

ВЕЋУ ДОКТОРСКИХ СТУДИЈА

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Абделнасера А. Елајеба (Abdelnaser A. Elayeb), маг. инж. маш.

Одлуком Научно-наставног већа Машинског факултета Универзитета у Београду бр. 793/2 од 16.05.2024. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата **Абделнасера А. Елајеба (Abdelnaser A. Elayeb)** маг. инж. маш., под насловом: „Анализа утицаја угла депоновања на затезне механичке карактеристике адитивно произведених композитних плоча направљених од ПЕТ-Г полимера ојачаног кратким угљеничним влакнима“(ANALYSIS OF RASTER ANGLE INFLUENCE ON TENSILE MECHANICAL PROPERTIES OF ADDITIVELY MANUFACTURED COMPOSITE PLATES MADE FROM PET-G POLYMER REINFORCED WITH SHORT CARBON FIBERS).

На основу увида у завршену дисертацију, Комисија подноси следећи

РЕФЕРАТ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Кандидат Абделнасера А. Елајеба (Abdelnaser A. Elayeb) маг. инж. маш. уписао је прву годину Докторских студија на Машинском факултету Универзитета у Београду школске 2014/2015. године, да би наредне школске године уписао другу годину студија. По положеним испитима Докторских студија кандидат је поднео захтев за одобрење теме докторске дисертације број 833/1 од 26.05.2023. на Катедри за отпорност конструкција

Машинског факултета Универзитета у Београду. Кандидат је за ментора предложио проф. др Игора Балаћа, редовног професора Машинског факултета у Београду.

Одлуком Наставно-научног већа број 883/5 од 07.09.2023. године прихваћена је тема докторске дисертације под насловом „Анализа утицаја угла депоновања на затезне механичке карактеристике адитивно произведених композитних плоча направљених од ПЕТ-Г полимера ојачаног кратким угљеничним влакнима“ (ANALYSIS OF RASTER ANGLE INFLUENCE ON TENSILE MECHANICAL PROPERTIES OF ADDITIVELY MANUFACTURED COMPOSITE PLATES MADE FROM PET-G POLYMER REINFORCED WITH SHORT CARBON FIBERS) кандидата Абделнасера А. Елајеба (Abdelnaser A. Elayeb) и за ментора је именован др Игор Балаћ, редовни професор Машинског факултета у Београду.

На основу обавештења проф. др Игора Балаћа да је кандидат Абделнасера А. Елајеба (Abdelnaser A. Elayeb) завршио докторску дисертацију под насловом „Анализа утицаја угла депоновања на затезне механичке карактеристике адитивно произведених композитних плоча направљених од ПЕТ-Г полимера ојачаног кратким угљеничним влакнима“ (ANALYSIS OF RASTER ANGLE INFLUENCE ON TENSILE MECHANICAL PROPERTIES OF ADDITIVELY MANUFACTURED COMPOSITE PLATES MADE FROM PET-G POLYMER REINFORCED WITH SHORT CARBON FIBERS), Наставно-научно веће Машинског факултета у Београду донело је 16.05.2024. године Одлуку број 793/2 о именовању Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације у саставу:

- др Игор Балаћ, ред. проф. Машинског факултета у Београду, ментор,
- др Александар Грбовић, ред. проф. Машинског факултета у Београду,
- др Нина Обрадовић, научни саветник, Институт техничких наука САНУ, Београд.

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација под насловом „Анализа утицаја угла депоновања на затезне механичке карактеристике адитивно произведених композитних плоча направљених од ПЕТ-Г полимера ојачаног кратким угљеничним влакнима“ (ANALYSIS OF RASTER ANGLE INFLUENCE ON TENSILE MECHANICAL PROPERTIES OF ADDITIVELY MANUFACTURED COMPOSITE PLATES MADE FROM PET-G POLYMER REINFORCED WITH SHORT CARBON FIBERS) припада области техничких наука – машинство, а ужој научној области Отпорност конструкција, за коју је Универзитет у Београду - Машински факултет матичан. Ментор др Игор Балаћ је редовни професор на Машинском факултету Универзитета у Београду. Као аутор или коаутор до сада је публикувао 26 радова у часописима на SCI листи.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Абделнасера А. Елајеба (Abdelnaser A. Elayeb) је рођен у Сук-Алкамесу (Souq-Al Khamees), Либија, где је у периоду од 1977. године до 1988. године завршио основну и средњу школу. Школске 1993/94 уписао је, а 1998. године завршио студије на Универзитету Насер у Ал Кумсу, Либија (Naser University, Faculty of Engineering,

Mechanical Eng. Dept., Al Khums, Libya), да би магистарске студије уписао 2007. и исте завршио 2011. године на Универзитету у New Brunswick-у, Канада (University of New Brunswick, Faculty of Engineering, Mechanical Eng. Dep., Canada). Абделнасера А. Елајеба поседује вишегодишње радно искуство. У периоду од 1998. године до 2006. године био је запослен као асистент на Машинском факултету Универзитета Елмергиб у Ал Кумсу, Либија (Elmergib University, Faculty of Mechanical engineering, Al Khums, Libya), док у периоду од 2009. године до 2011. године ради као асистент на Универзитету у New Brunswick-у, Канада (University of New Brunswick, Faculty of Engineering, Mechanical Eng. Dep., Canada). У периоду од 2012. године до 2015. године ради као предавач на Машинском факултету Универзитета Елмергиб у Ал Кумсу, Либија (Elmergib University, Faculty of Mechanical engineering, Al Khums - Libya). Докторске студије на Универзитету у Београду Машинском факултету уписује школске 2014/15 године. Ожењен је и отац је шесторо деце.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација кандидата Абделнасера А. Елајеба (Abdelnaser A. Elayeb) маг. инж. маш., под насловом „Анализа утицаја угла депоновања на затезне механичке карактеристике адитивно произведених композитних плоча направљених од ПЕТ-Г полимера ојачаног кратким угљеничним влакнима“ (ANALYSIS OF RASTER ANGLE INFLUENCE ON TENSILE MECHANICAL PROPERTIES OF ADDITIVELY MANUFACTURED COMPOSITE PLATES MADE FROM PET-G POLYMER REINFORCED WITH SHORT CARBON FIBERS) је формата А4, има укупно 54 стране штампане двострано и написана је на енглеском језику. Илустрована је са 38 слика, садржи 88 нумерисаних израза и 5 табела, као и литературу са 36 референци.

Докторска дисертација се састоји од следећих поглавља:

1. Увод, преглед литературе и циљеви истраживања,
2. Механика композитних плоча ојачаних влакнима,
3. Адитивно произведене композитне плоче направљене од ПЕТ-Г полимера ојачаног кратким угљеничним влакнима,
4. Екпериментална испитивања се резултатима,
5. Успостављање функционалних зависности,
6. Закључци и будућа истраживања и
7. Литература.

Осим наведеног, докторска дисертација садржи резиме на српском и енглеском језику, садржај, биографију аутора, Изјаву о ауторству, Изјаву о истовестности штампане и електронске верзије докторског рада, као и Изјаву о коришћењу.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У складу са предметом рада, а ради стицања општег прегледа утицаја угла депоновања на затезне механичке карактеристике као и на појаву анизотропије код

адитивно произведених композитних плоча израђених принципом „равне штампе“ депоновањем истопљеног филамента а направљених од ПЕТ-Г полимера ојачаног кратким угљеничним влакнима, у **првом поглављу** дат је увод, преглед литературе и циљ истраживања докторске дисертације. На почетку су дати основни појмови о композитним материјалима са посебним освртом на класификацију композитних материјала на основу геометрије ојачивача. Даље се наводи да се за брзу израду делова од полимера најчешће користи метода депоновањем истопљеног филамента при чему су дате основе ове технике 3Д штампе. Даље, према подацима из литературе, наводи се да код делова од полимера који се најчешће користе код 3Д штампе методом депоновањем истопљеног филамента, параметри штампе као што су: оријентација штампе, дебљина слоја, угао депоновања, брзина депоновања, запреминска испуњеност, ширина линије истиснуте из дизне, температура дизне, температура радне плоче, итд. могу у знатној мери утицати на коначне механичке карактеристике готовог дела. Указује се на ниске вредности крутости и чврстоће структуралних делова од полимера а који су добијени овом методом као и на могућност ојачања ових материјала кратким угљеничним влакнима. Такође, даје се преглед релевантне литературе у којој су разматрани ови проблеми. Даље, наводе се радови у којима је анализиран и утицај угла депоновања материјалана појаву анизотропије. Закључује се да се у доступној литератури може приметити недостатак анализе утицаја угла депоновања материјала на механичке карактеристике композита направљених од ПЕТ-Г полимера ојачаног различитим процентуалним уделом кратких угљеничних влакана, као и недостатак процене утицаја угла депоновања на појаву и интензитет анизотропије код ове врсте материјала. На самом крају првог поглавља представљена је структура тезе у виду кратког описа садржаја сваког поглавља понаособ.

Поглавље два описује основе теорије еластичности анизотропног тела. На почетку поглавља дат је кратак приказ, тј. основни појмови о: напонима, деформацијама, равним проблемима теорије еластичности и теорији танких анизотропних плоча. Дате су основе механике композитних материјала ојачаних дугим усмереним влакнима. Пошто се ови материјали у смислу напонско - деформационе анализе разматрају као анизотропне танке плоче односно ламине које су наслагане једна на другу чинећи један јединствен плочасти носач који се назива ламинат, у наставку је приказана теорија напонско - деформационе анализе ламине - приказан је уопштени Хуков закон за генерално и специјално ортотропну ламину. Потом су дефинисане карактеристике еластичности ламине за случај локалног координатног система (осе координатног система се поклапају са главним материјалним правцима) као и карактеристике еластичности ламине за случај глобалног координатног система (осе координатног система се не поклапају са главним материјалним правцима). Такође је наведен поступак одређивања коефицијената матрице попустљивости код генерално и специјално ортотропне ламине, односно њиховог дефинисања преко константи еластичности.

У **трећем поглављу**, дефинисан је материјалкомполитногфиламента од кога ће се у наставку израдити узорци за испитивање затезних механичких карактеристика адитивно произведених композитних танких плоча израђених методом „равне штампе“ депоновањем истопљеног филамента. Изабрани састав филамента је од ПЕТ-Г полимера ојачаног кратким угљеничним влакнима (млевена угљенична влакна дужине око 200 μ m). Наводи се да је запремински удео ових угљеничних влакана код поменутих полимера релативно умерен, најчешће до 30%. Даље се опет наводи да параметри штампе као што су:

оријентација штампе, дебљина слоја, угао депоновања, запреминска испуњеност, ширина линије истиснуте из дизне, температура дизне, могу у знатној мери утицати на коначне механичке карактеристике готовог дела. Од претходно наведених параметара штампе, издвојен је угао депоновања (угао између правца штампе материјала и правца уноса оптерећења) као параметар који код делова типа танке плоче, а који су израђени принципом „равне штампе“, има значајан утицај на затезне механичке карактеристике, као и на изражену појаву анизотропије код ове врсте материјала. Сходно томе, закључује се да је за делове типа танке композитне плоче који су намењени да преносе умерен ниво оптерећења, а који су израђени од полимера ојачаних кратким угљеничним влакнима, од изузетне важности анализа утицаја угла депоновања на затезне механичке карактеристике као и евалуација евентуалне појаве анизотропије.

Поглавље четири описује експерименталне процедуре које су спроведене са циљем добијања затезних константи еластичности (*Модул еластичности*, *Поасонов коефицијент* и *Коефицијент узајамног утицаја другог облика*), модула смицања као и затезне и смицајне чврстоће. На почетку поглавља детаљно се описује спровођење експерименталних испитивања. Наводи се да су сви узорци за испитивање на затезање направљени према стандарду ASTM D638-03 и испитани на кидалици Shimadzu AG-Xplus, док су сви узорци за испитивање на смицање направљени према стандарду ASTM D4255 и испитани су применом посебног алата *Three-Rail Shear fixture*. Такође се наводи да су сви узорци направљени од ПЕТ-Г материјала ојачаног кратким угљеничним влакнима, одштампани на Пруса МИНИ+ 3D штампачу при чему је вариран угао депоновања материјала од угла 0° до угла 90° са инкрементом од 15°. Даље се наводи да је за израду узорака коришћен комерцијално доступан филамент од произвођача *Black Element* (Кина) са 30% масеног удела кратких угљеничних влакна. У наставку су приказани добијени резултати затезних константи еластичности (*Модул еластичности*, *Поасонов коефицијент* и *Коефицијент узајамног утицаја другог облика*), модула смицања као и затезне и смицајне чврстоће.

Наводи се да је за узорке одштампане са углом депоновања 0° добијена релативно висока просечна вредност затезне чврстоће од 52.2 МПа, у поређењу са вредношћу од 25.4 МПа добијеном за узорке одштампане са углом депоновања 90°. Слично, за узорке одштампане са углом депоновања 0° добијена је значајно виша просечна вредност модула еластичности од 4752 МПа, у поређењу са вредношћу од 1569 МПа добијеном за узорке одштампане са углом депоновања 90°. Анализа преломних површина узорака је извршена применом скенирајуће електронске микроскопије (СЕМ). Анализом слика добијених путем СЕМ-а утврђен је висок запремински удео различитих врста нехомогености. Порозитет, заједно са слабом везом оствареном између два суседна депонована слоја, представља један од кључних фактора за доста ниске вредности затезних карактеристика добијених за узорке одштампане са слојевима депонованим управно на правац затезања (угао депоновања 90°).

У поглављу пет приказано је успостављање функционалних веза између вредности затезних константи еластичности (*Модул еластичности*, *Поасонов коефицијент* и *Коефицијент узајамног утицаја другог облика*) и вредности угла депоновања. Ове функционалне везе дефинишу анизотропно понашање код ове врсте композита. У овом поглављу, ове функционалне зависности су упоређене са резултатима које даје Класична теорија ламинације. Наводи се да се експериментално дефинисана функционална веза између вредности *Модула еластичности* и вредности угла депоновања доста добро поклапа

са резултатима које даје Класична теорија ламинације, при чему грешка за читав опсег вредности угла депоновања не прелази 10%. Такође, наведено је да се експериментално дефинисане функционалне везе код *Поасоновог коефицијента* и *Коефицијента узајамног утицаја другог облика* не поклапају са резултатима које даје Класична теорија ламинације, те се наводи да је грешка у одређеним опсезима знатна док је у неким прихватљива.

Закључци до којих се дошло у овој дисертацији представљени су у **поглављу шест**. Такође, у оквиру овог поглавља приказани су и могући правци даљих истраживања.

У **поглављу седам** дат је списак свих извора коришћених при изради ове дисертације.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Докторска дисертација „Анализа утицаја угла депоновања на затезне механичке карактеристике адитивно произведених композитних плоча направљених од ПЕТ-Г полимера ојачаног кратким угљеничним влакнима“ (ANALYSIS OF RASTER ANGLE INFLUENCE ON TENSILE MECHANICAL PROPERTIES OF ADDITIVELY MANUFACTURED COMPOSITE PLATES MADE FROM PET-G POLYMER REINFORCED WITH SHORT CARBON FIBERS), кандидата Абделнасера А. Елајеба (Abdelnaser A. Elayeb), маг. инж. маш. даје савремен и оригиналан допринос дефинисању будућег конститутивног модела код адитивно произведених композитних плоча, које су добијене методом депоновања истопљеног филамента, израђених принципом „равне штампе“ а направљених од ПЕТ-Г полимера ојачаног кратким угљеничним влакнима.

Оригиналност се огледа првенствено у примени принципа Класичне теорије ламинације, која је првенствено настала за потребе структуралне анализе композитних плоча код којих је дугим влакнима ојачана полимерна матрица, код адитивно произведених композитних плоча (депоновањем истопљеног филамента) израђених принципом „равне штампе“ а направљених од ПЕТ-Г полимера ојачаног кратким угљеничним влакнима. Оригиналност добијених резултата, који су приказани у оквиру ове дисертације, потврђује и научни рад који је објављен у часопису са SCI листе, а који је категорије M22.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У изради дисертације је коришћена литература чији је списак дат у последњем поглављу. Коришћена литература обухвата укупно 36 референци од којих се већина бави полимерима који се најчешће користе у адитивној производњи, а којима се додају кратка угљенична влакана са циљем побољшања механичких карактеристика а првенствено чврстоће и крутости. Такође, део наведене литературе се бави проблемима појаве анизотропије код адитивно произведених материјала.

Анализом списка коришћене литературе може се закључити да је кандидат располагао већином доступне референтне литературе и да је исту проучио у току израде

дисертације и адекватно наводио. Она је послужила као полазна основа за формирање прегледа досадашњих истраживања и релевантан приказ тренутног стања у предметној области.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

У докторској дисертацији су примењене савремене научно-истраживачке методе у теоријском и експерименталном истраживању у доменима процене чврстоће и крутости адитивно произведених композитних плоча направљених од ПЕТ-Г полимера ојачаног кратким угљеничним влакнима. Током реализације циљева истраживања коришћене су следеће методе и технике истраживања:

1. Опис и поставка разматраног проблема (метод дескрипције).
2. Експерименталне технике прикупљања, анализе и тумачења података (експериментална метода)
3. Поређење експериментално добијених резултата са општеприхваћеним аналитичким решењима (метод компарације).

Изабране методе су адекватне за проблематику истраживања и правилно су коришћене за темељно представљање и анализирање проблема процене чврстоће и крутости адитивно произведених композитних плоча направљених од ПЕТ-Г полимера ојачаног кратким угљеничним влакнима.

3.4. Применљивост остварених резултата

Резултати докторске дисертације применљиви су у научном смислу, али имају и потенцијалну практичну примену.

Резултати приказани у оквиру ове докторске дисертације могу значајно допринети при дефинисању будућег конститутивног модела који ће омогућити примену нумеричке структуралне анализе на делове типа танке плоче добијене адитивном производњом а који су израђени од ове врсте материјала. Сходно томе, очекује се и да ће дисертација допринети бољем разумевању и даљем унапређењу могуће примене ове врсте композитних материјала за брзу и јефтину израду носивих делова који преносе умерен интензитет оптерећења.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Чланови Комисије сматрају да је кандидат показао да има смисао и знање неопходно да самостално препозна и систематски решава инжењерске и научне проблеме примењујући савремене истраживачке методе (аналитичке и експерименталне). Кандидат је такође показао да умешно користи расположиву литературу и поседује неопходан теоријски приступ, а све ефикасно комбинујући у сврху испуњења задатог научног циља.

Резултати докторске дисертације доказ су способности кандидата за самостални научно-истраживачки рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1 Приказ остварених научних доприноса

Остварени научни допринос је:

- Угао депоновања има значајан утицај на затезне механичке карактеристике адитивно произведених композитних плоча направљених од ПЕТ-Г полимера ојачаног кратким угљеничним влакнима те недвосмислено потврђује анизотропну природу код ове врсте материјала, а приказан је у поглављу четири на странама 33-39 и објављен је у раду наведеном под [1] у делу 4.3 овог реферата који је доступан је на следећој е-адреси: <https://doiserbia.nb.rs/img/doi/0350-820X/2023/0350-820X2300010E.pdf>

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

На основу прегледа релевантне научне литературе и сагледавања постојећих решења из области ове докторске дисертације, може се констатовати да су резултати истраживања у дисертације значајни и да су примењиви у пракси. Истовремено, на основу увида у задате циљеве истраживања и резултате представљене у докторској дисертацији, може се закључити да су пружени одговори на сва релевантна питања и решени проблеми са којима се кандидат сусрео током свог истраживања.

Спроведеним истраживањем омогућава се боље сагледавање утицаја угла депоновања на затезне механичке карактеристике адитивно произведених композитних плоча направљених од ПЕТ-Г полимера ојачаног кратким угљеничним влакнима преко успостављених функционалних зависности између измерене вредности чврстоће и угла депоновања.

У овој дисертацији пажња је била посвећена и утицају угла депоновања на појаву и интензитет анизотропије код ове врсте материјала. Појава и интензитет анизотропије је анализирана преко *коэффициента узајамног утицаја другог облика* који представља спрегу између појаве клизања у равни узорка и дејства нормалног напона при једноосном затезању.

Такође, посебна пажња је посвећена успостављању функционалних веза између вредности константи еластичности и вредности угла депоновања као и поређењу ових функционалних зависности са резултатима које даје Класична теорија ламинације.

4.3. Верификација научних доприноса

Верификација добијених оригиналних резултата остварена је кроз рад објављен у међународном часопису категорије M22, а који су везани за истраживања спроведена у оквиру ове докторске дисертације:

[1] **A. Elayeb**, M. Janković, S. Dikić, D. Bekrić, I. Balać, *Influence of Raster Angle on Tensile Properties of FDM Additively Manufactured Plates made from Carbon Reinforced PET-G Material*, Science of Sintering, ISSN: 0350-820X (IF= 1, 4 за 2023.) Vol 55, Iss 2, 2023., Pp 259 - 268. (M22).

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу прегледа и детаљне анализе докторске дисертације под називом „Анализа утицаја угла депоновања на затезне механичке карактеристике адитивно произведених композитних плоча направљених од ПЕТ-Г полимера ојачаног кратким угљеничним влакнима“ (ANALYSIS OF RASTER ANGLE INFLUENCE ON TENSILE MECHANICAL PROPERTIES OF ADDITIVELY MANUFACTURED COMPOSITE PLATES MADE FROM PET-G POLYMER REINFORCED WITH SHORT CARBON FIBERS) Абделнасера А. Елајеба (Abdelnaser A. Elayeb) маг. инж. маш., Комисија за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације констатује да је урађена докторска дисертација написана према свим стандардима у научно-истраживачком раду, као и да испуњава све услове предвиђене Законом о високом образовању, стандардима и Статутом Машинског факултета у Београду. Комисија такође сматра да дисертација представља оригиналан и успешан научно-истраживачки рад, са којим јенаучна и стручна јавност упозната кроз научни рад објављен у међународном часопису категорије M22.

Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације закључила је да дисертација представља оригинални научни рад са научним доприносом у области техничких наука, ужа научна област отпорност конструкција, па сагласно томе предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета Универзитета у Београду да прихвати Реферат Комисије, да дисертацију под називом „Анализа утицаја угла депоновања на затезне механичке карактеристике адитивно произведених композитних плоча направљених од ПЕТ-Г полимера ојачаног кратким угљеничним влакнима“ (ANALYSIS OF RASTER ANGLE INFLUENCE ON TENSILE MECHANICAL PROPERTIES OF ADDITIVELY MANUFACTURED COMPOSITE PLATES MADE FROM PET-G POLYMER REINFORCED WITH SHORT CARBON FIBERS) Абделнасера А. Елајеба (Abdelnaser A. Elayeb) маг. инж. маш. стави на увид јавности и да Реферат упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

У Београду, 26.08.2024. године

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

.....
др Игор Балаћ, редовни професор,
Универзитет у Београду, Машински факултет

.....
др Александар Грбовић, редовни професор,
Универзитет у Београду, Машински факултет

.....
др Нина Обрадовић, научни саветник,
Институт техничких наука САНУ, Београд