

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 24.10.2025. године (број одлуке: 01-1/3779) одређени смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације под насловом: „Истраживање примене адитивно произведеног и тополошки оптимизованог алата за савијање лима праћено еластичном повратношћу”, кандидата **Марка Делића**, студента докторских академских студија Машинског инжењерства, за коју је именован ментор др **Весна Мандић**, редовни професор.

На основу података којима располажемо достављамо следећи:

ИЗВЕШТАЈ

О ОЦЕНИ УРАЂЕНЕ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

1. Подаци о докторској дисертацији
1.1. Наслов докторске дисертације:
Истраживање примене адитивно произведеног и тополошки оптимизованог алата за савијање лима праћено еластичном повратношћу
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 је написана на 259 страница и подељена на девет логички и тематски повезаних поглавља. Садржи 246 слика, 83 табеле и 138 библиографских извора. Рад се заснива на експерименталном и нумеричком истраживању примене адитивно произведених и тополошки оптимизованих полимерних алата за савијање лима праћено еластичном повратношћу. Поголавља су структурисана на следећи начин:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Увод (стр. 1–4) – представља проблематику, циљеве и хипотезе истраживања; 2. Преглед истраживања (стр. 5–28) – даје критички приказ релевантних радова и метода; 3. Еластична повратност код угаоног савијања лимова и принципи њене компензације (стр. 29–68) – анализира физичке принципе и моделе деформације; 4. Принципи и примена адитивне производње и тополошке оптимизације (стр. 69–104) – систематизује теоријске и технолошке основе; 5. Испитивање карактеристика полимерних материјала адитивно третираних <i>FDM</i> технологијом (стр. 105–165) – описује експерименталне методе и резултате; 6. Експериментално-нумеричко моделирање процеса једноугаоног савијања (стр. 166–194)

– представља развој и валидацију нумеричких модела;

7. Експериментално-нумеричко истраживање применом адитивно произведених и тополошки оптимизованих алата (стр. 195–230) – анализира резултате примењених решења;
8. Студија случаја: индустријска примена (стр. 231–245) – показује применљивост развијене методологије у реалним условима;
9. Закључак (стр. 246–250) – сумира резултате и даје смернице за будућа истраживања.

1.3. Опис предмета истраживања (до 500 карактера):

Предмет истраживања докторске дисертације је анализа и верификација могућности примене адитивно произведених и тополошки оптимизованих полимерних алата у процесима савијања лима праћеним еластичном повратношћу. У првом делу истраживања експериментално су одређене механичке карактеристике полимерних материјала намењених за израду алата. Процес савијања је нумерички моделован методом коначних елемената тако да се обезбеди оптималан распоред деформационих сила при употреби полимерних алата. Нумеричким експериментима дефинисане су геометрије алата, након чега су израђени и експериментално верификовани модели. На основу измерених оптерећења спроведена је тополошка оптимизација радних компоненти алата и потврђена њихова примена у индустријским условима.

1.4. Анализа испуњености полазних хипотеза:

Полазне хипотезе су прецизно дефинисане у уводном делу дисертације и представљају основу истраживачког приступа. На основу приказаних експерименталних и нумеричких резултата закључено је да су све постављене хипотезе потврђене, чиме је потпуно доказана валидност методологије која омогућава примену адитивно произведених и тополошки оптимизованих полимерних алата у процесима обликовања лима.

Прва хипотеза гласи: *могуће је користити полимерне 3D штампане алате у одређеним процесима обликовања лимова.*

Ова хипотеза је доказана експерименталним истраживањима приказаним у седмом поглављу. Резултати испитивања показали су да полимерни алати, израђени применом *FDM* технологије од *ABS*-а и Оникса, могу успешно да издрже оптерећења током процеса једноугаоног савијања без настанка трајних деформација или површинских оштећења. Контролом облика алата пре и после експеримента није уочено одступање у геометрији, што потврђује њихову стабилност и функционалност.

Друга хипотеза гласи: *на основу познавања карактеристика материјала и резултата нумеричке симулације на бази методе коначних елемената могуће је прецизно одредити угао компензације еластичног исправљања код једноугаоног савијања лима како у металним тако и у полимерним алатима.*

Хипотеза је потврђена упоредним анализама експерименталних и нумеричких резултата. Разлика вредности угла савијања између челичних и полимерних алата (од *ABS*-а и Оникса) износила је мање од 1%, што је у потпуности у складу са резултатима из релевантне литературе и потврђује поузданост нумеричког модела.

Трећа хипотеза гласи: *излазно поље напона на радним елементима алата добијено нумеричком симулацијом процеса угаоног савијања може се користити за тополошку оптимизацију полимерних алата, чиме се постиже уштеда у материјалу и времену израде без губитка функционалних својстава.*

Ова хипотеза је доказана у осмом поглављу, где су представљени резултати тополошке

оптимизације и њихова верификација у лабораторијским и индустријским условима. Оптимизовани алати задржали су механичку стабилност, а резултати углова савијања, дијаграма деформациона сила – радни ход и стања површине алата нису показали значајне разлике у односу на оригиналне конструкције.

Све три хипотезе су потврђене, чиме је доказано да је развијени методолошки приступ — заснован на комбинацији експерименталних истраживања, нумеричког моделирања и тополошке оптимизације – поуздан и применљив за развој и употребу полимерних алата у процесима обликовања лима.

1.5. Анализа примењених метода истраживања:

У докторској дисертацији кандидата Марка Делића под насловом „Истраживање примене адитивно произведеног и тополошки оптимизованог алата за савијање лима праћено еластичном повратношћу” примењен је интегрисани методолошки приступ који обухвата експерименталне, нумеричке и аналитичке методе.

На почетку истраживања извршена је свеобухватна систематизација досадашњих истраживања у области примене адитивне производње у процесима обликовања лима, са циљем да се издвоје кључни утицајни параметри адитивне производње и одреде методе за испитивање механичких карактеристика материјала.

Механичке карактеристике полимерних материјала (*ABS* и *Оникс*) одређене су применом стандардних метода испитивања материјала, кроз тестове затезања и притискивања. Експерименти су изведени на универзалним машинама за испитивање материјала *Zwick/Roell Z100* и *Shimadzu* пулзатору, уз контролисане услове оптерећења и мерења деформација. На основу добијених резултата извршена је процена утицаја параметара *FDM* технологије (угао и брзина штампања, облик и густина испуне, дебљина слоја и положај штампања) на механичке карактеристике полимера.

Нумеричка анализа процеса савијања изведена је применом *методе коначних елемената* у софтверу *Simufact.forming*. Симулације су реализоване у *2D* и *3D* варијантама, при чему су алати дефинисани као деформабилни елементи са реалним материјалним карактеристикама. Анализом оптерећења и дистрибуције напона добијене су оптималне геометрије обликача и матрице које омогућавају добијање прецизног угла савијања уз ограничену деформациону силу.

После валидације нумеричких резултата, радни делови алата су израђени применом адитивне *FDM* технологије на уређајима *Makerbot Replicator 2X* и *Markforged Onyx Pro*. Експерименти једноугаоног савијања лима изведени су на универзалној машини *Zwick/Roell Z100* применом посебно конструисаних носача и стезних плоча које омогућавају стабилно фиксирање алата током мерења.

Тачност израде и понашање алата након процеса савијања проверени су методом *3D* дигитализације. За скенирање алата и савијених делова коришћен је скенер *David SLS-2*, а обрада облака тачака и мерење углова савијања обављени су у софтверу *Geomagic Design X*. Поређењем скенираних и номиналних *CAD* модела извршена је процена геометријских одступања и потврђена тачност израде.

Тополошка оптимизација радних компоненти алата извршена је у софтверу *nTopology* применом *SIMP методе* (*Solid Isotropic Material with Penalization*), са циљем да се постигне уштеда материјала и смање време израде уз очување механичке стабилности.

Коначна верификација изведена је у индустријским условима на апкант преси, где су оптимизовани и адитивно произведени алати показали потпуну функционалност без структурних оштећења или геометријских одступања.

Интеграција експерименталних испитивања, нумеричких симулација и тополошке оптимизације омогућила је поуздану анализу процеса савијања лима и потврдила применљивост развијене

методологије у лабораторијским и индустријским условима.

1.6. Анализа испуњености циља истраживања:

Докторска дисертација под насловом „Истраживање примене адитивно произведеног и тополошки оптимизованог алата за савијање лима праћено еластичном повратношћу” представља значајан научни и технолошки допринос у области примене адитивне производње у процесима обликовања метала деформисањем. Основни циљ истраживања био је развој методологије која омогућава замену традиционалних челичних алата полимерним адитивно произведеним алатима уз очување геометријске прецизности и стабилности процеса.

Циљеви дефинисани на почетку дисертације у потпуности су остварени, што је потврђено експерименталним, нумеричким и аналитичким резултатима:

- Извршена је систематизација прегледа истраживања у области примене адитивних технологија и полимерних материјала у процесима обликовања лима. Анализом релевантне литературе идентификовани су материјали и параметри адитивне производње најпогоднији за примену у развоју функционалних полимерних алата.
- Одређене су механичке карактеристике полимерних материјала ABS и Оникс, који су коришћени за израду радних елемената алата. Експериментални подаци добијени тестовима затезања и притискивања обрађени су применом аналитичких апроксимација које се користе у софтверима за нумеричке симулације, чиме је омогућено прецизно описивање понашања материјала током деформисања.
- Развијен је нумерички модел процеса савијања лима применом методе коначних елемената, који је омогућио предвиђање углова еластичне повратности и дистрибуције напона на алатима. Модел је верификован у више експерименталних сценарија са челичним и полимерним алатима, уз одступања мања од 1%, што потврђује његову поузданост.
- Дефинисана је методологија замене челичних алата полимерним адитивно произведеним алатима, заснована на комбинацији карактеризације материјала, нумеричког моделирања, тополошке оптимизације и експерименталне верификације. Развијени приступ је генерализован тако да се може применити и на друге технологије обликовања лима и сродне процесе пластичне деформације.
- Доказана је оправданост примене тополошке оптимизације у дизајну алата, при чему је показано да се применом *SIMP* методе може значајно смањити маса алата и време израде, без губитка механичке стабилности или прецизности процеса.
- Потврђена је индустријска применљивост предложене методологије, што је доказано кроз студију случаја у којој су адитивно произведени и тополошки оптимизовани полимерни алати успешно примењени на апкант преси у реалним производним условима.

Резултати истраживања показују да је постављени циљ у потпуности остварен и да развијена методологија представља поуздану основу за будућа истраживања и индустријску примену полимерних адитивно произведених алата у процесима обликовања лима.

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):

Резултати истраживања приказани у докторској дисертацији представљају значајан допринос области адитивне производње и примене полимерних алата у процесима обликовања лима. Истраживање је обухватило експерименталну карактеризацију полимерних материјала,

¹Уколико публикација нема DOI број уписати ISSN и ISBN

нумеричко моделирање процеса савијања и тополошку оптимизацију радних компоненти алата, уз верификацију резултата у лабораторијским и индустријским условима.

Експерименталним испитивањем механичких карактеристика *ABS* и Оникс материјала добијени су подаци о утицају технолошких параметара *FDM* процеса (брзина, угао, положај штампања, облик и густина испуне) на затезну и притисну чврстоћу, модул еластичности и појаву лома. Ови резултати представљају основу за нумеричку анализу процеса савијања и за дефинисање материјалних модела примењених у симулацијама методом коначних елемената.

Нумеричке симулације су показале да је могуће постићи високу тачност у предвиђању угла еластичне повратности, као и у одређивању дистрибуције напона и деформација на радним деловима алата. Поређењем резултата симулације и експерименталних мерења утврђена је веома добра сагласност, са одступањем мањим од 1%, што потврђује применљивост нумеричких модела за пројектовање полимерних алата.

Применом тополошке оптимизације у софтверу *nTopology* постигнута је значајна редукција масе алата уз очување структурне стабилности и функционалности. Овим је доказано да се применом адитивне производње и тополошке оптимизације могу постићи ефикаснија и економичнија решења у процесима обликовања лима. У завршном делу рада, експерименти спроведени на индустријској апкант преси потврдили су потпуну функционалност и поузданост адитивно произведених полимерних алата у реалним условима производње.

Сумирано, добијени резултати истраживања потврђују све постављене хипотезе и у потпуности остварују циљ докторске дисертације, при чему представљају нови приступ у пројектовању и примени алата за обликовање лима уз коришћење савремених дигиталних технологија.

Резултат спроведеног истраживања представља скуп оригиналних научних сазнања која су објављена и представљена стручној и научној јавности кроз више радова. Из истраживања приказаног у докторској дисертацији до сада су објављена укупно четири рада — два у међународним часописима који се налазе на *SCI* листи, један у рецензираној научној публикацији и један рад презентован на међународној конференцији. Објављени радови обухватају резултате експерименталних и нумеричких истраживања, као и анализу утицаја параметара адитивне производње на механичка својства и структурно понашање полимерних материјала. Објављени резултати потврђују научни значај и актуелност теме докторске дисертације и представљају релевантан допринос у области адитивне производње и инжењерства материјала.

Списак објављених радова:

1. **Delić, M.**, Mandić, V., Aleksandrović, S., Arsić, D. Determination of the influence of infill pattern and fiberglass reinforcement on the tensile properties of additively manufactured material by FDM technology. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 37(11), 2023, 5569-5575., <https://doi.org/10.1007/s12206-023-2309-1>, [M22]
2. **Delić, M.**, Mandić, V., Aleksandrović, S., Arsić, D., Ivković, Đ., Adamović, D., Ratković, N. Influence of FDM printing parameters on the compressive mechanical properties and fracture behavior of ABS material. *European Conference on Fracture 2024*, August 26 - 30, 2024. Zagreb, Croatia. *Book of abstracts*, 309., ISBN 978-953-7738-91-4, [M34]
3. **Delić, M.**, Mandić, V., Aleksandrović, S., Arsić, D., Ivković, D. Determination of the influence of FDM printing parameters on tensile strength and fracture occurrence of additively manufactured ABS material. *International Journal of Structural Integrity*, 16(3), 2025, 570-590., <https://doi.org/10.1108/IJSI-03-2024-0040>, [M21]
4. **Delić, M.**, Mandić, V., Aleksandrović, S., Arsić, D., Ivković, Đ., Ratković, N., Adamović, D. Influence of FDM printing parameters on the compressive mechanical properties and fracture of ABS material. *Procedia Structural Integrity*, 68, 2025, 741-745., Doi <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2025.06.124>, [M54]

На основу прегледа објављених резултата и научних радова Комисија сматра да су сви циљеви дисертације испуњени и да су стечени услови за одбрану докторске дисертације кандидата Марка Делића.

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 је на основу свеобухватног увида у садржај, структуру и резултате докторске дисертације кандидата Марка Делића, под насловом „Истраживање примене адитивно произведеног и тополошки оптимизованог алата за савијање лима праћено еластичном повратношћу”, као и на основу анализе публикованих радова који произилазе из дисертације, једногласно закључила да је реч о оригиналном научно-истраживачком делу.

Дисертација представља самосталан и иновативан научни допринос у области машинства, посебно у домену примене адитивне производње и тополошке оптимизације у развоју алата за обликовање лима. Кандидат је применио сопствену методологију која обједињује експерименталне, нумеричке и аналитичке приступе, чиме је постигао резултате који превазилазе постојећа сазнања у овој научној области.

Према извештају о провери плагијаризма, подударност у тексту докторске дисертације износи 0%, што потврђује да је рад у потпуности оригиналан и да не садржи елементе неовлашћеног преузимања туђих резултата.

На основу извршене анализе и увида у достављену документацију, Комисија закључује да је докторска дисертација резултат оригиналног научног рада кандидата и да представља значајан допринос у истраживању и примени полимерних адитивно произведених и тополошки оптимизованих алата за савијање лима.

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

У прегледу литературе (поглавље 2) детаљно је приказано да област адитивне производње полимерних материјала бележи интензиван развој у последњих неколико година, са растућим бројем студија које се баве новим композитним материјалима, оптимизацијом структуре испуне, мултифункционалним конструкцијама и интеграцијом нумеричких и пројектантских метода (на пример, применом нумеричких метода и тополошке оптимизације у пројектовању алата).

Ипак, у литератури ова проблематика није у довољној мери разрађена када је реч о практичној примени адитивно произведених полимерних алата у процесима савијања лима, посебно у погледу њихове механичке стабилности, предвиђања еластичне повратности и могућности тополошке оптимизације конструкције.

У том контексту, значај и допринос ове докторске дисертације огледају се у следећем:

1. Интеграција савремених истраживачких приступа – дисертација повезује актуелне поступке адитивне производње, нумеричке симулације и тополошке оптимизацију у јединствену методологију, што је у складу са савременим трендовима развоја адитивне производње у области машинства.
2. Примена резултата на процес савијања лима – док се у већини истраживања анализе ограничавају на појединачне аспекте механичког понашања полимера, ова дисертација обухвата комплетан поступак, од испитивања материјала и нумеричких симулација до

експерименталне и индустријске верификације примене полимерних алата.

3. Побољшање постојећих методологија пројектовања алата – развијени модел процеса савијања, заснован на методи коначних елемената, омогућио је прецизније предвиђање еластичне повратности и оптерећења у радним елементима, што представља унапређење постојећих методолошких решења.
4. Увођење тополошке оптимизације у пројектовање полимерних алата – дисертација показује да се применом тополошке оптимизације може значајно унапредити конструкција алата, смањити маса и време израде, уз задржавање стабилности и прецизности процеса.
5. Индустријска применљивост резултата – добијени резултати потврђени су и у реалним производним условима, чиме је доказано да је предложена методологија применљива и у пракси, а не само у лабораторијском окружењу.

У односу на актуелно стање у научној области, ова докторска дисертација представља значајан научни и технолошки допринос развоју методологија за пројектовање, анализу и примену полимерних адитивно произведених и тополошки оптимизованих алата у процесима обликовања лима.

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 Марка М. Делића, под насловом „Истраживање примене адитивно произведеног и тополошки оптимизованог алата за савијање лима праћено еластичном повратношћу“, у потпуности одговара теми дисертације одобрене одлуком број 01-1/1323-7 од 18.4.2024. године од стране Наставно-научног већа Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу и одлуком Већа за техничко-технолошке науке Универзитета у Крагујевцу, број IV-04-559/10 од 11.7.2024. године.

Комисија је утврдила да дисертација, по квалитету, обиму и оствареним резултатима истраживања, у потпуности задовољава све услове и академске стандарде прописане студијским програмом докторских студија, као и општим актима Факултета и Универзитета.

Дисертација обухвата јасно дефинисан истраживачки проблем, преглед релевантне литературе, прецизно формулисане циљеве и добро осмишљену методологију истраживања. Кандидат је показао висок ниво компетентности у примени експерименталних и нумеричких метода, као и способност да интегрише резултате различитих истраживачких приступа у јединствену целину. У раду су детаљно приказани поступци карактеризације материјала, моделирања процеса савијања и тополошке оптимизације, као и анализа добијених резултата, што показује да је истраживање спроведено на високом научном нивоу и да има јасну применљивост у индустријској пракси.

Истраживање је спроведено у складу са академским и етичким стандардима, уз адекватну примену савремених експерименталних и аналитичких метода. Извештај о провери плагијаризма потврђује потпуну оригиналност рада (0 % подударности), што додатно потврђује аутентичност научних резултата.

С обзиром на висок степен оригиналности, применљивост резултата и остварени научни допринос, Комисија закључује да кандидат Марко М. Делић и поднета докторска дисертација у потпуности испуњавају све услове предвиђене Законом о високом образовању, Статутом Универзитета у Крагујевцу и Статутом Факултета инжењерских наука за приступање јавној одбрани докторске дисертације.

2. ЗАКЉУЧАК

На основу анализе докторске дисертације и приложене документације Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације под насловом „Истраживање примене адитивно произведеног и тополошки оптимизованог алата за савијање лима праћено еластичном повратношћу”, кандидата **Марка Делића**, предлаже надлежним стручним органима да се докторска дисертација прихвати и да се одобри њена одбрана.

Чланови комисије:



Др Драган Адамовић, редовни професор

Факултет инжењерских наука Универзитета у
Крагујевцу

Производно машинство и Индустијски
инжењеринг

Председник комисије



Др Дејан Моврин, ванредни професор

Факултет техничких наука Универзитета у
НовомСаду

Технологије пластичног деформисања, адитивне
и виртуелне технологије

Члан комисије



Др Сузана Петровић Савић, ванредни професор

Факултет инжењерских наука Универзитета у
Крагујевцу

Производно машинство

Члан комисије