

Факултет Машински

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

55/6

(Број захтева)

Веће научних области техничких наука

(Назив већа научне области коме се захтев  
упућује)

13.07.2023.

(Датум)

## ЗАХТЕВ

### за давање сагласности на одлуку о прихватању теме докторске дисертације и о одређивању ментора

Молимо да, сходно члану 47. ст. 5. тач. 3. Статута Универзитета у Београду ("Гласник Универзитета", број 186/15-пречишћени текст и 189/16), дате сагласност на одлуку о прихватању теме докторске дисертације:

**„УТИЦАЈ ПАРАМЕТАРА АДИТИВНЕ ПРОИЗВОДЊЕ НА ОТПОРНОСТ НА ЛОМ  
ОРТОПЕДСКИХ ПЛОЧИЦА ОД PLA ПОЛИМЕРА“**

(пун назив предложене теме докторске дисертације)

НАУЧНА ОБЛАСТ

Механика лома

ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ:

- Име, име једног од родитеља и презиме кандидата:  
АЛЕКСА (ЉУБОМИР) МИЛОВАНОВИЋ
- Претходно образовање (назив и седиште факултета, студијски програм):  
Машински факултет Београд
- Година завршетка претходног нивоа студија: 2016.
- Година уписа на докторске студије: 2016.
- Назив студијског програма докторских студија: Машинско инжењерство

## ПОДАЦИ О МЕНТОРУ:

Име и презиме ментора: Александар Седмак

Звање: професор емеритус

Списак радова који квалификују ментора за вођење докторске дисертације:

1.Sedmak A., Grbovic A., Petrovski B., Sghayer A., Sedmak S., Berto F., Đurđević A, The effects of welded clips on fatigue crack growth in AA6156 T6 panels, (2022) International Journal of Fatigue, 165, art. no. 107162, DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2022.107162, ISSN: 1879-3452, Impact factor: 5.489

2.Milovanović A., Sedmak A., Golubović Z., Zelić Mihajlović K., Žurkić A., Trajković I., Milošević M., Corrigendum to “The effect of time on mechanical properties of biocompatible photopolymer resins used for fabrication of clear dental aligners” (2021) Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 120, art. no. 104581 DOI: 10.1016/j.jmbbm.2021.104581, ISSN: 1878-0180, Impact factor: 4.042

3.Sedmak A., Vucetic F., Colic K., Grbovic A., Sedmak S., Kirin S., Berto F., Fatigue life assessment of orthopedic plates made of Ti6Al4V, (2022) Engineering Failure Analysis, 137, art. no. 106259 DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.106259, ISSN: 1350-6307, Impact factor: 3.634

4.Vučetić F., Čolić K., Grbović A., Petrović A., Sedmak A., Kozak D., Sedmak S., Numerical simulation of fatigue crack growth in titanium alloy orthopaedic plates (2020) Tehnicki Vjesnik, 27 (6), pp. 1917 - 1922, DOI: 10.17559/TV-20200617192027,ISSN: 1848-6339, Impact factor: 0.864

5.Sedmak A., Vučetić F., Čolić K., Grbović A., Božić Ž., Sedmak S., Lozanović Šajić J., Fatigue crack growth in locking compression plates (2022) International Journal of Fatigue, 157, art. no. 106727 DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2022.106727, ISSN: 1879-3452, Impact factor: 5.489

Обавештавамо вас да је Наставно – научно веће на седници одржаној 13.07.2023. године размотрило предложену тему и закључило да је тема подобна за израду докторске дисертације јер садржи оригиналну идеју и да је од значаја за развој науке, примену њених резултата, односно развој научне мисли уопште.

**ДЕКАН ФАКУЛТЕТА**

Прилог:

1. Одлука Наставно-научног већа о прихватању теме и одређивању ментора
2. Извештај Комисије о оцени научне заснованости теме докторске дисертације

**Напомена:** Факултет доставља Универзитету захтев са прилозима у електронској форми и једном писаном примерку за архиву Универзитета

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ  
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ -

Број: 55/6

Датум: 13.07.2023. године

Београд, Краљице Марије 16

На основу члана 40. Закона о високом образовању („Службени гласник РС“, број 88/2017, 27/2018 – др. закон 73/2018, 67/2019, 11/2021 – аутентично тумачење, 67/2021 – др. Закон, 67/2021), члана 64. Статута Машинског факултета – пречишћени текст (број 1136/4 од 28.06.2021. године), Одлуке о изменама и допунама Статута број 239/6 од 17.02.2023. године и члана 38. Правилника о докторским студијама Машинског факултета и захтева студента **Алексе Миловановића**, маг. инж. маш., бр. 55/1 од 12.01.2023. године да му се одобри израда докторске дисертације, извештаја Комисије у саставу: др Зоран Радаковић, ред. проф., др Александар Грбовић, ред. проф., др Горан Младеновић, ванр. проф., др Милош Милошевић, научни саветник, ИЦ МФ Београд и др Александра Митровић, доц., Факултет за информационе технологије и инжењерство Универзитет Унион – Никола Тесла, Наставно-научно веће Машинског факултета на седници од 13.07.2023. године, донело је следећу

### ОДЛУКУ

Прихвата се научна заснованост теме докторске дисертације и констатује да студент **АЛЕКСА МИЛОВАНОВИЋ**, маг. инж. маш. испуњава услове за израду докторске дисертације **«УТИЦАЈ ПАРАМЕТАРА АДИТИВНЕ ПРОИЗВОДЊЕ НА ОТПОРНОСТ НА ЛОМ ОРТОПЕДСКИХ ПЛОЧИЦА ОД PLA ПОЛИМЕРА»**.

Одлуком ННВ број 55/3, од 09.03.2023. године за ментора докторске дисертације Алексе Миловановића, маг. инж. маш. именован је др Александар Седмак, проф. емеритус.

Одлуку доставити: Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду, ментору и архиви Факултета.

ДЕКАН  
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

проф. др Владимир Поповић

## **ВЕЋУ ДОКТОРСКИХ СТУДИЈА**

**Предмет:** Подобност теме и кандидата за израду докторске дисертације Алексе Љ. Миловановића, студента докторских студија

Одлуком Наставно-научног већа Машинског факултета у Београду број 55/4 од 09.03.2023. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата **Алексе Љ. Миловановића**, студента Докторских студија на Машинском факултету у Београду, за израду докторске дисертације и научне заснованости теме:

### **УТИЦАЈ ПАРАМЕТАРА АДИТИВНЕ ПРОИЗВОДЊЕ НА ОТПОРНОСТ НА ЛОМ ОРТОПЕДСКИХ ПЛОЧИЦА ОД PLA ПОЛИМЕРА**

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

## **РЕФЕРАТ**

### **1. ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ**

#### **1.1. Биографски подаци**

Алекса Љ. Миловановић рођен је 02.09.1991. у Београду, општина Звездара, Република Србија. Основну школу и гимназију завршио је у Београду са одличним успехом у свим школским годинама.

Основне академске студије на Машинском факултету, Универзитета у Београду је уписао 2010. године, а завршио 2013. године са просеком оцена 9,83 (девет и 83/100). Завршни испит основних студија је одбранио из предмета Основе оптике, оптичких уређаја и помагала са оценом 10. Мастер академске студије је уписао на Машинском факултету, Универзитета у Београду школске 2013/14. године, модул Биомедицинско инжењерство. У току мастер академских студија остварује просек оцена 9,85 (девет и 85/100). Завршни мастер рад је одбранио из предмета Биоматеријали у медицини и стоматологији, код ментора проф. др Александра Седмака, у септембру 2016. године са оценом 10.

Школске 2016/17. кандидат уписује Докторске академске студије на Машинском факултету, Универзитета у Београду и ступа у радни однос у Иновационом центру Машинског факултета у Београду 1.1.2017. године, као истраживач приправник на пројекту Министарства просвете, науке и технолошког развоја. Ангажован је у настави на предмету Биоматеријали у медицини и стоматологији од школске 2017/18.

Кандидат има завидно знање енглеског језика (говор, читање, писање), као и знање руског језика (читање, писање).

Поседује знања и вештине за рад у програмском пакету Microsoft Office, као и инжењерским програмима MatLab (MathWorks®, Natick, MA, USA), SolidWorks, ABAQUS (Dassault Systèmes, France), Simplify3D (Cincinnati, OH, USA), ARAMIS (GOM, Braunschweig, Germany). Кандидат поседује сертификат за рад на Shimadzu кидалицама (Shimadzu Corp., Kyoto, Japan).

#### **1.2. Сечено научноистраживачко искуство**

Докторске академске студије на Машинском факултету Универзитета у Београду кандидат **Алекса Љ. Миловановић** је уписао школске 2016/17. У складу са Правилником о докторским студијама Машинског факултета Универзитета у Београду кандидат је остварио укупно 120

ЕСПБ, чиме је испунио основни услов за пријаву докторске дисертације. Кандидат је положио све испите предвиђене планом и програмом са просечном оценом 9,83 (девет и 83/100). Списак положених предмета, оцена и остварених ЕСПБ су приказани у следећој табели.

| Број | Назив предмета                                   | Семестар                                                                              | Семестар и ЕСПБ | Оцена      |
|------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|------------|
| 1.   | Виши курс математике                             | Проф. др Слободан Радојевић                                                           | 1/5             | 9 (девет)  |
| 2.   | Нумеричке методе                                 | Проф. др Миодраг Спалевић                                                             | 1/5             | 9 (девет)  |
| 3.   | ОМНИРиК                                          | Проф. др Милош Недељковић                                                             | 1/5             | 10 (десет) |
| 4.   | Основни принципи механике лома                   | Проф. др Александар Седмак                                                            | 1/5             | 10 (десет) |
| 5.   | Истраживање и публикавање- I                     | Проф. др Зоран Радаковић                                                              | 1/10            | 10 (десет) |
| 6.   | Одабрана поглавља из механике                    | Проф. др Зоран Митровић                                                               | 2/5             | 10 (десет) |
| 7.   | Интегритет и век конструкција                    | Проф. др Зоран Радаковић                                                              | 2/5             | 10 (десет) |
| 8.   | Метода коначних елемената                        | Проф. др Владимир Буљак                                                               | 2/5             | 8 (осам)   |
| 9.   | Истраживање и публикавање- II                    | Проф. др Зоран Радаковић                                                              | 2/15            | 10 (десет) |
| 10.  | Примена механике лома на интегритет конструкција | Проф. др Александар Седмак                                                            | 3/5             | 10 (десет) |
| 11.  | Рачунарска механика лома                         | Проф. др Александар Седмак                                                            | 3/5             | 10 (десет) |
| 12.  | Истраживање и публикавање- III                   | Проф. др Александар Грбовић                                                           | 3/20            | 10 (десет) |
| 13.  | Истраживање и публикавање- IV                    | Проф. др Александар Грбовић                                                           | 4/8             | 10 (десет) |
| 14.  | Пројекат идеје докторске дисертације             | Проф. др Александар Седмак<br>Проф. др Александар Грбовић<br>Проф. др Зоран Радаковић | 4/22            | 10 (десет) |

У складу са чланом 15. Правилника о Докторским студијама Машинског факултета Универзитета у Београду, кандидат **Алекса Љ. Миловановић** је остварио укупно 120 ЕСПБ, тиме испунивши основни услов за пријаву докторске дисертације.

Кандидат је аутор и коаутор преко десет научно-стручних радова, од којих је 1 рад објављен у часопису М22 категорије, по 5 радова у часописима М23 категорије и у националном часопису М24 категорије, а остатак чине 10 публикација са међународних скупова штампано у целини, категорије М33.

### 1.3 Списак објављених радова и других релевантних резултата и активности које опредељују афинитет кандидата за рад на предложеној теми

#### Рад у истакнутом међународном часопису (М22)

1. **Миловановић, А.**, Седмак, А., Голубовић, З., Зелић Михајловић, К., Журкић, А., Трајковић, И., Милошевић, М., 2021: The effect of time on mechanical properties of biocompatible photopolymer resins used for fabrication of clear dental aligners. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials 119, 104494. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2021.104494.

#### Рад у међународном часопису (М23)

1. Хусаин, К.Н., Стојковић, М., Витковић, Н., Миловановић, Ј., Трајановић, М., Расхид, М., **Миловановић, А.**, 2019: Procedure for Creating Personalized Geometrical Models of the Human Mandible and Corresponding Implants. *Technical Gazette* 26 (4), стр. 1044-1051. DOI: 10.17559/TV-20181009193111.
2. Хасан, М.С., Иванов, Т., Воркапић, М., Симоновић, А., Даоу, Д., Ковачевић, А., **Миловановић, А.**, 2020: Impact of Aging Effect and Heat Treatment on the Tensile Properties of PLA (Poly Lactic Acid) Printed Parts. *MATERIALE PLASTICE* 57(3), стр. 147-159. DOI:10.37358/MP.20.3.5389.
3. Поповић, М., Пјевић, М., **Миловановић, А.**, Младеновић, Г., Милошевић, М., 2023: Printing parameter optimization of PLA material concerning geometrical accuracy and tensile properties relative to FDM process productivity. *Journal of Mechanical Science and Technology* 37(1). DOI: 10.1007/s12206-023-0113-6.
4. Шулак, И., Бабински, Т., Хлупова, А., **Миловановић, А.**, Нахлик, Ј., 2022: Effect of building direction and heat treatment on mechanical properties of Inconel 939 prepared by additive manufacturing. *Journal of Mechanical Science and Technology* 37(3). DOI: 10.1007/s12206-022-2101-7.
5. **Миловановић, А.**, Голубовић, З., Кирић, С., Бабински, Т., Шулак, И., Милошевић, М., Седмак, А., 2023: Manufacturing parameter influence on FDM polypropylene tensile properties. *Journal of Mechanical Science and Technology* 37 (рад прихваћен за штампу по одлуци од 08.05.2023.).

#### Рад у националном часопису међународног значаја (M24)

1. **Миловановић, А.**, Седмак, А., Чолић, К., Татић, У., Ђорђевић, Б., 2017: Numerical analysis of stress distribution in total hip replacement implant. *Structural Integrity and Life* 17(2), 139-144.
2. Чолић, К., Губељак, Н., Бурзић, М., Седмак, А., Мијатовић, Т., **Миловановић, А.**, 2017: Analysis of fracture behaviour of thin s316l stainless steel plates. *Structural Integrity and Life* 17(3), 211-216.
3. Мијатовић, Т., **Миловановић, А.**, Седмак, А., Миловић, Ј., Чолић, К., 2019: Integrity assessment of reverse engineered Ti-6Al-4V ELI total hip replacement implant. *Structural Integrity and Life* 19(3), 237-242.
4. Јевтић, И., Младеновић, Г., Милошевић, М., **Миловановић, А.**, Трајковић, И., Травица, М., 2022: Dimensional accuracy of parts obtained by SLS technology. *Structural Integrity and Life* 22(3), 288-292.
5. **Миловановић, А.**, Голубовић, З., Бабински, Т., Шулак, И., Митровић, А., 2022: Tensile properties of polypropylene additively manufactured by FDM. *Structural Integrity and Life* 22(3), 305-308.

#### Саопштење са међународног скупа штампано у целини (M33)

1. **Миловановић, А.**, Милошевић, М., Младеновић, Г., Ликозар, Б., Чолић, К., Митровић, Н., 2019: Experimental Dimensional Accuracy Analysis of Reformer Prototype Model Produced by FDM and SLA 3D Printing Technology. У: Mitrovic, N., Milosevic, M., Mladenovic, G. (eds) *Experimental and Numerical Investigations in Materials Science and Engineering, CNNTech CNNTech 2018 2018. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 54. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-319-99620-2\_7.
2. Панџић, А., Хоџић, Д., **Миловановић, А.**, 2019: Effect of Infill Type and Density on Tensile Properties of PLA Material for FDM Process. *Proceedings of the 30th DAAAM*

- International Symposium, pp.0545-0554, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISBN 978-3-902734-22-8, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria. DOI: 10.2507/30th.daaam.proceedings.074.
3. Панџић, А., Хоџић, Д., **Миловановић, А.**, 2019: Influence of Material Colour on Mechanical Properties of PLA Material in FDM Technology. Proceedings of the 30th DAAAM International Symposium, pp.0555-0561, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISBN 978-3-902734-22-8, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria. DOI: 10.2507/30th.daaam.proceedings.075.
  4. **Миловановић, А.**, Седмак, А., Грбовић, А., Мијатовић, Т., Чолић, К., 2020: Design Aspects of Hip Implant Made of Ti-6Al-4V Extra Low Interstitials Alloy. Procedia Structural Integrity 26, стр. 299-305. DOI: 10.1016/j.prostr.2020.06.038.
  5. Балтић, М., Хасан, М.С., Даоу, Д., **Миловановић, А.**, Ковачевић, А., Милошевић, М., 2020: Investigation of mechanical characteristics of composite plates under tensile loading. XXXV Međunarodno savetovanje ENERGETIKA 2020, Златибор, Србија.
  6. **Миловановић, А.**, Седмак, А., Грбовић, А., Голубовић, З., Младеновић, Г., Чолић, К., Милошевић, М., 2020: Comparative analysis of printing parameters effect on mechanical properties of natural PLA and advanced PLA-X material. Procedia Structural Integrity 28(5), стр. 1963-1968. DOI: 10.1016/j.prostr.2020.11.019.
  7. **Миловановић, А.**, Седмак, А., Грбовић, А., Голубовић, З., Милошевић, М., 2021: Influence of second-phase particles on fracture behavior of PLA and advanced PLA-X material. Procedia Structural Integrity 31, стр. 122-126. DOI: 10.1016/j.prostr.2021.03.020.
  8. **Миловановић, А.**, Голубовић, З., Трајковић, И., Седмак, А., Милошевић, М., Валеан, Е., Маршавина, Л., 2022: Influence of printing parameters on the eligibility of plane-strain fracture toughness results for PLA polymer. Procedia Structural Integrity 41, стр. 290-297. DOI: 10.1016/j.prostr.2022.05.034.
  9. **Миловановић, А.**, Милошевић, М., Трајковић, И., Седмак, А., Разави, М.Ј., Берто, Ф., 2022: Crack path direction analysis in plane-strain fracture toughness assessment tests of quasi-brittle PLA polymer and ductile PLA-X composite. Procedia Structural Integrity 42.
  10. **Миловановић, А.**, Подушка, Ј., Травничек, Л., Нахлик, Л., Седмак, А., Милошевић, М., Берто, Ф., 2022: Side-groove effect on fracture mechanical fatigue testing of PLA material. Procedia Structural Integrity 42.

#### Регистрован патент на националном нивоу (M92)

1. Травица, М., Митровић, Н., Петровић, А., Младеновић, Г., Милошевић, М., **Миловановић, А.**, Милошевић, Н., 2019: Алат за испитивање епрувета облика прстена. Спис малог патента: 1629 U1, Завод за интелектуалну својину, Београд, Република Србија.
2. Милетић, В., Петровић, В., Сташић, Ј., Митровић, Н., **Миловановић, А.**, Милошевић, М., 2020: Уређај за одређивање микро-механичких својстава стоматолошких материјала са модуларним алатима. Спис малог патента: 1643 U1, Завод за интелектуалну својину, Београд, Република Србија.
3. Митровић, Н., Милошевић, М., Младеновић, Г., **Миловановић, А.**, Поповић, М., Кирин, С., Ивановић, И., 2020: Помоћни прибор за испитивање рамова и покретних спојева прозора и врата. Спис малог патента: 1657 U1, Завод за интелектуалну својину, Београд, Република Србија.
4. Младеновић, Г., Милошевић, М., **Миловановић, А.**, Стојадиновић, С., Кирин, С., Трајковић, И., Митровић, Н., 2020: Помоћни прибор за испитивање алуминијумских и

PVC профила. Спис малог патента: 1658 U1, Завод за интелектуалну својину, Београд, Република Србија.

Приказане референце доказују да кандидат поседује знања и вештине за рад на предложеној докторској дисертацији, а 3 рада из категорије М33 (редни бр. 8-10) се директно односе на тему докторске дисертације и представљају прве резултате истраживања.

#### 1.4 Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

Досадашњим истраживачким активностима кандидат **Алекса Љ. Миловановић** је доказао заинтересованост, квалитет и стручност за научни и истраживачки рад. Публиковани радови у националним и међународним часописима, као и радовима изложеним на међународним конференцијама указују на смисао кандидата да се бави научним истраживањима. Објављени радови и истраживачка делатност кандидата су суштински повезани са научном облашћу којој припада тема предложене докторске дисертације, те кандидата квалификују за успешан и ефикасан теоријски и експериментални рад на предложеној теми.

На основу биографских и библиографских података кандидата, положених испита, научних и стручних активности, објављених радова, Комисија сматра да је кандидат подобан за рад на предложеној теми докторске дисертације.

## 2. ПРЕДМЕТ ИСТРАЖИВАЊА

Предмет ове докторске дисертације је анализа утицаја параметара адитивне производње на структурни интегритет произведеног дела, а то се пре свега односи на одабрану висину слоја и задату количину испуне у структури- за које се сматра да имају највећи утицај [1]. Фокус истраживања је на адитивној технологији која се зове Моделирање депоновањем топлог материјала (енг., Fused Deposition Modeling - FDM), која је данас у широкој употреби, од индустријске и лабораторијске примене где се користе професионалне машине до кућне употребе захваљујући аматерским машинама. Поменута адитивна технологија користи полимерне материјале из породице термопласта, а неке од тих термопластика су показале биокомпатибилност и нетоксичност попут PLA (енглески Polylactic Acid) полимера, те се могу разматрати као материјали за биомедицинске примене. Једна од могућих примена је израда биодеградабилних ортопедских плочица, које би се по завршетку своје функције ресорбовале у људском организму, чиме би се избегла операција уклањања ортопедске плочице. Код биомедицинских примена адитивне производне технологије све више фаворизују у односу на конвенционалне, субтрактивне технологије, [2].

На основу резултата и закључака добијених у истраживању процене интегритета и преосталог века конструкције одабраног дизајна ортопедске плочице би се добиле одговарајуће сугестије и смернице за њихову производњу. Основне механичке особине материјала се добијају коришћењем механичких испитивања са или без разарања, односно статичким или динамичким дејством силе у случају испитивања материјала са разарањем. Оваквим видом испитивања добија се увид у понашање материјала без присуства дефекта у структури, односно прслине. Употребом принципа механике лома добија се јаснија слика о понашању материјала у експлоатацији у присуства грешака.

При испитивању релативно кртих метала или полимера, као што је наведени PLA, сугестија је да епрувете имају одређену дебљину, [3-6] да би се постигло стање равне деформације дуж фронта прслине, односно да би се пластична деформација као параметар искључила, те је у том случају довољно користити принципе линеарно еластичне механике лома (ЛЕМЛ), који су једноставнији за тумачење. У ЛЕМЛ испитивања се могу радити под статичким и динамичким дејством силе. Пре свега, једна од полазних тачака механике лома је да најопаснији и најбржи ломови настају под дејством нормалних напона на прслину, односно цепањем структуре. При испитивању материјала под статичким дејством силе може се

утврдити максимална вредност фактора интензитета напона ( $K_{I,max}$ ) услед цепања структуре. Тај параметар, у механици лома познатији као жилавост лома, представља карактеристику материјала. На тај начин се добија увид до које вредности овог важног локалног параметра механике лома задати материјал може да издржи у експлоатацији. Следеће, услед динамичког дејства силе замор представља најнеповољнији облик оптерећења који доводи до лома. ЛЕМЈ интерпретира раст заморне прслине услед делујућег променљивог оптерећења према зависности дужине раста прслине по циклусу ( $da/dN$ ) од постигнутог опсега фактора интензитета напона ( $\Delta K_I$ ), приказан на дијаграму дупле логаритамске зависности. Линеарни опсег на дијаграму се описује Парисовим законом. Ограничење овог закона је област иницијалног ширења и област изузетно брзог раста до пред сам лом, за који се користе неки други напреднији закони, али он још увек представља задовољавајући алат за процену брзине раста прслине, [7-13]. У Парисовом закону, поред ова два наведена параметра, постоје још и две константе ( $C$ ,  $m$ ) којима се описује тренд раста заморне прслине. Наведене константе представљају важан податак за нумеричку симулацију (помоћу Методе коначних елемената) понашања ортопедске плочице са унесеним дефектом, под задатим оптерећењем и граничним условима. Преглед литературе која обухвата истраживања која су утицала на покретање истраживања предвиђених у овој докторској дисертацији су наведени у наставку:

1. DeStefano, V., Khan, S., Tabada, A., 2020. Applications of PLA in modern medicine. *Engineering Regeneration* 1, pp. 76-87. DOI: 10.1016/j.engreg.2020.08.002.
2. Tappa, K., Jammalamadaka, U., Weisman, J.A., Ballard, D.H., Wolford, D.D., Pascual-Garrido, C., Wolford, L.M., Woodard, P.K., Mills, D.K., 2019. 3D Printing Custom Bioactive and Absorbable Surgical Screws, Pins, and Bone Plates for Localized Drug Delivery. *Journal of Functional Biomaterials* 10(2), 17. DOI: 10.3390/jfb10020017.
3. Farah, S., Anderson, D.G., Langer, R., 2016. Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications — A comprehensive review. *Advanced Drug Delivery Reviews* 107, pp. 367-392. DOI: 10.1016/j.addr.2016.06.012.
4. Petersmann, S., Spoerk, M., Van De Steene, W., Üçal, M., Wiener, J., Pinter, G., Arbeiter, F., 2020. Mechanical properties of polymeric implant materials produced by extrusion-based additive manufacturing. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* 104, 103611. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2019.103611.
5. Vučetić, F., Čolić, K., Grbović, A., Petrović, A., Sedmak, A., Kozak, D., Sedmak, S., 2020. Numerical Simulation of Fatigue Crack Growth in Titanium Alloy Orthopaedic Plates. *Technical Gazette* 27(6), pp. 1917-1922. DOI: 10.17559/TV-20200617192027.
6. Gao, G., Xu, F., Xu, J., Tang, G., Liu, Z., 2022. A Survey of the Influence of Process Parameters on Mechanical Properties of Fused Deposition Modeling Parts. *Micromachines* 13, 553. DOI: 10.3390/mi13040553.
7. Spoerk, M., Arbeiter, F., Cajner, H., Sapkota, J., Holzer, C., 2017. Parametric optimization of intra- and inter-layer strengths in parts produced by extrusion-based additive manufacturing of poly(lactic acid). *Journal of Applied Polymer Science* 134(41): 45401. DOI: 10.1002/app. 45401.
8. Arbeiter, F., Spoerk, M., Wiener, J., Gosch, A., Pinter, G., 2018. Fracture mechanical characterization and lifetime estimation of near-homogeneous components produced by fused filament fabrication. *Polymer Testing* 66, pp. 105-113. DOI: 10.1016/j.polymertesting. 2018.01.002.
9. Arbeiter, F., Trávníček, L., Petersmann, S., Dlhý, P., Spoerk, M., Pinter, G., Hutař, P., 2020. Damage tolerance-based methodology for fatigue lifetime estimation of a structural component produced by material extrusion-based additive manufacturing. *Additive Manufacturing* 36(8): 101730. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101730.

10. Linul, E., Marsavina, L., Stoia, D.I., 2020. Mode I and II fracture toughness investigation of Laser-Sintered Polyamide. Theoretical and Applied Fracture Mechanics 106:102497. DOI: 10.1016/j.tafmec.2020.102497.
11. Stoia, D.I., Marsavina, L., Linul, E., 2020. Mode I Fracture Toughness of Polyamide and Alumide Samples obtained by Selective Laser Sintering Additive Process. Polymers 12(3):640. DOI: 10.3390/polym12030640.
12. Ezech, O.H., Susmel, L., 2020. On the notch fatigue strength of additively manufactured polylactide (PLA). International Journal of Fatigue 136: 105583. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2020.105583.
13. Safai, L., Cuellar, J.S., Smit, G., Zadpoor, A.A., 2019. A review of the fatigue behavior of 3D printed polymers. Additive Manufacturing 28, pp. 87-97. DOI: 10.1016/j.addma.2019.03.023.

Наведени радови [1-3] показују могућности PLA материјала за медицинску примену, а међу којима је и израда биоресорбилних плочица у ортопедији. У [4] PLA се пореди и са неким од сличних материјала који су такође биокомпатибилни, те се овде тврди да од овог материјала могу да се праве медицинске направе које би у експлоатацији носиле оптерећење. Поред ортопедских плочица од метала [5] важно је размотрити и ортопедске плочице од полимера како би се избегла евентуална секундарна операција одстрањивања медицинске направе. Параметри адитивне производње значајно утичу на механичке карактеристике добијеног дела [6,7]. Са становишта структурног интегритета, адитивно добијени делови су најслабији на местима прелаза између нанетих слојева, као и између самих 3Д штампаних линија. Одговарајућом оптимизацијом параметара као у [7] може се пренебрегнути ова "слабост" прављењем структура које су скоро хомогене. Оваква оптимизација параметара је дозволила наставак истраживања ка одређивањима параметара механике лома [8], а и нумеричкој симулацији са присуством дефекта у структури на примеру одабраног алата у експлоатацији [9]. Међутим, доступност 3Д штампача индустријског квалитета као у [7] није увек могућа, те се и резултати добијени на аматерским машинама могу сматрати корисним. Одређивање параметара механике лома по принципима ЛЕМЛ су тема научних радова [10,11] где се можемо упознати и са процедурама и специфичностима одређивања параметра жилавости лома за полимере у адитивној производњи. Наиме, велика пажња се мора посветити дефинисању положаја и геометрије прслине, јер од тога зависи тачност добијених резултата и веродостојност самог испитивања. Прслина мора бити довољно оштра и дуга, а да притом не угрози потребну дужину лигамента у коме прслина пропада током испитивања. Испитивање заморних својстава су ретка тема код 3Д штампаних полимера, али ти подаци пружају најбољу процену могуће примене [12,13]. Коришћењем резултата испитивања на замор може се приступити нумеричкој симулацији да би се добила процена интегритета и преосталог радног века одабране ортопедске плочице.

### 3. ЦИЉ ИСТРАЖИВАЊА

Научни циљ истраживања је одређивање отпорности на лом PLA материјала добијеним технологијом адитивне производње у зависности од задате висине слоја и количине испуне на епруветама дефинисаним стандардима. Познато је да су компоненте добијене у адитивној производњи, а поготову у технологији Моделирања депоновањем топљеног материјала, нехомогене те је један од циљева истраживања и проналазак оптималних параметара адитивне производње којима се смањује расипање добијених експерименталних резултата. На основу експерименталних резултата врше се нумеричке симулације на изабраном моделу ортопедске плочице како би се добио поуздани увид у понашање структуре импланата направљених од наведеног материјала.

На основу добијених експерименталних резултата и нумеричких симулација може се утврдити утицај одабраних параметара адитивне производње на понашање структуре плочице намењене за коришћење у људском организму. Тиме се даје практичан допринос у процени интегритета и радног века адитивно произведених компоненти за биомедицинске примене.

#### 4. ОСНОВНЕ ХИПОТЕЗЕ

Израде ове дисертације биће заснована на следећим хипотезама:

- Адитивне производне технологије, укључујући FDM, као последицу остављају слојевиту структуру са грешкама, осетљиву на настанак и раст прслина, посебно код полимерних материјала као што је PLA.
- Присуство грешака у слојевитој структури битно утиче на отпорност на лом, односно интегритет и век компоненти направљених од PLA.
- Параметри FDM битно утичу на квалитет PLA, односно на везу између слојева и присуство грешака, што има пресудан значај за отпорност PLA на лом.
- Правилним избором параметара FDM могуће је добити довољно добру отпорност PLA на лом, односно задовољавајући интегритет и век компоненти направљених од PLA.

#### 5. ПРЕДВИЂЕНЕ НАУЧНЕ МЕТОДЕ РАДА

У току истраживања користе се експерименталне и нумеричке методе, које су заједно намењене за процену интегритета и преосталог радног века конструкција ортопедских плочица од PLA материјала добијених коришћењем поступака адитивне производње.

Анализа интегритета и преосталог радног века адитивно произведених структура од PLA материјала би се радила кроз следеће фазе:

- Статичка испитивања у условима савијања у три тачке ради добијања параметра жилавости лома на стандардним SENB (*енг.* Single Edge Notched Bend) епруветама распоређеним у три групе према висини слоја (0.3, 0.2 и 0.1 mm) и подгрупама са количином испуне од 10 до 100% са инкрементом 10%. Дакле, има укупно три групе и 10 подгрупа чиме се добија укупно 30 различитих комбинација параметара.
- Динамичка испитивања на компактним СТ (*енг.* Compact Tension) епруветама намењеним за затезање. Све епрувете имају 100% количину испуне и разликују се по висини слоја (0.3, 0.2 и 0.1 mm). Дакле, реч је о три серије епрувета за испитивање на замор.
- Нумеричка симулација раста заморне прслине на моделу ортопедске плочице уз примену особина PLA материјала добијених из експерименталних испитивања, затим употребом одговарајућих граничних услова и оптерећења која се могу очекивати у експлоатацији.

Испитивања на затезање се сматрају претходном фазом, јер подаци из тих испитивања служе искључиво за евалуацију услова ЛЕМЛ код процене вредности параметра жилавости лома. Код нумеричке симулације, иницијална прслина се налази на месту отвора плочице где је у експлоатацији концентрација напона највећа - што ће бити потврђено посебним нумеричким прорачуном.

Као додатак резултатима добијеним из статичких и динамичких испитивања користе се и две камере ради праћења раста прслине у оба истраживања. У статичким испитивањима на SENB епруветама камере служе за проверу веродостојности испитивања (раст прслине дуж лигамента мора бити прав) тако и ради праћења параметара отварања прслине (*енг.*, Crack Opening Displacement- COD).

Код динамичких испитивања камере се постављају свака на једној страни компактне СТ епрувете, како би се добио параметар отварања прслине ( $da$ ), неопходан за исцртавање дијаграма дупле логаритамске зависности ( $\Delta K_I - da/dN$ ). Такође, ради посматрања површине лома и процене хомогености структуре на испитаним епруветама користе се методе оптичке и електронске (*енг.*, Scanning Electron Microscopy- SEM) микроскопије.

## 6. ОЧЕКИВАНИ НАУЧНИ ДОПРИНОСИ

Примена адитивних производних технологија за израду функционалних компонената представља новину у инжењерској пракси, али и потребу, пошто омогућава производњу делова сложених геометрија и нуди варијацију количине испуне. У случају компоненти које су значајно оптерећене и склоне лому, као што су ортопедске плочице, поред основних механичких испитивања и одређивања напонског стања, неопходна је и анализа коришћењем принципа механике лома, тим пре што су грешке типа прслина често неизбежне код адитивне производње.

Основни научни допринос ове дисертације с очекује у сагледавању понашања PLA полимера у присуству прслина, зависно од употребљених параметара адитивне производње. Биће сагледано статичко и динамичко понашање како би се утврдила оптимална комбинација параметара адитивне производње, што се очекује као додатни научни допринос. Коначно, процена интегритета и века адитивно произведене компоненте на основу експерименталних истраживања и нумеричких симулација се такође очекује као посебан научни допринос који ће да омогући поузданија примена компонената која се користиле у људском организму.

## 7. ПЛАН ИСТРАЖИВАЊА И СТРУКТУРА РАДА

Планом истраживања су предвиђене целине:

- 1) Израда епрувета од PLA материјала за затезање на 3Д штампачу;
- 2) Експериментално испитивање епрувета на затезање;
- 3) Израда SENB епрувета за одређивање параметра жилавости лома од PLA материјала на 3Д штампачу;
- 4) Експериментално испитивање SENB епрувета ради добијања параметра жилавости лома као и бележење деформација на површини епрувета помоћу DIC (*енг.*, Digital Image Correlation) камера, затим и провера услова ЛЕМЛ на основу резултата добијених испитивањем на затезање и процене жилавости лома;
- 5) Израда СТ епрувета од PLA материјала за испитивање на замор са становишта механике лома на 3Д штампачу;
- 6) Експериментално испитивање СТ епрувета од PLA материјала на замор са становишта механике лома;
- 7) Нумеричка симулација одабраног дизајна ортопедске плочице од PLA материјала на основу података добијених из наведених испитивања (гранични услови и оптерећења се узимају на основу предлога из литературе).

Структура докторске дисертације обухвата целине које ће бити обрађене:

- 1) Уводна разматрања, преглед литературе и опис проблема који се истражује;
- 2) Приказ поставке експеримената за затезање, процену жилавости лома и замора са становишта принципа механике лома;
- 3) Приказ експерименталних резултата истраживања за услове статичког и заморног (динамичког) оптерећења.
- 4) Приказ нумеричког прорачуна методом коначних елемената и анализа добијених података;
- 5) Дискусија експерименталних и нумеричких резултата;
- 6) Закључак изведен из добијених резултата и дискусија, са нагласком на научном доприносу докторске дисертације.

## 8. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Анализом пријаве теме кандидата Алексе Љ. Миловановића, маг. инж. маш., Комисија за оцену подобности и научне заснованости теме закључује да кандидат испуњава све предвиђене услове прописане Законом о високом образовању и Статутом Машинског факултета за рад на докторској дисертацији наслова „Утицај параметара адитивне производње на отпорност на лом ортопедских плочица од PLA полимера”.

Предложена тема представља недовољно истражену област и може да се реализује као успешна докторска дисертација јер је јасно дефинисана, научно утемељена и актуелна, посебно у смислу примене резултата истраживања у инжењерској пракси. Имајући у виду наведено, Комисија предлаже Већу докторских студија Машинског факултета Универзитета у Београду да се кандидату **Алекси Љ. Миловановићу**, маг. инж. маш., одобри израда докторске дисертације под називом:

### **Утицај параметара адитивне производње на отпорност на лом ортопедских плочица од PLA полимера**

Тема припада научној области техничких наука – машинство, ужој научној области – механика лома, за коју је Машински факултет Универзитета у Београду матичан. За ментора ове докторске дисертације предлаже се проф. др Александар Седмак, професор емеритус Машинског факултета Универзитета у Београду.

## ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

---

др Зоран Радаковић, редовни професор  
Машински факултет Универзитет у Београду

---

др Александар Грбовић, редовни професор  
Машински факултет Универзитет у Београду

---

др Горан Младеновић, ванредни професор  
Машински факултет Универзитет у Београду

---

др Милош Милошевић, научни саветник  
Иновациони центар Машинског факултета у Београду

---

др Александра Митровић, доцент  
Факултет за информационе технологије и  
инжењерство Универзитет Унион – Никола Тесла

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ  
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ –  
Број:55/3  
Датум: 09.03.2023.  
Београд, Краљице Марије бр.16

На основу члана 64. Статута Машинског факултета Универзитета у Београду број 1136/4 од 28.06.2021. године и члана 20. а сагласно члану 29. Правилника о докторским студијама на Универзитету у Београду од 24.05.2016.г., Наставно-научно веће Машинског факултета на седници одржаној дана 09.03.2023. године, донело је следећу

### ОДЛУКУ

Именује се др **Александар Седмак, проф. емеритус** за ментора докторске дисертације **„ОТПОРНОСТ НА ЛОМ АДИТИВНО ПРОИЗВЕДЕНИХ ОРТОПЕДСКИХ ПЛОЧИЦА ОД PLA ПОЛИМЕРА“** кандидата **АЛЕКСЕ МИЛОВАНОВИЋА**, маг. инж. маш. ,студента докторских студија.

Одлуку доставити: ментору, докторанту и архиви.

ДЕКАН  
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

проф. др Владимир Поповић