metal additive manufacturing. *11th International Scientific Conference on Defensive Technologies - OTEX 2024*, Tara Serbia, 9-11 October 2024. ISBN 978-86-81123-94-2. [M33]

1.8. Оцена да је урађена докторска дисертација резултат оригиналног научног рада кандидата у одговарајућој научној области и анализа извештаја о провери докторске дисертације на плагијаризам (до 1000 карактера):

Комисија сматра да докторска дисертација мр Слободана Малбашић дипл. инж. маш. под називом "Модел трошкова процеса производње адитивним технологијама" представља резултат оригиналног научно-истраживачког рада.

Оригиналност научног рада доказан је и провером на плагијаризма помоћу софтвера iThenticate, којим је идентификовано укупно 4% сличног текста. Поклапања се односе на следеће:

- Стандардну терминологију која се користи за објашњење технологија, метода и процеса у адитивној производњи (на енглеском језику).
- Стандардним методама које се користе у оквиру вишекритеријумске анализе (на енглеском језику).
- Општим формулама које се користе за приказ одређених математичких функција.
- Документима за пријаву дисертације и извештајем комисије о оцени дисертације који су приложени на ФИН Крагујевац.
- Начином цитирања литературе и стандарда.
- Биографијом кандидата.

Анализа доступне литературе је показала да не постоји слично истраживање нити истраживање које у свом обухвату анализира на једном месту све области од значаја за адитивну технологију које су обухваћени у овој дисертацији.

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

Кроз реализацију истраживања у оквиру дисертације доприноси аутора се огледају у следећем:

- Приказ актуелног стања и будућих праваца развоја у оквиру адитивних технологија.
- Извршен упоредни приказ предности, недостатака и кључних разлика између класичних и адитивних производних технологија у циљу образложења за примену нових производних технологија којим припадају адитивне технологије.

- Развој новог оквира за пројектовање производа и процеса применом изабране адитивне L-PBF технологије.
- Извршено истраживање и анализа предности и недостатака до сада развијених модела трошкова код изабране адитивне технологије у циљу изналажења могућности за унапређење методологије прорачуна трошкова.
- Развој и валидација новог модела за прорачун трошкова код адитивне L-PBF технологије (математичка формализација и софтверско решење).
- Истраживање могућности оптимизације трошкова применом различитих оптимizacionих метода и техника и истовремена примена (оријентације делова на радној плочи и тополошка оптимизација) са синергетским ефектом на смањење укупних трошкова производње.
- Унапређење процеса доношења одлуке применом квантитативних метода и техника (примена хибридног приступа, увођење перцепције доносиоца одлука, примена метода анализе осетљивости у циљу верификације резултата).
- Студија случаја која поред примене развијеног оквира за планирање и новог модела трошкова свеобухватно анализира геометријске, механичке и микроструктурне карактеристике у изради делова применом изабране адитивне технологије.

Значај дисертације се огледа и у чињеници да се резултати и закључци могу користити за развој нових приступа и метода којима се могу унапредити постојеће технологије и решити изазови у области примене адитивних технологија.

1.10. Оцена испуњености услова за одбрану докторске дисертације у складу са студијским програмом, општим актом факултета и општим актом Универзитета (до 1000 карактера):

Докторска дисертација кандидата мр Слободана Малбашић дипл. инж. маш, под називом „Модел трошкова процеса производње адитивних технологијама“ одговара теми дисертације одобрене одлуком број 01-1/4921-15 од 21.12.2023. године од стране Наставно-научног већа Факултета инжењерских наука у Универзитета у Крагујевцу и одлуком Већа за техничко-технолошке науке Универзитета у Крагујевцу број IV-04-7/14 од 24.01.2024. године.

Докторска дисертација је структурирана у складу са академским стандардима и садржи све неопходне и прописане елементе. Резултати истраживања су поткрепљени детаљним анализама и студијом случаја. Плагијаторска провера потврђује изузетно висок ниво оригиналности рада.


Кандидат је захваљујући својој професионалној оријентацији и детаљно анализираним и свеобухватно обрађеним подацима показао да је овладао методом научно-истраживачког рада и да је добио конкретне и у пракси применљиве резултате који су и објављени у међународним и домаћим часописима и конференцијама.

С обзиром на актуелност теме и проблематике која је обрађена у оквиру дисертације као и остварених резултата кандидата, чланови Комисије сматрају да кандидат Слободан Малбашић и поднета докторска дисертација испуњавају 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.

2. ЗАКЉУЧАК

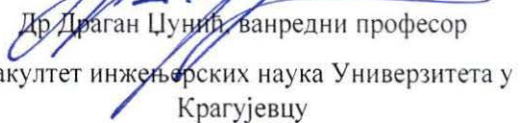
На основу анализе докторске дисертације и приложене документације Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације под насловом „Модел трошкова процеса производње адитивним технологијама”, кандидата **мр Слободана Малбашић, дипл. инж. маш.** предлаже надлежним стручним органима да се докторска дисертација прихвати и да се одобри њена одбрана.

Чланови комисије:


Др Богдан Недић, редовни професор у пензији
Факултет инжењерских наука Универзитета у
Крагујевцу

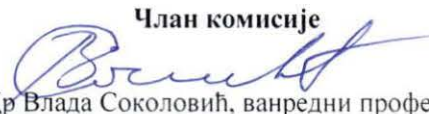
Производно машинство

Председник комисије


Др Драган Цунић, ванредни професор
Факултет инжењерских наука Универзитета у
Крагујевцу

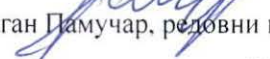
Производно машинство

Члан комисије


Др Влада Соколовић, ванредни професор
Војна Академија Универзитета одбране у
Београду


Систем логистике, снабдевање и одржавање

Члан комисије


Др Драган Памучар, редовни професор
Факултет организационих наука Универзитета у
Београду

Операциона истраживања

Члан комисије


Др Сузана Петровић Савић, ванредни професор
Факултет инжењерских наука Универзитета у
Крагујевцу

Производно машинство

Члан комисије