

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ ФАКУЛТЕТА ИНЖЕЊЕРСКИХ
НАУКАВЕЋУ ЗА ТЕХНИЧКО-ТЕХНОЛОШКЕ НАУКЕ УНИВЕРЗИТЕТА У
КРАГУЈЕВЦУ

На седници Наставно-научног већа Факултета инжењерских наука у Крагујевцу одржаној 21.12.2023 (број одлуке: 01-1/4921-15) и на седници Већа за техничко-технолошке науке одржаној 24.01.2024 (број одлуке: IV-04-7/14) одређени смо као чланови Комисије за подношење извештаја за оцену научне заснованости теме и испуњености услова кандидата за израду докторске дисертације:

„Модел трошкова процеса производње адитивним технологијама“

у научној области Машинско инжењерство и ужој научној области Информациони инжењеринг кандидата **мр Слободан Малбашића, дипл. инж. маш.** На основу података којима располажемо достављамо следећи

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

У предложеној пријави докторске дисертације кандидат **мр Слободан Малбашић, дипл. инж. маш.** представио је предмет истраживања наводећи актуелности и значај предложене теме у области развој методологије за прорачун трошкова процеса планирања производње адитивним технологијама.

Приликом разматрања избора проблема који ће бити фокус рада кандидат је анализирао постојање учесталих захтева тржишта са тенденцијама производње сложених конфигурација, кратког времена израде, персонализованих карактеристика и функционалних прототипова. У циљу решавања ових захтева кандидат је уочио адитивна технологију, то јест технологију која се заснива на концепту „додавања материјала“ и захтева другачије приступе у припреми и планирању производње. Коначно је констатова да постоје и „економски сценарији“ који оправдавају примену адитивних технологија.

Кандидат истиче да је важан сегмент производње адитивним технологијама оријентација делова у радној зони (на радној плочи) током припреме и планирања производње. Тренутни приступ у оријентацији делова се ослања искључиво на искуство оператера који уз помоћ уграђених алгоритама у одговарајућим софтверима може да изабере понуђени сет оријентација, али у коначном резултату то неће у свим случајевима довести до израде крајњег производа са жељеним (иницијално постављеним) карактеристикама.

Кандидат истиче да, иако постоје софтверска решења за помоћ у сегменту адитивних технологија, постоји потреба за додатним унапређењима у виду модела трошкова, са циљем добијања крајњег производа са механичким карактеристикама, временима и трошковима израде, који обухвата преференције доносиоца одлуке. Расположива софтверска решења не пружају моделе трошкова, тако да је кандидат на бази те чињенице издвојио и представио даље правце свог истраживања.

Кандидат истиче да ће на основу прегледа расположиве литературе развити модел трошкова и софтверско решења за прорачун трошкова заснован на моделу. Прегледом литературе (научно истраживачких радова, пројеката, стручних анализа) истражиће савремене приступе у прорачуну трошкова и унапређења процеса пројектовања и припреме адитивне производње. На бази анализе прикупљеног сазнања, а затим и на основу генерализације прикупљених података формираће адекватну основу за даљи развој модела трошкова. Кандидат учава важност потпуног рашчлањавања свих трошкова насталих у фази пројектовања, израде и накнадне обраде делова, како би исти били додатно умањени. Уочава да трошкови учешћа материјала и времена израде, поред адекватне оријентације на радној плочи, могу бити умањени применом метода тополошке оптимизације на изабраном делу (примена одређених алгоритама за распоређивање масе на начин да предметни део задржи захтеване карактеристике и оптерећења). Наведено добија на значају ако се зна да се највећи ефекти у планирању производње постижу ако се примени истовременост у приступу, односно изврши адекватна оријентација дела на радној плочи претходно тополошки оптимизованог дела, што кандидат има и намеру да примени.

Кандидат планира да за реализацију модела трошкова још у фази планирања производње примени квантитативне методе и технике како би мога да укључи преференције доносиоца одлуке са циљем утврђивања жељених својстава крајњих решења, параметра трошкова, времена производње и неких механичких карактеристика тополошки оптимизованих делова.

Кандидат је планирао да нови модел трошкова примени за поступак селективног ласерског синтеровања металног праха, односно методу која омогућава израду крајњих делова од метала сложених геометрија и облика које би били тешко или немогуће постићи традиционалним методама производње. Метода је значајна због своје флексибилности дизајна, брзине израде прототипова, економичности за мање серије, разноврсности материјала и високе прецизности, што је чини кључном технологијом у фазу израде прототипова сложених средстава (конкретно наоружања и војне опреме, ауто или авио индустрији), и најпогоднијом за испуњавање сложених захтева доносилаца одлука.

Кандидат је предложио план истраживања у оквиру наведених области које су у складу са савременим научним методама истраживања. Сам истраживачки метод је заснован на прикупљању и анализирању података кроз теоријске и експерименталне методе, анализу реалног проблема, тестирање развијеног модела трошкова и посматрање предложених решења оптимизације у реалним условима производње. У процесу формирања адекватног модела трошкова за одлучивање о могућности примени адитивне производње користиће се метода моделовања и компаративна метода. За проналажење адекватних улазних података користиће се метода мерења и посматрања реалних процеса а на бази добијених података примениће се и метода научног експеримента и симулације.

У оквиру експерименталне методе извршиће се повезивање хардверске и софтверске структуре у циљу реализације студије случаја. Хардверски део ће се односити на хардверске компоненте у дигиталном ланцу (компјутер/сервер на којем ће се оптимизовати САД модел, формирање повратне спреге у контроли квалитета, 3Д штампач/машина као извршни уређај, мерни уређаји за димензиону контролу и верификацију и контролу квалитета површине).

Променом различитих оријентација на радној плочи, претходно тополошки оптимизованог дела, израдиће се примерци на којима ће се у наредној фази извршити мерења (геометријских и механичких карактеристика), ради утврђивања потребних вредности параметара које ће се користити у оквиру квантитативних метода и техника одлучивања. Као додатни параметри у процесу анализе користиће се и трошкови и времена израде за сваку оријентацију. На основу утврђених значајних карактеристика и анализе биће дефинисан математички модел трошкова и пратеће софтверско решење.

Очекивани допринос и резултати докторске дисертације се односе на следеће:

- Развој оквира за оптимизацију процеса планирања производње са више аспеката:
 - Оријентација делова
 - Структурна / тополошка оптимизација
 - Трошковни и временски сегмент.
- Анализа примене адитивне технологије (ласерски синтеровање металног праха) са трошковног и производног аспекта поређењем са класичним производним технологијама.
- Унапређење процеса доношења одлука у планирању производње применом квантитативних метода и техника.
- Развој и валидација новог модела за прорачун трошкова.

На основу приказа проблема истраживања, полазне хипотезе као и предложене научне методе истраживања, приказани садржај докторске дисертације садржи све елементе који су потребни за израду докторске дисертације у оквиру које ће се дати научни допринос, значајан за даља научна истраживања у области оптимизације процеса планирања и развоја модела трошкова адитивним технологијама.

Веза са досадашњим истраживањима

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, да је кроз избор једне од технологија за производњу металних делова адитивним путем детаљније истражио њене економске аспекте, аспекте квалитета и уочи просторе за унапређења процеса кроз развој модела трошкова уз истовремену оптимизацију (топологије и оријентације делова, трошкова и времена извршења процеса).

Израда ове докторске дисертације ће омогућити кандидату да настави са истраживачким радом у континуитету што поред стручног усавршавања кандидата има за циљ развој и примену система у реалним условима.

(Malbašić et al., 2022)¹ је први рад из групе радова проистеклих из истраживања везаних за докторску дисертацију. У раду су представљени неопходни елементе за повезивање софтверских и хардверских платформи (дигитални низ) у адитивној производњи, са свим својим предностима и недостацима и на конкретном примеру објашњене могућности за унапређење. Приказани су и савремени концепти и приступи у организацији адитивне производње (услуге провајдера, on-line платформе, извршни систем у производњи – енгл. Manufacturing Execution System).

(Malbašić et al., 2023)² приказује неопходне елементе које треба да садржи модел трошкова за методу ласерског синтеровања металног праха. Приказани модел се заснива на анализи претходно развијених модела, њихових слабости и недостатака, и потребама за њихова унапређења. Као саставни елемент модела трошкова су и трошкови контроле и провере квалитета који су укључени у представљени модел. У раду су разматрани процеси ласерског синтеровања металног праха који су основа за даљу анализу трошкова и технологије контроле квалитета које се користе у адитивним технологијама.

(Malbašić et al., 2023)³ наглашавају чињеницу да су трошкови инвестирања и производње у адитивну производњу (посебно технологију ласерског синтеровања металног праха) и даље изузетно високи и да су неопходни нови приступи у планирању производње, анализи трошкова и могућностима за оптимизацију (структурних и процесних) параметара производње. Објашњен је процес планирања адитивне производње и приказане су адитивне технологије (7 технологија које препознаје стандард) са свим својим предностима и недостацима. У наставку рада детаљније су објашњени трошкови који настају у оквиру адитивне производње (директни и индиректни, структурирани и неструктурирани), проблем оријентације делова на радној плочи и њен утицај на механичке карактеристике делова, трошкове и време израде.

Имајући у виду да се овај проблем може поставити као проблем који се може решити квантитативним методама и техникама, исте су у раду и објашњене. Разматране су структурна оптимизација (како самог дела тако и ослонаца), предности истовремене структурне и трошковне оптимизације и доступни алгоритми за оптимизацију.

(Malbašić et al., 2023)⁴ на основу спроведених истраживања о економским односима класичне и адитивне производне технологије приказује и објашњава „економске сценарије“ за економски оправдано примењивање адитивне технологије, у којем обиму, као и које техничке аспекте у производњи (функционални прототип, малосеријска производња, тополошка оптимизација, интегрисане функционалности) применити. Фокус је на технологији адитивне производње металних делова (као крајњег производа). У раду је приказана и студија случаја, тј. упоређивање производње изабраног дела класичном технологијом и адитивном технологијом ласерског синтеровања металног праха и донети одређени закључци за даље поступање.

¹ Slobodan Malbašić, Srdjan Živković, Veljko Petrović, Aleksa Grubić: *Digital thread for additive manufacturing*. 10th International Scientific Conference on Defensive Technologies – OTEH 2022, Belgrade Serbia, 13-14 October 2022.

² Slobodan Malbašić, Bogdan Nedić, Aleksandar Đorđević, Srdjan Živković: *The role of the cost and quality in additive manufacturing*. 14th Quality Festival Conference, May 24th - May 27th, Kragujevac 2023, Serbia. ISBN: 978-86-6335-104-2.

³ Slobodan Malbašić, Srdjan Živković, Bogdan Nedić, Aleksandar Đorđević, Aleksa Grubić. *Process planning and optimization techniques in additive manufacturing*. Scientific Technical Review (ISSN 1820-0206). Military Technical Institute, Belgrade. 2023.

⁴ Slobodan Malbašić, Bogdan Nedić, Aleksandar Đorđević, Srdjan Živković: *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.

Поред наведених радова, кандидат ће се ослањати и на публиковане радове других аутора међу којима су најрелевантнији следећи радови:

(Fera at al., 2017)⁵ су развили нови модел трошкова (MiProCAMAM) за адитивне технологије (стереолитографију, синтеровање праха ласером и електро луком). Развијени модел се заснива на неколико кључних постулата који су послужили за дефинисање полазних основа за нови модел трошкова који треба да садржи следеће елементе: 1) Израчунавање јединичне цене производа различитих геометрија, са њиховом количином, у истом радном задатку израде. Анализа трошкова производње, за сваки корак и за сваку геометрију, омогућава идентификацију фактора који највише утичу на трошкове, 2) Разматрати активности пре и после процеса као што су припрема геометрије, радни задатак монтаже, подешавање машине, делови и уклањање супстратних плоча, 3) Разматрати постпроцесне активности као што су термички и површински третмани, уклањање материјала и контрола квалитета, 4) Цену рада оператера по сату посматрати у зависности од различитих вештина оператора потребних за сваки корак.

(Qin at al., 2021)⁶ су у свом раду анализирали тренутни статус и предложили будуће правце развоја оријентације делова на радној плочи у процесима адитивне технологије. У раду се истиче да је у оквиру скупа активности у процесу адитивне технологије планирање процеса адитивне производње критична активност.

У суштини, оријентација дела на радној површини представља избор оптималног положаја предмета израде (дела) са циљем постизања дефинисаних (задатих) карактеристика дела. У реалности, овај параметар се дефинише на основу искуства и интуиције оператера на машини (преко софтвера за припрему процеса).

Такође, извршили су систематизацију кључних карактеристика на које утиче оријентација делова: механичке карактеристике делова, тачност готовог производа, квалитет површине, потпорне (носеће) структуре, време израде дела, трошкови израде, време и трошкови пост процесинга. На основу анализе великог броја метода и закључака који су по том основу донешени, аутор је извршио поделу оптимизационих метода на: 1) Једностепене методе и 2) Двостепене методе, које је детаљно и објаснио.

(Zhu at al., 2021)⁷ наглашавају да се интеграцијом оптимизације топологије и адитивне производње постиже највише од њихових предности и потенцијала. Приступ као такав налази све више примене у модерној производњи. У раду су приказана истраживања која се односе на поменути тематiku, са посебним освртом на хијерархијску структурну оптимизацију дизајна и тополошку оптимизацију која узима у обзир ограничења адитивне производње. Надаље се у раду објашњава да је тополошки оптимизована структура генерално сложене геометријске

⁵ Fera M., Fruggiero F., Costabile G., Lambiasi A., Pham D. (2017). *A new mixed production cost allocation model for additive manufacturing (MiProCAMAM)*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0492-x>

⁶ Yuchu Qin, Qunfen Qi, Peizhi Shi, Paul J. Scott, Xiangqian Jiang. (2021). *Status, issues, and future of computer-aided part orientation for additive manufacturing*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 115:1295–1328. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06996-6>

⁷ Jihong ZHU, Han ZHOU, Chuang WANG, Lu ZHOU, Shangqin YUAN, Weihong ZHANG. (2021). *A review of topology optimization for additive manufacturing: Status and challenges*. Chinese Journal of Aeronautics, 34(1): 91–110. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.09.020>.

конфигурације, и као таква тешко да може бити произведена класичним технологијама (машинска обрада, ливење,...). С тога, је веома битно интегрисати тополошку оптимизацију са адитивним технологијама, односно како се другачије наглашава извршити повезивање структурне оптимизације и производности. У раду су објашњене до сада познате технике у оптимизацији (од примене концепта пројектовање за адитивну производњу енл.: Design for Additive Manufacturing - DfAM) преко ограничења у производњи и пројектовању, оптимизације топологије и облика/димензија у циљу реконструкције делова).

(Ransikarbun at al., 2021)⁸ образлажу да адитивна производња још увек није постигла довољну поновљивост процеса и квалитета производа, а да би се то обезбедило потребно је унапређивати читав сет пратећих процеса (пројектовање и симулацију, планирање процеса, квалификацију и сертификацију делова, стандардизацију процеса, избор адекватних материјала, унапредити дигиталну повезаност унутар адитивног ланца). С тим у вези, аутори истичу да је један од најважнијих процеса адитивне технологије управо планирање производње.

Посебно се фокусира и на оријентацију делова која утиче на све процесе који сукцесивно следе, као и на параметре квалитета и механичке карактеристике израде дела. Због тога правилна оријентација делова захтева примену одређених техника за генерисање алтернативних оријентација. Овај рад имао за циљ да кроз студији случаја покаже и докаже могућност употребе предложеног концепта и употребу квантитативних метода за решавање проблема оријентације делова, уједно се и констатује да даље проширење приступа може ићи у правцу примене развијене методе на оријентацију делова сложеније структуре (нпр тополошки оптимизоване ...), као и комбинација више квантитативних метода у форми хибридног приступа

На бази истраживања доступних радова аутори доносе одређене закључке (битне за даља истраживања): да се проблеми оријентације (са постављеним критеријума) могу решити квантитативним методама и техникама, да примена квантитативних метода и техника и даље нема превелику заступљеност у напредним технологијама производње као што је адитивна производња, аутори предлажу унапређење квантитативних и квалитативних метода евалуације на начин да се изврши укључивање перспективе доносиоца одлука.

(Chen и др., 2022)⁹ у свом раду дају свеобухватан приказ стандарда потребних за спровођење квалификације и сертификације делова од метала произведених адитивним технологијама, као и препреке и изазове са којим се корисници сусрећу са циљем превазилажења нејасноћа на релацији академска заједница и привредни субјекти. Наводи, и детаљно објашњава, да постоје три кључна елемента процеса квалификације и сертификације: стандарди, правила и регулативе. Са аспекта ове дисертације посебно је значајан процес дијаграм/шема квалификације и сертификације делова који је аутор детаљно објаснио, у смислу да анализира производњу делова који су пројектовани за производњу класичним технологијама као и ново-произведених делова за израду адитивним технологијама. Приказани процес може да послужи као основа за извођење експеримента.

⁸ Kasin Ransikarbun, Rapepan Pitakaso, Namhun Kim and Jungmok Ma. (2021). *Multicriteria decision analysis framework for part orientation analysis in additive manufacturing*. Journal of Computational Design and Engineering, 8(4), 1141–1157. <https://doi.org/10.1093/jcde/qwab037>.

⁹ Chen, Z., Han, C., Gao, M., Kandukuri, S. Y., & Zhou, K. (2022). *A review on qualification and certification for metal additive manufacturing*. Virtual and Physical Prototyping, 17(2), 382–405. <https://doi.org/10.1080/17452759.2021.2018938>

Предложен је нови оквир за квалификације и сертификације који је упоређен са стандардним QMS оквиром, дата су одређене поређења, а једна од кључних закључака је да је потребно стручно и експертско знање из области производње металних делова адитивним технологијама (за који се наглашава да је дигитални у основи и да тражи дигиталну трансформацију) како би читав процес квалификације и сертификације био спроведен.

(Pant и др., 2022)¹⁰ у свом раду наглашавају да производња металних делова (технологија фузије металног праха ласером) и даље има својих ограничења у виду мале продуктивности, нижег квалитета и анизотропног понашања делова након израде. Циљ рада је да се нагласи значај процесних параметара кроз њихов утицај на квалитет готовог производа као и да анализира дефекте који се појављују код готових делова.

У оквиру објашњења узрока појаве геометријских непрецизности наглашава и улогу оријентације делова на радној плочи поред осталих узрочника (густине дела, смањења дела, микроструктурних варијација, протока гаса, ефеката степеница, математичке конверзије CAD у STL, неадекватних параметра машине, ...). Јасно истиче појаву неусаглашености улазних параметра са крајњим карактеристикама производа, односно постојање неразумевања на који начин подесити параметре машине да би се добио крајњи позитиван ефекат на производу.

Потенцира се и на примени не деструктивних техника за одређивање понашања делова у реалном времену тако и у карактеризацији квалитета готовог производа (анизотропност, порозност, геометријске и димензионе толеранције,...).

(Mandolini и др., 2022)¹¹ поред описа кључних елемената трошкова (материјал, машина, радна снага, енергија, додатни конзументи) наводи и значајније појединачне моделе трошкова који су већини аутора (који третирају ову проблематику) послужили као основа за израду модела трошкова. Наводи кључну дистинкцију у свом раду у односу на остале радове у смислу навођења генератора трошкова, оних који изазивају промене у самим трошковима, а за то је потребна анализа осетљивости. Аутор у свом раду проширује обим анализе осетљивости (примењене у ранијим радовима) у процесу адитивне технологије фузије металног праха ласером, како би на овај начин дефинисао најзначајније параметре производа и процеса који имају утицај на трошкове. У том смислу аутор анализира укупно девет параметара, анализа обухвата 8 делова и 5 материјала и њихов утицај на трошкове модел. На овај начин долази се до пројектних и производних параметара који имају утицај на трошкове (односно исти се могу подешавати), као и врсте материјала које се могу варирати како би се оптимизовали трошкови.

(Croccolo и др., 2023)¹² анализирају утицај протока инертног гаса на механичке карактеристике дела на радној плочи који су постављени у три различите оријентације у односу на ток инертног гаса, за адитивну технологију ласерског синтеровања праха. Извршен је експеримент и извршено поређење резултата са познатим вредностима и закључцима. Утврђено

¹⁰ Pant, M., Nagdeve, L., Kumar, H., & Moona, G. (2022). *A contemporary investigation of metal additive manufacturing techniques*. *Sādhanā*, 47(1), 18. <https://doi.org/10.1007/s12046-021-01770-6>

¹¹ Mandolini, M., Sartini, M., Favi, C., & Germani, M. (2022). Cost sensitivity analysis for laser powder bed fusion. *Proceedings of the Design Society*, 2, 1411–1420. <https://doi.org/10.1017/pds.2022.143>

¹² Croccolo, D., Ćirić-Kostić, S., De Agostinis, M., Fini, S., Olmi, G., Bogojević, N., & Šoškić, Z. (2023). *Effect of the position in the build chamber on the fatigue strength of additively manufactured maraging steel MS1*. *Machines*, 11(2), 196. <https://doi.org/10.3390/machines11020196>

је да нема значајнијих одступања у замору материјала као и да је граница замора 26% од вредности максималне затезне чврстоће, што је у складу са претходним резултатима. Експеримент је значајан јер нико до сада није испитивао утицај азота као инертног гаса на механичке карактеристике дела, узорци су били постављени на 3 позиције (претходна пракса је била две позиције), проток гаса је био специфичан и испитивања својстава узорака су вршена након одређених пост процесних обрада (старење, машинска обрада и пескарење).

(Chua и др., 2024)¹³ на основу анализе радова објављених у последњих пара година објашњавају проблем квалитета израде готовог дела методама адитивне производње, и у том правцу и наглашавају значај овог рада који има за циљ да прикаже различите стратегије и методе за квантификацију компоненти произведених технологијом ласерске фузије металног праха (L-PBF), током процеса израде и у пост процесирњу. Препознати су и детаљно објашњени кроз процес настајања следећи елементи квалитета: порозност, појава пукотине, резидулани стрес, микроструктура, геометријске толеранције. Анализира проблематику квалитета код адитивних техника и наводи зашто нема смисла применити приступ статистичке контроле квалитета.

(Dalpadulo и др., 2024)¹⁴ се фокусира на симулацијама потпомогнутим процесима пројектовања и производње делова ласерском фузијом металног праха, са циљем њихове оптимизације. Пројектовање производа је засновано на интеграцији тополошке оптимизације и алата за симулацију процеса у циљу потребног редизајнирања иницијалног производа. Пројектовање процеса производње је засновано на системској употреби симулација у циљу превенције појаве грешака у производњи, услед могуће варијације температуре код делова од метала, као и појаве резидуалног напона и деформација. Такође, приступ се заснова на примени интегрисане пројектно-производне PLM платформе која омогућава дигитални проток информација (digital process chain).

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

Предмет, циљеви и хипотезе ове докторске дисертације обухватају следеће

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.

Општи циљ ове дисертације је 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. Овај процес ће се посматрати на нивоу производа (припрема за производњу, утврђивање могућности оптимизације масе), на нивоу процеса (избор адекватних параметара), на нивоу информационог инжењеринга (дизајн, развој, управљање и

¹³ Chua, C., Liu, Y., Williams, R. J., Chua, C. K., & Sing, S. L. (2024). *In-process and post-process strategies for part quality assessment in metal powder bed fusion: A review*. *Journal of Manufacturing Systems*, 73, 75–105. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2024.01.004>

¹⁴ Dalpadulo, E., Pini, F., & Leali, F. (2024). *Powder bed fusion integrated product and process design for additive manufacturing: A systematic approach driven by simulation*. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 130(11–12), 5425–5440. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13042-8>

одржавање информационих система и повезивање свих учесника у производном ланцу помоћу истих) и на нивоу економске димензије (избор и дефинисање параметара трошкова).

Основне хипотезе докторске дисертације од којих се пошло на основу постављеног циља истраживања, досадашњих истраживачких активности кандидата и резултата других аутора у подручју истраживања, су следеће:

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

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

X₃: Могуће се развити модел трошкова (за методу селективног ласерског синтеровања металног праха) и пратећи софтверски алат заснован на моделу трошкова која ће омогућити свеобухватнију анализу трошкова.

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.

Методе истраживања

У истраживањима у оквиру докторске дисертације (која ће бити теоријска и експериментална) користиће се следеће научне методе:

- Анализа и синтеза, генерализација прикупљених податка 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).

Оквирни садржај докторске дисертације

Планирано је да докторска дисертација буде реализована кроз девет поглавља:

1. Уводна разматрања
2. Производни процеси и оптимизација процеса
3. Концепт адитивне производње
4. Стратегија пројектовања процеса за примену адитивних технологија, избор критеријума за оптимизацију
5. Актуелно стање истраживања у изабраним областима оптимизације
6. Развој новог модела трошкова за методу спајања прахом
7. Студија случаја
8. Закључци

9. Литература

У пријави теме кандидат је детаљно описао планирани садржај наведених поглавља са детаљним планом рада и очекиваним исходима.

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

Имајући у виду презентоване резултате истраживања других аутора и предложени садржај докторске дисертације, може се закључити да је развој модела трошкова једна од актуелних области истраживања када је у питању производња адитивним технологијама.

Кандидат је објавио одређени број радова на научним и стручним скуповима у којима је на јасан и систематизован начин приказао ширу проблематику везану за припрему, планирање и реализацију процеса из области адитивне производње, дао одговарајућа објашњења и могуће начине решавања са посебним освртом на проблематику развоја модела трошкова и оптимизације процеса планирања адитивне производње.

На основу предложене теме докторске дисертације Комисија закључује да постоји потреба за применом предложеног приступа. Докторска дисертација је усмерена у два правца: остваривање научних резултата и примена резултата у пракси. Очекивани научни резултати се односе на развој метода и методологије за доношење одлука на бази изабраних критеријума за израчунавање трошкова производње адитивним технологијама. Практични резултати који треба да произађу реализацијом дисертације су усмерени на решавање реалних проблема из праксе и очекивање је да предложена решења доведу до смањења трошкова адитивне производње развојем адекватног оптимизационог приступа у процесу припреме и планирања процеса адитивне производње.

Комисија закључује да је предложена тема кандидата мр Слободан Малбашића, дипл. маш. инж., са представљеним предметом, циљевима рада, садржајем, научним доприносима и очекиваним резултатима, који су настали као резултат детаљне анализе објављених научних радова у различитим међународним часописима у научном и стручном смислу оригинална идеја.

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

Кандидат мр Слободан Малбашић, дипл. инж. маш. је у пријави теме докторске дисертације обухватио све елементе савременог научно-истраживачког начина рада поштујући основне критеријуме науке, научних циљева и метода анализе, имплементацијом постојећих и развијањем оригиналних идеја научног истраживања.

Кроз предлог и анализу расположиве литературе, кандидат је показао способност да изврши избор релевантних радова, да изврши њихову анализу и да утврди предмет даљих истраживања. Дефиниција предмета истраживања је усклађена са основним појмовима, предложеним хипотезама и методама истраживања. Кандидат је показао способност да планира и реализује

експерименте уз коришћење савремене мерне и производне опреме и селекцију и анализу литературних извора.

Циљеви истраживања су проистекли из уочене потребе за развојем модела трошкова и оптимизацијом процеса планирања у сегменту адитивне производње, а на основу потребе уочене у реалним производним ситуацијама.

Употребом адекватних софтверских алата и развојем математичког модела за трошкове процеса, уз предложена експериментална истраживања, омогућиће се добијање резултата који ће представљати оригиналан допринос истраживачкој области.

5. Преглед научно -истраживачког рада кандидата

Кратка биографија кандидата

Лични подаци

Име и презиме: Слободан Малбашић

Датум и место рођења: 12.08.1975. године, Сремска Митровица

Адреса: Краља Милана 19В, 34000 Крагујевац

E-mail: slobodan.malbasic@mod.gov.rs

Слободан Малбашић рођен је 12.08.1975. године у Сремској Митровици, где је завршио основну и средњу школу. Војно техничку академију у Београду уписао је школске 1994/1995. године на смеру Техничке службе – специјалност наоружање и исту завршио 1999. године са просечном оценом у току студија 8,02 (осам и 02/100).

Школске 2000/2001. године уписао је магистарске студије на Машинском факултету у Крагујевцу (Одсек за моторна возила и моторе). Магистарску тезу под насловом „Управљање ризиком као фактор безбедности саобраћаја“ одбранио је новембра 2006. године.

У оквиру своје каријере, дуге преко 23 године, кандидат је обављао више различитих извршних и управних функција из домена планирања, контроле и извршења послова одржавања техничких средстава и израде технолошких поступака ремонта и ремонтно-конструктивне документације, затим као пројектни менаџер на међународном пројекту за потребе Министарства одбране, а затим у пословима међународне војнотехничке и војноекономске сарадње.

Тренутно запослење у Управи за одбрамбене технологије везано је за активности у управљању животним циклусом производа. Неке од надлежности радног места односе се на праћење и управљање пројектима развоја и модернизације средстава наоружања и војне опреме, учешће у процесима уговарања, контрола норматива времена и материјала неопходних за производњу средстава, праћење и контрола процеса производње средстава у фабрикама Одбрамбене индустрије Србије.

Имајући у виду чињеницу да је кандидат ангажован и на реализацији научно истраживачког пројекта на Војнотехничком институту, који представља истраживање у области примене адитивних технологија у пројектовању и производњи делова и склопова наоружања и војне опреме, досадашњи научно-истраживачки рад и интересовања усмерена су у области

истраживања технологија, савремених трендова и оптимizacionих техника у оквиру адитивних технологија.

У оквиру докторских академских студија положио је све испите предвиђене наставним планом и програмом. У склопу реализованих активности прикупљена је адекватна литература и извршена истраживања из области теме докторске дисертације, на основу којих су публиковани радови.

Познаје рад у софтверским пакетима Siemens NX, Material Magics. Има завршен курс за управљање пројектима PRINCE2 (Foundation ниво). Течно говори енглески језик.

Научно-истраживачки рад

Као аутор или коаутор кандидат је објавио 14 радова, при чему је из области истраживања предложене теме докторске дисертације објавио 6 радова на међународним и домаћим научно-стручним скуповима.

• Списак објављених радова

1. **Slobodan Malbašić**, Srdjan Živković, Veljko Petrović, Aleksa Grubić: *Digital thread for additive manufacturing*. 10th International Scientific Conference on Defensive Technologies – OTEH 2022, Belgrade Serbia, 13-14 October 2022. (M33)
2. Strahinja Djurović, Dragan Lazarević, **Slobodan Malbašić**, Živče Šarkovčević, Milan Blagojević: *Slope angle influence on the quality of surface overhangs on low-cost 3D printers*. 6th International Scientific Conference COMETA, Jahorina B&H, Republika of Srpska, 17th-19th November 2022. (M33)
3. Srdjan Živković, **Slobodan Malbašić**, Aleksa Grubić: *AM potencijal – projektovanje za aditivnu proizvodnju*. 43. JUPITER konferencija, Beograd 2022. ISBN: 978-86-6060-137-9. (M33)
4. **Slobodan Malbašić**, Bogdan Nedić, Aleksandar Đorđević, Srdjan Živković: *The role of the cost and quality in additive manufacturing*. 14TH Quality Festival Conference, May 24th - May 27th, Kragujevac 2023, Serbia. ISBN: 978-86-6335-104-2. (M33)
5. **Slobodan Malbašić**, Bogdan Nedić, Aleksandar Đorđević, Srdjan Živković: *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)
6. **Slobodan Malbašić**, Srdjan Živković, Bogdan Nedić, Aleksandar Đorđević, Aleksa Grubić. *Process planning and optimization techniques in additive manufacturing*. Scientific Technical Review (ISSN 1820-0206). Military Technical Institute, Belgrade. 2023. (M51)

Сада је ангажован на реализацији научно истраживачког задатка/пројекта, за период од 2022. до 2024. године На ВТИ Београд, у области примене адитивних технологија у пројектовању и производњи делова и склопова наоружања и војне опреме (НВО).

6. Предлог за ментора са његовим референцама којима се доказује испуњеност услова за менторство

Комисија предлаже да ментор ове докторске дисертације буде др Александар Ђорђевић, ванредни професор Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу. Ванредни професор др Александар Ђорђевић је објавио укупно 22 рада категорије M20 и преко 30 радова међународним научним скуповима, као и у националним научним часописима.

Референце којима се доказује испуњеност услова за менторство:

1. Djordje Mijailovic, **Aleksandar Djordjevic**, Stefanovic Miladin, Dejan Vidojević, Albina Gazizulina, Damir Projovic, A Cloud-Based with Microcontroller Platforms System Designed to Educate Students within Digitalization and the Industry 4.0 Paradigm, Sustainability, Vol.13, No.22, pp. 12396, ISSN 2071-1050, Doi 10.3390/su132212396, 2021 [M22]
2. Danijela Tadić, **Aleksandar Đorđević**, Aleksandar Aleksić, Snežana Nestić, Selection of recycling centre locations by using the interval type-2 fuzzy sets and two-objective genetic algorithm, Waste Management & Research, Vol.37, No.1, pp. 26-37, ISSN 10963669, Doi <https://doi.org/10.1177/0734242X18799180>, 2019 [M22]
3. Nemanja Pajić, Marko Đapan, Eva Buluschek, Waldemar Fahrenbruch, **Aleksandar Đorđević**, Miladin Stefanović, Machine learning prediction model for small data sets instead of destructive tests for a case of resistance brazing process verification, International Journal of Industrial Engineering, Vol.30, No.3, pp. 797-814, ISSN 1072-4761, Doi <https://doi.org/10.23055/ijietap.2023.30.3.8691>, 2023 [M23]
4. Ivan Peko, Bogdan Nedic, **Aleksandar Djordjevic**, Ivica Veza, Modeling of kerf width in plasma jet metal cutting process using ANN approach, Tehnički vjesnik–Technical Gazette Scientific professional Journal of technical faculties of the Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Vol.25, No.2, pp. 709-716, ISSN 1330-3651, Doi 10.17559/TV-20161024093323, 2018 [M23]
5. Milan Eric, Miladin Stefanovic, **Aleksandar Djordjevic**, Nikola Stefanovic, Milan Mistic, Nebojsa Abadic, and Pavle Popović, Production process parameter optimization with a new model based on a genetic algorithm and ABC classification method, Advances in Mechanical Engineering, Vol.8, No.8, pp. 1-18, ISSN 1687-8140, Doi 10.1177/1687814016663477, 2016 [M23]

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

ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ КОМИСИЈЕ

Мр Слободан Малбашић, дипл. инж. маш, испунио је све предвиђене услове за одобрење израде докторске дисертације.

Предложена тема докторске дисертације је оригинална и поседује научну заснованост. Предложена методологија израде докторске дисертације је у складу са научним принципима. Очекивани резултати докторске дисертације требало би да представљају оригинални научни допринос у области оптимизације процеса планирања производње адитивним технологијама и развој методологије за прорачун трошкова.

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:



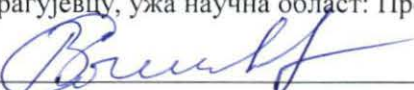

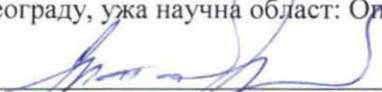
„МОДЕЛ ТРОШКОВА ПРОЦЕСА ПРОИЗВОДЊЕ АДТИВНИМ ТЕХНОЛОГИЈАМА“

прихвати и одобри њену израду кандидату мр Слободану Малбашићу, дипл. инж. маш. Комисија предлаже да ментор ове докторске дисертације буде др Александар Ђорђевић, ванредни професор Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу.

У Београду и Крагујевцу,

09.02.2 2024. год.

КОМИСИЈА

1. 
Др Александар Ђорђевић, ванредни професор - Председник Комисије, Факултет инжењерских наука, Универзитета у Крагујевцу, ужа научна област: Информациони инжењеринг;
2. 
Др Богдан Недељковић, редовни професор – Члан, Факултет инжењерских наука, Универзитета у Крагујевцу, ужа научна област: Производно машинство;
3. 
Др Влада Соколовић, доцент – Члан, Војна академија Универзитета одбране у Београду, ужа научна област: Систем логистике, снабдевање и одржавање;
4. 
Др Драган Памучар, редовни професор – Члан, Факултет организационих наука, Универзитета у Београду, ужа научна област: Операциона истраживања и статистика;
5. 
Др Драган Цунић, ванредни професор – Члан, Факултет инжењерских наука, Универзитета у Крагујевцу, ужа научна област: Производно машинство;