

Факултет Технолошко-металуршки

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

35/59

(Број захтева)

27. 3. 2025.

(Датум)

Веће научних области техничких наука

(Назив већа научне области коме се захтев упућује)

ЗАХТЕВ

за давање сагласности на одлуке о усвајању извештаја Комисије за оцену докторске дисертације и о именовању комисије за одбрану

Молимо да, сходно чл. 48 ст. 5 тач. 3) Статута Универзитета у Београду („Гласник Универзитета“ бр. 201/2018, 207/2019, 213/2020, 214/2020, 217/2020, 230/21, 232/22, 233/22 и 236/22), дате сагласност на одлуку о прихватању теме докторске дисертације:

КАНДИДАТ Слађана (Радун) Лакетић

(име, име једног од родитеља и презиме)

студент докторских студија на студијском програму: Инжењерство материјала

пријавио је докторску дисертацију под називом:

Модификација структуре и својстава легуре титана са високим садржајем ниобијума за биомедицинску примену

из научне области: Технолошко инжењерство

Универзитет је дана 3. 3. 2021. својим актом под бр. 61206-973/2-21 дао сагласност на предлог теме докторске дисертације која је гласила:

Модификација структуре и својстава легуре титана са високим садржајем ниобијума за биомедицинску примену

Име и презиме ментора: др Бојан Међо, ванредни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет

Име и презиме ментора 2: др Ивана Цвијовић-Алагић, научни саветник Универзитета у Београду, Институт за нуклеарне науке „ВИНЧА”, Институт од националног значаја за Републику Србија“

Комисија за оцену докторске дисертације именована је на седници одржаној 26. 12. 2024. одлуком факултета под бр. 35/332, у саставу:

	Име и презиме члана комисије	звање	научна област	Установа у којој је запослен
1.	Др Радмила Јанчић-Хајнман	редовни професор	Инжењерство материјала	ТМФ
2.	Др Јелена Бајат	редовни професор	Електрохемија	ТМФ
3.	Др Милош Момчиловић	научни саветник	Физичка хемија–спектроскопија	ИНН „Винча“
	Др Дејан Загорац	научни саветник	Теоријска хемија	ИНН „Винча“

Датум стављања извештаја Комисије и докторске дисертације на увид јавности 11. 2. 2025.

Наставно-научно веће факултета усвојило је извештај Комисије за оцену докторске дисертације на седници одржаној дана 20. 3. 2025.

Комисија за одбрану докторске дисертације именована је на седници одржаној **20. 3. 2025.**

одлуком факултета под бр. 35/59, у саставу:

	Име и презиме члана комисије	звање	научна област	Установа у којој је запослен
1.	Др Радмила Јанчић-Хајнеман	редовни професор	Инжењерство материјала	ТМФ
2.	Др Јелена Бајат	редовни професор	Електрохемија	ТМФ
3.	Др Милош Момчиловић	научни саветник	Физичка хемија–спектроскопија	ИНН „Винча“
4.	Др Дејан Загорац	научни саветник	Теоријска хемија	ИНН „Винча“

Напомена: уколико је члан Комисије у пензији навести датум пензионисања.

Студент је уписан на докторске студије школске 2017/2018. године.

Решењем декана бр. 20/167 од 02. 10. 2023. одобрен је продужетак рока за завршетак студија до истека троструког броја школских година потребних за реализацију уписаног студијског програма, односно до 30. 9. 2026.

ДЕКАНКА ФАКУЛТЕТА

др Мирјана Кијевчанин, редовни професор

-
- Прилози:**
1. Одлука Наставно-научног већа о усвајању извештаја Комисије за оцену докторске дисертације и одлука о именовању Комисије за одбрану докторске дисертације
 2. Извештај Комисије о оцени докторске дисертације
 3. Примедбе на извештај Комисије о оцени докторске дисертације (уколико их је било) и мишљење Комисије о примедбама

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



Република Србија
Универзитет у Београду
Технолошко-металуршки факултет

РЕПУБЛИКА СРБИЈА
УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
ТЕХНОЛОШКО-МЕТАЛУРШКИ ФАКУЛТЕТ

Бр. 20/167

02. 10. 2023 год.

БЕОГРАД

На основу члана 101. Статута Универзитета у Београду ("Гласник Универзитета у Београду бр. 201/2018") и члана 76. Статута Технолошко-металуршког факултета у Београду, као и захтева студента за продужење рока за завршетак студија Декан доноси

РЕШЕЊЕ

о продужењу рока за завршетак студија

Студенту **Слађана Лакетић**, број индекса 2017/4009, уписана у прву годину докторских академских студија школске 2017/2018 године продужава се рок за завршетак студија до истека троструког броја школских година потребних за реализацију уписаног студијског програма, односно до 30.09.2026 године.



Декан

Проф. др Петар Ускоковић

На основу чл. 40. став 3. Закона о високом образовању, чл. 112. став 3. Статута Универзитета у Београду, чл. 88. став 3. Статута ТМФ-а и чл. 41. Правилника о докторским студијама ТМФ, на седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета од 20. 3. 2025. године, донета је

О Д Л У К А

о прихватању Реферата о оцени докторске дисертације

Прихвата се Реферат Комисије у саставу: др Радмила Јанчић-Хајнеман, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет, др Јелена Бајат, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет, др Милош Момчиловић, научни саветник Универзитета у Београду, Институт за нуклеарне науке „Винча“, Институт од националног значаја за Републику Србију, др Дејан Загорац, научни саветник Универзитета у Београду, Институт за нуклеарне науке „Винча“, Институт од националног значаја за Републику Србију о прегледу и оцени урађене докторске дисертације под називом: **„Модификација структуре и својстава легуре титана са високим садржајем ниобијума за биомедицинску примену“** коју је поднела **Слађана Лакетић**, мастер инжењер технологије и упућује се на сагласност Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду. Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације Слађане Лакетић, под називом **„Модификација структуре и својстава легуре титана са високим садржајем ниобијума за биомедицинску примену“** Одлуком број: 61206-973/2-21 од 3. 3. 2021. године.

Верификација научних доприноса:

Категорија M21-1:

I. Laketić, S., Rakin, M., Momčilović, M., Ciganović, J., Veljović, Đ., Cvijović-Alagić, I., Influence of laser irradiation parameters on the ultrafine-grained Ti-45Nb alloy surface characteristics, - Surface and Coatings Technology, vol. 418, 127255, 2021 (IF=4,158) (ISSN: 0257-8972) DOI: 10.1016/j.surfcoat.2021.127255.

Категорија M22-1:

I. Laketić, S., Rakin, M., Momčilović, M., Ciganović, J., Veljović, Đ., Cvijović-Alagić, I., Surface modifications of biometallic CP-Ti and Ti-13Nb-13Zr alloy by picosecond Nd:YAG laser, - International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, vol. 28, no. 2, pp. 285-295, 2021 (IF=2,232) (ISSN: 0946-2171) DOI: 10.1007/s12613-020-2061-9

Категорија M23-1:

I. Laketić, S., Rakin, M., Čairović, A., Maksimović, V., Cvijović-Alagić, I., Laser surface modification of metallic implant materials, Srpski arhiv za celokupno lekarstvo (Serbian Archives of Medicine), vol. 147, no. 7-8, pp. 497-501, 2019 (IF=0,300) (ISSN: 0370-8179) DOI: 10.2298/SARH181126054L

Одлуку доставити: Већу научних области техничких наука Универзитета, ментору, Служби за наставно-студентске послове и Архиви факултета.

Д Е К А Н К А

Проф. др Мирјана Кијевчанин

На основу чл. 40. став 3. Закона о високом образовању, чл. 112. став 3. Статута Универзитета у Београду, чл. 88. став 3. Статута ТМФ-а и чл. 41. и 42. Правилника о докторским студијама ТМФ, на седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета од 20. 3. 2025. године, донета је

О Д Л У К А

о именовању Комисије за одбрану докторске дисертације

Именује се Комисија за одбрану докторске дисертације **Слађане Лакетић**, мастер инжењера технологије, са темом под називом **„Модификација структуре и својстава легуре титана са високим садржајем ниобијума за биомедицинску примену“**, у саставу:

1. Др Радмила Јанчић-Хајнеман, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет,
2. Др Јелена Бајат, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет,
3. Др Милош Момчиловић, научни саветник Универзитет у Београду, Институт за нуклеарне науке „Винча“, Институт од националног значаја за Републику Србију
4. Др Дејан Загорац, научни саветник Универзитет у Београду, Институт за нуклеарне науке „Винча“, Институт од националног значаја за Републику Србију

Одлуку доставити: Одлуку доставити: члановима Комисије, Универзитету у Београду, Служби за наставно-студентске послове и Архиви Факултета.

Д Е К А Н К А

Проф. др Мирјана Кијевчанин

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата **Слађане Р. Лакетић**

Одлуком бр. 35/332 од 26. 12. 2024. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Слађане Р. Лакетић, мастер инжењера технологије, под насловом

**„МОДИФИКАЦИЈА СТРУКТУРЕ И СВОЈСТАВА ЛЕГУРЕ ТИТАНА СА ВИСОКИМ
САДРЖАЈЕМ НИОБИЈУМА ЗА БИОМЕДИЦИНСКУ ПРИМЕНУ“**

После прегледа достављене Дисертације и других пратећих материјала и разговора са Кандидатом, Комисија је сачинила следећи

РЕФЕРАТ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

09. 12. 2020. - Кандидат Слађана Р. Лакетић, мастер инжењер технологије, је предложила Наставно-научном већу Технолошко металуршког факултета Универзитета у Београду тему докторске дисертације под називом „Модификација структуре и својстава легуре титана са високим садржајем ниобијума за биомедицинску примену“.

24. 12. 2020. - На седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду донета је Одлука бр. 35/382 о именовању Комисије за оцену подобности теме и кандидата Слађане Р. Лакетић, мастер инжењер технологије, за израду докторске дисертације под називом „Модификација структуре и својстава легуре титана са високим садржајем ниобијума за биомедицинску примену“.

24. 02. 2021. - На седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду донета је Одлука бр. 35/18 о прихватању Реферата Комисије за оцену подобности теме и кандидата и одобравању израде докторске дисертације кандидата Слађане Р. Лакетић, мастер инжењер технологије, под називом „Модификација структуре и својстава легуре титана са високим садржајем ниобијума за биомедицинску примену“, а за менторе ове докторске дисертације су именовани др Марко Ракин, редовни професор Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду и др Ивана Цвијовић-Алагић, научни саветник Института за нуклеарне науке „Винча“ Универзитета у Београду.

03. 03. 2021. - На седници Већа научних области техничких наука Универзитета у Београду дата је сагласност бр. 61206-973/2-21 на предлог теме докторске дисертације кандидата Слађане Р. Лакетић, мастер инжењер технологије, под називом „Модификација структуре и својстава легуре титана са високим садржајем ниобијума за биомедицинску примену“.

31. 08. 2023. - Кандидат Слађана Р. Лакетић, мастер инжењер технологије, је упутила Наставно-научном већу Технолошко металуршког факултета Универзитета у Београду молбу за промену ментора докторске дисертације под називом „Модификација структуре и својстава легуре титана са високим садржајем ниобијума за биомедицинску примену“ и као ментора предложила др Бојана Међо, ванредног професора Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду, с обзиром на то да је претходно именовани ментор проф. др Марко Ракин у међувремену преминуо.

21. 09. 2023. - На седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду донета је Одлука бр. 35/232 о прихватању молбе за промену ментора и уместо др Марка Ракина, уз др Ивану Цвијовић-Алагић, као ментор именован је проф. др Бојан Међо.

16. 10. 2023. - На седници Већа научних области техничких наука Универзитета у Београду дата је сагласност бр. 61206-3679/2-23 на предлог о промени ментора и одређивању проф. др Бојана Међа за ментора уместо проф. др Марка Ракина.

26. 12. 2024. - На седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду донета је Одлука бр. 35/332 о именовању Комисије за оцену докторске дисертације кандидата Слађане Р. Лакетић, мастер инжењер технологије, под називом „Модификација структуре и својстава легуре титана са високим садржајем ниобијума за биомедицинску примену“, у саставу: др Радмила Јанчић-Хајнеман, редовни професор Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду; др Јелена Бајат, редовни професор Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду; др Милош Момчиловић, научни саветник Института за нуклеарне науке „Винча“ Универзитета у Београду и др Дејан Загорац, научни саветник Института за нуклеарне науке „Винча“ Универзитета у Београду.

Кандидат Слађана Р. Лакетић, мастер инжењер технологије, је уписала докторске академске студије на Технолошко-металуршком факултету Универзитета у Београду, студијски програм Инжењерство материјала, школске 2017/2018. године.

02. 10. 2023. - Решењем бр. 20/167 продужен је рок за завршетак докторских студија кандидата Слађане Р. Лакетић до истека троструког броја школских година потребних за реализацију уписаног студијског програма, односно до 30. 09. 2026. године.

1.2. Научна област дисертације

Истраживања у оквиру ове докторске дисертације припадају научној области Технолошко инжењерство за коју је Технолошко-металуршки факултет Универзитета у Београду матична установа. Ужа научна област је Инжењерство материјала. За менторе ове докторске дисертације су именовани др Бојан Међо, ванредни професор Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду и др Ивана Цвијовић-Алагић, научни саветник Института за нуклеарне науке „Винча“ - Института од националног значаја за Републику Србију Универзитета у Београду, чија је компетенција за вођење докторске дисертације потврђена на основу искуства и објављених публикација из области којој дисертација припада.

Ментор др Бојан Међо, ванредни професор Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду је до сада из области Инжењерство материјала публиковао 40

радова у часописима, који су на SCI листи. Руководио је израдом 1 докторске дисертације и 6 мастер радова и био члан Комисија за оцену и одбрану 6 одбрањених докторских дисертација и 20 мастер радова, што говори о компетентности ментора да руководи израдом ове докторске дисертације.

Ментор др Ивана Цвијовић-Алагић, научни саветник Института за нуклеарне науке „Винча“ - Института од националног значаја за Републику Србију Универзитета у Београду је до сада из области Инжењерство материјала публиковала преко 70 радова у часописима са SCI листе. Учествовала је у изради великог броја докторских дисертација одбрањених на Универзитету у Београду и била члан Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације 4 одбрањене докторске дисертације, чиме је потврђена компетентност ментора да руководи израдом ове докторске дисертације.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Слађана Р. Лакетић је рођена 19. 10. 1993. године у Београду. Основну и средњу Архитектонско-техничку школу је завршила у Београду. Технолошко-металуршки факултет Универзитета у Београду, студијски програм Инжењерство материјала, је уписала 2012. године и дипломирала 2016. године одбраном дипломског рада „Микромеханичка својства композита на бази триетилен гликол диметакрилата (ТЕГДМА) и бисфенилгликол диметакрилата (БисГМА) за денталне адхезиве“ са оценом 10 пред Комисијом у саставу проф. др Радмила Јанчић-Хајнеман, ментор, и проф. др Весна Радојевић, уз просечну оцену 8,72 остварену током основних студија стекавши звање Дипломирани инжењер технологије материјала. Мастер студије је уписала 2016. године на истом факултету на студијском програму Инжењерство материјала и 2017. године стекла звање Мастер инжењер технологије материјала одбраном мастер рада „Физичкомеханичка својства композитног материјала на бази поли(метил-метакрилата) и Al_2O_3 “ са оценом 10 пред Комисијом у саставу проф. др Радмила Јанчић-Хајнеман, ментор, проф. др Весна Радојевић и проф. др Петар Ускоковић, уз остварену просечну оцену 9,88 током мастер студија. У октобру 2017. године Слађана Лакетић је уписала Докторске академске студије на студијском програму Инжењерство материјала Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду.

У мају 2018. године Слађана Лакетић, као студент докторских академских студија, постаје стипендиста Министарства просвете, науке и технолошког развоја (МПНТР) Републике Србије и прикључује се као стипендиста-докторанд Лабораторији за материјале Института за нуклеарне науке „Винча“ – Института од националног значаја за Републику Србију Универзитета у Београду (Институт „Винча“) у рад на пројекту из области основних истраживања под називом „Микромеханички критеријуми оштећења и лома“ (ев.бр. ОИ174004) под руководством и менторством проф. др Марка Ракина и менторством др Иване Цвијовић-Алагић, научног саветника. Током свог ангажовања у Институту „Винча“, осим ангажовања на реализацији научноистраживачког пројекта, Слађана Лакетић је као промотер науке учествовала и у реализацији радионица научно-популарне манифестације „Винчина отворена врата“. Од 2020. године учествује у раду на истраживачкој теми под називом „Истраживање, развој и модификација савремених металних биоматеријала“, која се у Институту „Винча“ реализује под руководством др Иване Цвијовић-Алагић, научног саветника, у оквиру Програма 1: Нови материјали и нано науке. Исте године као стипендиста-докторанд постаје члан научног тима Центра изузетних вредности „Центар за

синтезу, процесирање и карактеризацију материјала за примену у екстремним условима (SEXTREME LAB)“ Института „Винча“ Универзитета у Београду. Члан је Српског вакуумског друштва, Српског друштва за микроскопију и Клуба младих хемичара Србије.

Одлуком Научног већа Института „Винча“, на седници одржаној 20. 05. 2022. године, Слађана Лакетић је изабрана у истраживачко звање истраживач сарадник. Од септембра 2022. године је запослена у Институту „Винча“ у истраживачком звању истраживач сарадник на истраживачкој теми под називом „Истраживање, развој и модификација савремених металних биоматеријала“.

Слађана Лакетић је до сада као аутор или коаутор објавила 23 научне публикације, од чега 1 рад у међународном часопису изузетних вредности категорије M21a, 5 радова у врхунском међународном часопису категорије M21, 1 рад у истакнутом међународном часопису категорије M22, 1 рад у међународном часопису категорије M23 и 15 радова саопштених на научним конференцијама објављених у целини или у изводу категорија M33, M34 и M64.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација кандидата Слађане Лакетић, мастер инжењера технологије, под називом „Модификација структуре и својстава легуре титана са високим садржајем ниобијума за биомедицинску примену“ је написана на српском језику на 214 стране, од којих је 191 страна нумерисана, и садржи 86 слика, 27 табела и 352 литературна навода. Дисертација садржи поглавља Увод, Теоријски део, Експериментални део, Резултати и дискусија, Закључак, Литература и Биографија кандидата, као и прилоге са Изјавама о ауторству, истоветности штампане и електронске верзије докторског рада и о коришћењу, уз приложену Оцену извештаја о провери оригиналности докторске дисертације. Дисертација такође садржи и сажетак на српском и на енглеском језику. Наведена докторска дисертација по свом облику и садржају испуњава све прописе и стандарде, који се односе на докторске дисертације које се бране на Универзитету у Београду.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У *уводном делу* (поглавље 1) је указано на значај истраживања у научноистраживачкој области од интереса за реализацију докторске дисертације, уз јасно истицање предмета и циљева истраживања обухваћених докторском дисертацијом.

У оквиру *Теоријског дела* дисертације је дат детаљан преглед досадашњих истраживања предметне области кроз преглед и анализу доступне литературе изложен кроз пет поглавља (поглавља 2-6). У поглављу 2 под називом „*Метални биоматеријали у биомедицинском инжењерству*“ је дат прегледни осврт на групу металних материјала за биомедицинску примену са кратким описом историјског развоја ове групе материјала, захтева које метални биоматеријали требају да испуне како би безбедно и дугорочно функционисали након хируршке имплантације у тело пацијента, уз навођење њихових предности и недостатака и истицање специфичности њихове примене и неопходне

карактеристике, које ти материјали морају поседовати, као и очекиваних ефектата њихове примене. Такође, дат је посебан осврт на интеракције имплантних материјала у људском телу са акцентом на интеракције ћелија и ткива са металним биоматеријалима, уз наглашавање утицаја биолошке средине на механичка, корозиона и биокомпатибилна својства имплантираних металних материјала и могућности контролисања њихових својстава и функција. У поглављу 3 под називом „Материјали на бази титана за биомедицинску примену“ су, кроз преглед литературе, описана најзначајнија физичко-хемијска, механичка, корозиона и биокомпатибилна својства материјала на бази титана уз навођење области примене ове групе материјала. Поглавље 4 „Методe модификације структуре металних биоматеријала“ даје увид у различите процесе израде и накнадне прераде металних материјала, као и методе које се могу применити у циљу модификације њихових својстава. Детаљно су описане конвенционалне методе израде, као и савремене методе прераде металних материјала где се посебно издвајају процеси интензивне пластичне деформације (енг. Severe Plastic Deformation, SPD), којима је могуће постићи значајну модификацију структуре металних имплантних материјала, а тиме, последично, и модификацију њихових механичких, корозионих и биокомпатибилних својстава. Такође су приказани основни принципи прераде материјала поступком увијања под високим притиском (енг. High Pressure Torsion, HPT) уз навођење предности ове методе у односу на друге SPD поступке. Дат је детаљан преглед савремене научне литературе, којом се описује поступак превођења крупнозрних материјала на бази титана у ситнозрне, са посебним освртом на могућност индустријске примене ситнозрних металних материјала добијених савременим SPD поступцима. У оквиру поглавља 5, које носи назив „Методe модификације површинских својстава металних биоматеријала“, су прегледно наведене методе површинске модификације имплантних металних материјала, које се примењују за побољшање специфичних површинских карактеристика ових материјала за различите клиничке примене, са посебним освртом на ласерску модификацију површине којом се могу значајно побољшати хемијске карактеристике, морфологија и храпавост површине и на тај начин побољшати механичка и корозиона својства, биокомпатибилност и остеоинтеграционе карактеристике имплантних металних материјала. Такође, ово поглавље даје јасан увид у предности примене ласерског озрачивања површине металних биоматеријала са акцентом на физичко-хемијске ефекте интеракције ласерског зрака са металном површином уз дефинисање сложене међузависности поменутих ефеката и интензитета упадне енергије ласерског зрачења. Поглавље 6 под називом „Моделовање и предвиђање структуре материјала коришћењем метода *ab initio* и рударења база података“ даје детаљан преглед литературно доступних података, који се односе на моделовање и предвиђање структуре материјала уз наглашавање могућности, достигнућа, предности и недостатака различитих поступака предвиђања структуре материјала.

У делу дисертације, који се односи на експериментални поступак (поглавље 7) и који садржи 6 потпоглавља, су описани материјали коришћени приликом рада на реализацији докторске дисертације, а затим су детаљно описане и примењене интрументалне и теоријске методе испитивања и карактеризације материјала према редоследу истраживачког рада, уз навођење опреме и софтверских пакета, коришћених током научно-истраживачког рада и обраде резултата. Прво је описан материјал добијен применом конвенционалног поступка израде материјала, односно легура титана нове генерације Ti-45Nb (мас.%) добијена у крупнозрном стању. Затим је дат опис савременог HPT поступка накнадне обраде

материјала, којим је извршена модификација структуре и добијена ситнозрна Ti-45Nb легура. Даље је дат преглед поступка ласерске површинске модификације комерцијалних и материјала на бази титана нове генерације за примену у биомедицинском инжењерству, односно опис поступка површинске модификације комерцијално чистог титана степена чистоће 2 (енг. Commercially Pure Titanium, CP-Ti), легуре Ti-13Nb-13Zr (мас.%) и легуре Ti-45Nb, уз посебан осврт на поступак ласерског скенирања површине Ti-45Nb легуре. У наставку овог дела докторске дисертације је дат приказ микроструктурних испитивања, која су изведена у циљу карактеризације материјала коришћених током реализације истраживања обухваћених овом докторском дисертацијом, као и опис испитивања њихових хемијских, морфолошких и механичких површинских својстава са посебним освртом на испитивање макро- и микротврдоће Ti-45Nb легуре пре и након примене НРТ обраде у циљу одређивања степена хомогености структуре испитиване легуре након примене НРТ поступка. У оквиру експерименталног поступка је описана и метода наноиндентације, којом су одређена површинска механичка својства крупнозрне и ситнозрне Ti-45Nb легуре пре и након ласерске површинске модификације. Даље је дат опис корозионих испитивања, којима је подвргнута наведена легура, а која обухватају електрохемијска испитивања пре и након њене микроструктурне и површинске модификације. Тестови испитивања корозионих својстава, како Ti-45Nb легуре добијене конвенционалним поступцима израде пре и након њене површинске модификације, тако и Ti-45Nb легуре добијене савременим НРТ поступком пре и након њене површинске модификације, су изведени у природно аерисаном Рингеровом раствору на температури од 37°C у циљу симулирања физиолошких услова присутних у људском организму. Такође, дат је приказ спроведених тестова цитотоксичности и испитивања морфологије фибробластних ћелија у циљу одређивања степена биокомпатибилности Ti-45Nb легуре пре и након примене НРТ поступка прераде и ласерске површинске модификације. У последњем потпоглављу поглавља 7 описане су методе теоријског моделовања структуре и својстава Ti-45Nb легуре, које су у овој докторској дисертацији коришћене за предвиђање структурних својстава легуре у зависности од поступка његове израде и накнадне прераде, као и за предвиђање утицаја микроструктурних карактеристика и фазног састава легуре на њена механичка својства.

Сви резултати произашли из истраживања обухваћених докторском дисертацијом су уз одговарајућу детаљну анализу и дискусију систематизовани и представљени у поглављу *Резултати и дискусија* (поглавље 8) кроз 5 потпоглавља. У оквиру првог потпоглавља дефинисан је утицај примене НРТ поступка прераде на микроструктурна, механичка и корозиона својства Ti-45Nb легуре коришћењем експерименталних и теоријских метода истраживања. Микроструктурна карактеризација легуре, која је извршена применом метода електронске микроскопије и рендгеноструктурне анализе, је показала да примењени НРТ поступак доводи до промене облика и смањења величине зрна у двофазној микроструктури испитиване легуре, док је применом теоријских метода испитивања потврђено присуство две фазе у микроструктури испитиване легуре без обзира на примену НРТ поступка. Испитивањем микротврдоће материјала утврђено је да је НРТ обрадом постигнута добра хомогеност структуре легуре. Поред тога, испитивање утицаја НРТ поступка на механичка својства Ti-45Nb легуре је показало и да уситњавање микроконституената у структури легуре доводи до повећања вредности њене тврдоће, што је потврђено и теоријским истраживањима која су показала одлично слагање са експериментално добијеним резултатима. Такође, смањење величине зрна је значајно утицало и на побољшање корозионе постојаности Ti-

45Nb легуре с обзиром на то да су добијени резултати показали да се ситнозрна легура у симулираним физиолошким условима карактерише бољом корозионом отпорношћу у поређењу са крупнозрном легуром. У другом потпоглављу, које се односи на оптимизацију параметара ласерске модификације површине материјала, испитани су процеси који се јављају током интеракције ласерског зрака високог интензитета са површином материјала на бази титана, односно са површином CP-Ti, Ti-13Nb-13Zr легуре и савремене Ti-45Nb легуре од интереса. Анализа промене хемијског састава и морфолошких карактеристика модификованих површина материјала на бази титана омогућила је одређивање оптималних параметара ласерске површинске модификације, којом би се могла постићи израда квалитетнијих и дуготрајнијих чврстоткивних импланата. Остварени резултати су показали да је интеракцијом ласерског зрака и површине испитиваних материјала на бази титана дошло до хидродинамичких и оксидационих процеса, који су утицали на формирање површинских структура у облику кратера конусног пресека, гребена и очврслих капљица, периодичних и капиларних таласа на модификованим површинама испитиваних материјала, али и до стварање плазме испред површине материјала, који је био у интеракцији са ласерским зраком. Уочено је да је промена параметара ласерског озрачивања материјала, као што су енергија ласерског импулса, број акумулираних импулса и атмосфера у којој се врши озрачивање, приметно утиче на промену димензија резултујућих површинских оштећења, промену храпавости озрачене површине и запремине материјала избаченог процесом аблације. Све претходно наведене уочене површинске промене имају значајан утицај на процес хемијске модификације (оксидације) површине металног имплантног материјала током озрачивања, а самим тиме и на процес адхезије ћелија за метални имплантни материјал. Након одређивања оптималних параметара процеса ласерске модификације површина материјала на бази титана, ови параметри су коришћени како би се ласерским зрачењем модификовале целокупне површине узорака крупнозрне и ситнозрне Ti-45Nb легуре, а резултати испитивања на тај начин постигнутих ефеката су приказани и дискутовани у трећем потпоглављу поглавља 8. Наиме, у овом делу докторске дисертације су приказани резултати испитивања физичких ефеката насталих озрачивањем (скенирањем) целокупне површине узорака Ti-45Nb легуре где се јасно види да је примена ласерског зрачења високог интензитета изазвала значајније и израженије морфолошке промене на површини узорака ситнозрне легуре у односу на узорке крупнозрне легуре. У четвртном потпоглављу приказани су и дискутовани резултати испитања утицаја ласерског скенирања површина легуре на хемијске, морфолошке, структурне и механичке површинске карактеристике и корозиона својства како крупнозрне тако и ситнозрне Ti-45Nb легуре. Резултати испитивања површинских карактеристика крупнозрне и ситнозрне Ti-45Nb легуре након ласерског површинског скенирања показују да је примена веће енергије ласерског импулса током озрачивања омогућила интензивније загревање, топљење, очвршћавање, прерасподелу и аблацију материјала што је утицало на формирање израженијих површинских морфолошких промена, као и на повећање површинске храпавости Ti-45Nb легуре пре и након НРТ обраде. Интеракција легуре у крупнозрном и ситнозрном стању са ласерским зраком је током истраживања била праћена и појавом плазме, чије присуство спречава било какву површинску контаминацију материјала и самим тим представља повољан ефекат када је у питању њихова медицинска примена. Добијени резултати су указали и на појаву оксида на ласерски модификованој површини испитиване легуре, без обзира на то да ли је легура претходно била подвргнута НРТ обради, што може имати

повољне ефекте када су у питању биоинтеграциона својства имплантних материјала. Осим тога, резултати истраживања изведених у оквиру рада на изради ове докторске дисертације су показали да је са повећањем енергије озрачивања дошло до апсорпције веће количине енергије, што је условило појаву интензивније оксидације и повећање концентрације оксида на површини легуре, како у крупнозрном, тако и у ситнозрном стању. У наставку четвртог потпоглавља су приказани и дискутовани резултати добијени испитивањем површинских механичких својстава Ti-45Nb легуре у крупнозрном и ситнозрном стању пре и после површинске модификације применом експерименталних и теориских метода при чему је уочено да се применом накнадне обраде легуре комбинованим поступком интензивне пластичне деформације и ласерске површинске модификације постиже побољшање њених површинских механичких својстава, односно уочено је повећање површинске тврдоће материјала праћено донекле контролисаним повећањем модула еластичности уз смањење површинске пластичности легуре. Осим тога, приказани су и резултати моделовања на *ab initio* нивоу, којим је извршено теоријско испитивање механичких својстава Ti-45Nb легуре пре и након додатне ласерске површинске обраде, као и резултати упоредне анализе експериментално и теоријски добијених података који су указали на њихово одлично подударање. Поред тога, у четвртом потпоглављу поглавља 8 приказани су и детаљно дискутовани резултати испитивања корозионе постојаности Ti-45Nb легуре у симулираним физиолошким условима који су показали да након површинске модификације легуре долази до повећавања корозионе отпорности испитиване легуре без обзира на рафинисаност њене микроструктуре. Ипак, резултати електрохемијских испитивања показују да је отпорност према корозионом оштећењу легуре након додатне ласерске обраде значајно боља када је у питању легура у ситнозрном стању него у случају легуре у крупнозрном стању. Испитивања корозионе постојаности Ti-45Nb легуре, урађена током реализације ове докторске дисертације, показала су да је легура, независно од њене микроструктурне рафинације и стања површине, подложна пасивацији у присуству природно аерисаног Рингеровог раствора при чему се на њеној површини у датим условима образује двослојни оксидни филм добрих заштитних карактеристика. Међутим, уочено је да се након озрачивања површине легуре коришћењем веће излазне енергије ласерског зрака од 15 mJ образује мање постојани површински оксидни филм него у случају легуре која је подвргнута озрачивању при мањој енергији. Потпоглавље 5 даје преглед резултата испитивања ефеката ласерске модификације површинских својстава Ti-45Nb легуре у крупнозрном и ситнозрном стању на њене биокompatibilне карактеристике. Наиме, у потпоглављу пет поглавља 8 приказани су резултати спроведених тестова цитотоксичности, који су показали да Ti-45Nb легура добијена и конвенционалним поступком израде и применом НРТ поступка, како пре, тако и након додатне ласерске површинске обраде, не испољава цитотоксичне ефекте што указује на могућност безбедне примене Ti-45Nb легуре у људском организму. Добијене вредности ћелијске вијабилности и анализа морфологије фибробластних ћелија, које су се налазиле у контакту са испитиваном легуром, су јасно показале да је уситњавање (рафинација) структуре Ti-45Nb легуре применом НРТ обраде уз њену додатну површинску ласерску модификацију водила ка знатном побољшању биокompatibilних карактеристика испитиване легуре.

У поглављу *Закључци* (поглавље 9) је дат кратак, али свеобухватан, преглед добијених резултата, истакнута су основна сазнања до којих се дошло током израде докторске дисертације и наведени су најважнији закључци изведених истраживања уз наглашавање

иновативности и значаја примене додатног поступка прераде легуре на бази титана новије генерације којим би се осигурала истовремена модификација и структурних и површинских карактеристика легуре како би се омогућила израда дуготрајнијих чврстоткивних медицинских импланата.

У поглављу *Литература* (поглавље 10) наведен је списак свих литературних извора, који су коришћени током израде докторске дисертације.

На крају дисертације приложена је кратка биографија кандидата, прилози са Изјавом о ауторству, Изјавом о истовестности штампане и електронске верзије докторског рада и Изјавом о коришћењу, уз Оцену извештаја о провери оригиналности докторске дисертације, потписану од стране ментора.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Докторска дисертација кандидата Слађане Р. Лакетић за предмет има савремену тему истраживања могућности успешне модификације структуре и својстава легуре Ti-Nb система применом савремених метода прераде металних материјала и површинске модификације како би се омогућила израда имплантног материјала побољшане биомеханичке компатибилности и остеоинтеграционих својстава.

У циљу побољшања отпорности импланата хируршким путем уграђених у тело пацијента према оштећењу до којег може доћи услед дејства значајних механичких напрезања у корозионој средини при додиру са живим ткивима, у оквиру рада на реализацији докторске дисертације вршена су истраживања у два правца. Први правац представља истраживања у циљу испитивања могућности побољшања својстава металног имплантног материјала нове генерације модификацијом његове структуре, док је други правац истраживања био усмерен на могућност побољшања постојаности и биокомпатибилности овог материјала у физиолошким условима модификацијом његових површинских карактеристика.

У последње време у средишту пажње су SPD процеси, као савремене методе којима је могуће постићи значајну модификацију структуре металних имплантних материјала, а тиме, последично, и модификацију њихових биокомпатибилних, механичких и трибо-корозионих својстава. Примена SPD процеса прераде води ка изради ситнозрног металног материјала, чиме се омогућава значајно побољшање својстава од изузетног значаја за израду квалитетнијих, дуготрајнијих и постојанијих чврстих биомедицинских уређаја и помагала. Иако је у литератури показано да примена савремених SPD поступака код материјала на бази титана доводи до значајног побољшања механичких, корозионих и биолошких карактеристика, питања у вези ефеката који ће имплантирани материјали показати при сложеним биомеханичким условима, њихове корозионе постојаности у агресивним условима које представља људски организам, као и питања у вези њихове биокомпатибилности остају отворена.

С друге стране, стање и квалитет површине металног имплантног материјала има изузетно важну улогу у реакцији и одговору биолошког система према медицинским уређајима са којима су у контакту. Када су у питању чврсти метални импланти, стандардне методе које се примењују за њихову производњу обично доводе до појаве оксидисаног, контаминираног површинског слоја који је већ током самог процеса израде импланта често изложен напрезањима и пластичној деформацији. Такве површине нису прикладне за

биомедицинску примену па се морају подвргнути накнадној површинској обради и модификацији. Додатни разлог, због којег је неопходно извршити површинску модификацију металних уређаја за биомедицинску примену, је потреба за постизањем специфичних површинских карактеристика имплантата како би се поспешео позитиван одговор живог организма и постигла добра биолошка интеракција живих ћелија и ткива са металном површином имплантата. У последњој деценији различити површински третмани се примењују у циљу побољшања површинских карактеристика металних имплантних материјала. Ласерска површинска модификација се издваја од осталих метода површинске модификације као савремена техника којом се могу значајно побољшати хемијске карактеристике, морфологија и храпавост површине и на тај начин побољшати трибо-корозиона својства, биокомпатибилност и остеоинтеграционе карактеристике имплантата. Овом бесконтактном техником модификације избегава се могућност контаминације површине имплантата током његове модификације што је додатна предност ове методе када је њена биомедицинска примена у питању. Осим тога, интеракција ласерског зрака са металном површином је често праћена и појавом плазме, чиме је омогућена додатна стерилизација површине имплантата и тако избегнути захтеви за додатним површинским третманима имплантата пре хируршке интервенције. Међутим, корозиона оштећења, биокомпатибилност и површинска механичка својства материјала на бази титана, који су подвргнути ласерском површинском третману, остају још увек недовољно испитани, поготово када је реч о ситнозрним материјалима на бази титана.

Оригиналност докторске дисертације Слађане Р. Лакетић огледа се, пре свега, у дефинисању оптималних процесних параметара ласерске површинске модификације легуре у крупнозрном и ситнозрном стању, односно пре и након НРТ прераде, чиме би се унапредила отпорност према оштећењу савремених имплантних уређаја у условима присутним у људском организму, са посебним акцентом на компаративну анализу Ti-Nb легуре крупнозрне и ситнозрне микроструктуре пре и након ласерског третмана. У оквиру ове докторске дисертације је по први пут на систематичан начин приступљено решавању проблема могућег побољшања биокомпатибилности и понашања у корозионој средини легуре на бази титана новије генерације изменом њене структуре и својстава применом савремених метода пластичног деформисања и површинске модификације уз посебан осврт на одређивање сложене међузависности параметара израде и прераде металних материјала на њихова, пре свега, микроструктурна својства, а самим тиме и на друге карактеристике ових материјала. Велики допринос докторске дисертације се огледа у развоју и примени комбинације НРТ поступка и ласерске површинске модификације, којима се добијају нови имплантни материјали адекватних површинских, механичких, корозионих и биолошких својстава, што представља изузетан напредак у развоју металних биоматеријала. Резултати ове докторске дисертације дају смернице за будућа истраживања биокомпатибилних материјала на бази титана са циљем израде постојанијих и дуготрајнијих металних имплантних материјала погодних за примену у различитим биомедицинским областима.

На основу опсежног прегледа литературе се може закључити да су истраживања приказана у оквиру ове докторске дисертације оригинална, као и да се уклапају у савремене светске трендове, што указује на значај и актуелност проучавање проблематике.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У оквиру докторске дисертације цитирана су 352 литературна навода. У питању су научни радови релевантни за испитивану проблематику, који су у највећој мери објављени у међународним часописима и новијег су датума. Током израде докторске дисертације,

кандидаткиња је извршила опсежан преглед литературе у области датог истраживања, односно литературе објављене из области металних материјала за биомедицинске примене, са посебним акцентом на легуре на бази титана новије генерације. Наиме, детаљан преглед литературе је био усмерен ка области развоја легура титана са високим садржајем ниобијума, као и на савремене методе прераде металних материјала и површинске модификације, које се могу користити са циљем модификације структуре и својстава металних материјала на бази титана у циљу побољшања њихове биомеханичке компатибилности и остеоинтеграционих својстава. У оквиру литературних навода, приказаних у овој докторској дисертацији, се налазе и публикације кандидата Слађане Р. Лакетић, мастер инжењера технологије, проистекле из рада на изради ове докторске дисертације. На основу детаљне анализе резултата приказаних у стручној и научној литератури, изложене су полазне хипотезе и основне смернице за истраживања извршена у овој докторској дисертацији, а преглед литературе послужио је као основа за планирање експеримената, као и за обраду и дискусију добијених резултата у контексту актуелних светских трендова и релевантних истраживања изведених у последњих неколико година.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Сви резултати у оквиру ове дисертације су доказани одговарајућим експериментима, савременим теоријским методама, као и савременим аналитичким инструменталним мерењима према оригиналним или модификованим методама из литературе.

За потребе испитивања у оквиру ове докторске дисертације је коришћена легура титана са високим садржајем ниобијума новије генерације, односно легура Ti-45Nb (мас.%). Легура Ti-45Nb је испитана у стању након конвенционалног начина израде, као и након примене SPD поступка, односно НРТ поступка као поступка накнадне прераде којим је могуће изградити ситнозрни метални материјал. Микроструктурна карактеризација испитиване легуре у крупнозрном стању добијене конвенционалним начином израде и у ситнозрном стању добијене применом савременог НРТ поступка прераде је извршена коришћењем метода скенирајуће електронске микроскопије (енг. Scanning electron microscopy, SEM), електронске дифракције (енг. Electron Backscatter Diffraction, EBSD), трансмисионе електронске микроскопије (енг. Transmission Electron Microscopy, TEM) и рендгеноструктурне анализе (енг. x-ray diffraction, XRD). Детаљна карактеризација микроструктуре и фазног састава савремене Ti-45Nb легуре у крупнозрном и ситнозрном стању, односно пре и након НРТ обраде, урађена је и теоријским моделовањем на *ab initio* нивоу како би се у потпуности истражио Ti-45Nb систем, након чега је урађена и упоредна анализа резултата теоријског предвиђања структуре и резултата добијених експерименталним методама EBSD, TEM и XRD. Како би се утврдила хомогеност структуре Ti-45Nb легуре подвргнуте НРТ обради, испитана је микротврдоћа легуре у ситнозрном стању, уз анализу профила микротврдоће дуж пречника узорака припремљених у облику диска. Осим тога, испитан је и утицај микроструктурних карактеристика легуре пре и након НРТ прераде на механичка својства испитиване легуре где је у првом реду одређен утицај величине микроструктурних конституената на тврдоћу, површински модул еластичности и пластичност легуре одређивањем тврдоће по методи Vickers-а и применом методе наноиндентације. Такође, теоријским моделовањем на *ab initio* нивоу предвиђен је утицај микроструктурних карактеристика и фазног састава легуре на механичка својства материјала, након чега је урађена и упоредна анализа експериментално и теоријски добијених резултата са циљем валидације теоријског предвиђања својстава легуре.

С обзиром на то да је примена металних материјала у биомедицинском инжењерству ограничена не само механичким својствима материјала већ и његовом корозионом постојаношћу, урађено је и испитивање отпорности према корозији Ti-45Nb легуре пре и након НРТ прераде, како би се одредио утицај микроструктурних карактеристика легуре на њену корозиону постојаност. У ту сврху урађена су електрохемијска испитивања у условима који симулирају услове присутне у људском организму применом потенциодинамичке методе и методе спектроскопије електрохемијске импеданције (енг. Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS) на температури од 37°C у присуству Рингер-овог раствора, који симулира телесне течности људског организма. Током ових испитивања одређени су електрохемијски параметри, природа и карактеристике површинских слојева образованих током излагања легуре у крупнозрном и ситнозрном стању корозионом деловању.

Модификација микроструктурних карактеристика испитиване легуре превођењем крупнозрне легуре применом НРТ обраде у легуру ситнозрне структуре очекивано условљава и модификацију њених својстава; стога је у оквиру истраживања обухваћених овом докторском дисертацијом испитан и утицај НРТ обраде легуре на њену биокомпатибилност и цитотоксичност *in vitro* методама, применом теста одбацивања боје (енг. Dye Exclusion Test, DET) и колориметријског теста са тетразолијум солима (енг. MTT test) коришћењем ћелијских култура хуманих фибробласта плућа (MRC-5) у течном медијуму. Морфолошке и адхезионе карактеристике ћелија, које су се налазиле у контакту са површином Ti-45Nb легуре у крупнозрном и ситнозрном стању, су испитане применом SEM анализе.

У оквиру испитивања утицаја параметара површинске модификације Ti-45Nb легуре на њена својства примењена је метода ласерске површинске модификације поменуте легуре у стању пре и након њене НРТ прераде. У ту сврху површина крупнозрне и ситнозрне Ti-45Nb легуре је подвргнута ласерској модификацији коришћењем пикосекундног Nd:YAG ласера. Истраживања су обухватала испитивање утицаја параметара ласерског зрачења и услова у којима се врши озрачивање (гасне атмосфере, времена озрачивања и енергије ласерског импулса) на хемијске и морфолошке карактеристике површине легуре, а самим тим и на њена механичка, корозиона, биокомпатибилна и цитотоксична својства. У првом реду истраживања, која се односе на ласерску површинску модификацију, су била усмерена на одређивање оптималних параметара ласерске модификације, која би водила ка побољшању својстава легуре од интереса за њену биомедицинску примену, проучавање процеса до којих долази током интеракције ласерског зрака високог интензитета са површином, како савремене Ti-45Nb легуре, тако и других материјала на бази титана (CP-Ti и Ti-13Nb-13Zr (мас.%) легуре). Одређивање оптималних параметара ласерске модификације површине материјала на бази титана је обухватило испитивања промене хемијског састава ласерски модификованих површина применом методе енергетско дисперзивне спектроскопије (енг. Energy Dispersive Spectroscopy, EDS), као и испитивање морфолошких карактеристика ласерски модификованих површина коришћењем методе светлосне микроскопије (енг. Light Optical Microscopy, LOM), SEM анализе и методе бесконтактне оптичке профилометрије у зависности од примењених параметара ласерског зрачења. Након одређивања оптималних параметара ласерске модификације површина материјала на бази титана, ови параметри су коришћени како би се ласерским зрачењем модификовале целокупне површине узорака крупнозрне и ситнозрне Ti-45Nb легуре од интереса и испитао утицај овако модификованих површина на механичка, корозиона, биокомпатибилна и цитотоксична својства легуре. Испитивања механичких својстава легуре подвргнуте ласерској површинској модификацији су урађена одређивањем тврдоће, површинског модула еластичности и пластичности легуре применом методе наноиндентације и одређивањем

тврдоће по методи Vickers-a, док је корозиона постојаност легуре подвргнуте ласерској површинској модификацији у условима који симулирају услове присутне у људском организму испитана коришћењем потенциодинамичке и SEI методе. Биокompatibilност и цитотоксичност су испитане применом DET и MTT тестова у присуству MRC-5 ћелијских линија у течном медијуму, уз пратећу SEM анализу морфолошких и адхезионих карактеристика ћелија у контакту са ласерски модификованим површинама легуре.

Истраживања обухваћена овом докторском дисертацијом су заокружена упоредном анализом постигнутих резултата и утврђивањем утицаја модификације структуре Ti-45Nb легуре применом НРТ прераде и површинских карактеристика легуре применом ласерског зрачења на њена механичка, корозиона, биокompatibilна и цитотоксична својства како би издвојени услови модификације структуре и својстава легуре на бази титана новије генерације допринели изради дуготрајнијих и постојанијих чврстоткивних медицинских импланата.

3.4. Применљивост остварених резултата

На основу увида у до сада објављене резултате истраживања, као и резултате приказане у оквиру ове докторске дисертације, се може закључити да је кроз реализацију истраживања у оквиру ове докторске дисертације остварен значајан научни допринос у области развоја савремених биокompatibilних материјала на бази титана и модификације њихове структуре и својстава применом савремених метода прераде металних материјала и површинске модификације. Јасно дефинисање понашања материјала на бази титана, који су подвргнути ласерској површинској модификацији, у условима који симулирају услове у људском организму није у довољној мери заступљено у литератури. Детаљно познавање утицаја површинске модификације на површинске карактеристике, механичка својства, корозиону стабилност и биокompatibilност омогућава предвиђање понашања ових материјала у контакту са ћелијама и ткивима у људском организму. У дисертацији су дефинисани услови модификације структуре и својстава легуре, који би допринели изради дуготрајнијих и постојанијих чврстоткивних медицинских импланата и тиме побољшању квалитета живота пацијентима. Наиме, добијени резултати доприносе проширењу фундаменталних сазнања у оквиру дате проблематике. Поред наведеног, повезивање експериментално добијених резултата са теоријским прорачунима допринело је бољем увиду у међузависност параметара израде и прераде металних материјала и њиховог утицаја на пре свега микроструктурна својства, а самим тиме и на друге карактеристике ових материјала, што даље олакшава процес развоја и дизајна нових материјала на бази титана за биомедицинску примену.

Резултати добијени током истраживања обухваћених овом докторском дисертацијом су верификовани објављивањем радова у часописима међународног значаја, као и презентовањем на међународним и националним научним скуповима.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

На основу досадашњег ангажовања у научноистраживачком раду, реализованих научноистраживачких активности и публикованих резултата, који су проистекли из рада кандидата Слађане Р. Лакетић, мастер инжењера технологије, у научноистраживачкој области од интереса, закључује се да је кандидаткиња показала стручност, способност, систематичност, самосталност и креативност у претраживању и коришћењу научне литературе, планирању и реализацији експеримената, обради и анализи добијених података,

дискусији резултата и припреми публикација. Комисија је на основу досадашњег залагања и постигнутих резултата, као и на основу поднете докторске дисертације, утврдила да кандидат поседује све квалитете неопходне за самостални научноистраживачки рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Научни допринос предложене докторске дисертације огледа се, пре свега, у утврђивању могућности побољшања отпорности према оштећењу савремених металних медицинских импланата коришћењем легуре титана новије генерације за њихову израду, али и применом савремених метода модификације њихове структуре и својстава, којима би се унапредила постојаност и карактеристике, како већ комерцијалних имплантних материјала, тако и савремених материјала који још увек немају комерцијалну примену.

Резултати истраживања, остварени током израде докторске дисертације кандидата Слађане Р. Лакетић под називом „Модификација структуре и својстава легуре титана са високим садржајем ниобијума за биомедицинску примену“, довели су до вишеструких значајних научних доприноса:

- дефинисан је утицај НРТ поступка прераде материјала на микроструктурне карактеристике Ti-45Nb легуре β типа;
- успешно је извршено теоријско предвиђање структуре и фазног састава Ti-45Nb легуре моделовањем на *ab initio* нивоу у зависности од примене НРТ поступка прераде материјала и предвиђање утицаја НРТ поступка прераде на механичка својства легуре, чиме би се могло значајно утицати на постизање економичнијег поступка развоја и израде савремених металних имплантних материјала кроз смањену примену експерименталних метода;
- одређени су утицаји микроструктурних параметара Ti-45Nb легуре на њене електрохемијске карактеристике и отпорност према корозионом оштећењу у условима који симулирају услове присутне у људском организму;
- утврђени су утицаји микроструктурних параметара Ti-45Nb легуре на њену биокомпатибилност и цитотоксичност применом *in vitro* тестова како би се омогућила процена безбедне употребе крупнозрне и ситнозрне Ti-45Nb легуре у имплантологији;
- дефинисани су утицаји параметара ласерске површинске модификације материјала на бази титана на биокомпатибилност и корозиону постојаност материјала у условима који симулирају услове присутне у људском организму и
- одређени су оптимални услови ласерске модификације Ti-45Nb легуре у стању пре и након модификације њене структуре применом НРТ поступка, који су обезбедили формирање површине специфичних хемијских и морфолошких карактеристика погодних за постизање побољшаних биокомпатибилних и корозионих својстава.

Истраживања, која су обухваћена овом докторском дисертацијом, су допринела одређивању утицаја параметара модификације структуре и својстава Ti-Nb легуре на њена биокомпатибилна, механичка и корозиона својства у захтевним условима присутним у људском организму, како би се одредиле оптималне микроструктурне и површинске карактеристике овог материјала, које би водиле изради постојанијих и дуготрајнијих импланата погодних за примену у различитим биомедицинским областима.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Метални биоматеријали се већ деценијама са успехом користе у биомедицини за израду чврстих импланата у циљу замене одређеног дела или функције људског организма. Њихова примена у биомедицинском инжењерству је широко распрострањена и обухвата како ортопедску и денталну хирургију, тако и кардиоваскуларну хирургију и оториноларингологију. Развој нових металних биоматеријала је усклађен са специфичним захтевима, које носи њихова примена и њихово несметано функционисање у захтевним условима присутним у људском организму, при чему се највише пажње посвећује отпорности ових материјала према оштећењима до којих може доћи услед присуства значајних механичких оптерећења, корозивне средине и интеракције импланата са живим ћелијама и ткивима. Оштећења импланата могу значајно нарушити здравље пацијента, с обзиром на то да могу узроковати како лом импланта услед оштећења материјала и немогућности да издрже механичка оптерећења, тако и ослобађање делова имплантног материјала у околна жива ткива услед појаве њихове корозионе или триболошке деградације. Из тог разлога се истраживања у овој области усмеравају на израду нових материјала, који су постојани у захтевним биомеханичким условима, али и на модификацију својстава како комерцијалних тако и савремених имплантних материјала и оптимизацију структуре, својстава и површинских карактеристика ових материјала.

Истраживања обухваћена овом докторском дисертацијом конципирана су на основу јасно дефинисаних циљева и претходне детаљне анализе литературе релевантне за област истраживања. Прегледом доступне литературе и упознавањем са структуром и својствима материјала на бази титана, као и детаљном анализом тренутног стања у научној области, стекли су се услови за пројектовање састава, технологије израде, као и параметара накнадне прераде металног материјала за примену у биоинжењерству. Истраживања су обухватила израду/прераду имплантног материјала на бази титана новије генерације, његову микроструктурну карактеризацију, теоријско моделовање структуре и фазног састава материјала на *ab initio* нивоу, експериментално и теоријско испитивање механичких својстава, испитивање отпорности према корозији и електрохемијског понашања материјала, модификацију материјала применом савременог поступка интензивног пластичног деформисања (увијање под високим притиском) и површинске ласерске модификације, као и испитивања цитотоксичности и биокомпатибилности Ti-45Nb легуре у макро- и наночестичном стању пре и након ласерске површинске модификације легуре у циљу развоја савремених металних имплантних материјала са побољшаном корозионом стабилношћу, биокомпатибилношћу и механичким својствима. Методе примењене у изради докторске дисертације су у складу са савременим научним методама и показују мултидисциплинарни приступ истраживању. Новија истраживања су показала да поред оптимизације параметара конвенционалних поступака израде и прераде имплантних материјала постоји могућност даљег побољшања својстава легура титана увођењем нових метода накнадне прераде применом методе пластичног деформисања и површинске модификације и из тог разлога је у докторској дисертацији легура титана са високим садржајем ниобијума крупнозрне микроструктуре подвргнута савременом НРТ поступку обраде и ласерској површинској модификацији. Резултати проистекли из ове докторске дисертације пружају значајне информације о могућности израде медицинских имплантних легура, које не садрже потенцијално цитотоксичне елементе, побољшаних својстава и продуженог животног циклуса, код којих је могућност нежељених ефеката изазваних након хируршке интервенције сведена на најмању могућу меру одабиром материјала оптималног хемијског састава, као и оптималних микроструктурних, механичких, корозионих и површинских карактеристика.

Осим тога, примењујући једноставне и лако доступне методе модификације структуре и својстава имплантних материјала могућа је израда дуготрајнијих импланата ниже цене коштања, који би били доступнији већем броју пацијената. Својства материјала на бази титана, као најзаступљенијих металних имплантних материјала данашњице, су побољшана применом пажљиво одабраних параметара њихове израде, накнадне прераде и модификације. Такође, утицај микроструктурних карактеристика легура на бази титана на њихову биокомпатибилност и отпорност према оштећењу је од пресудног значаја за побољшање биоинтеграционих својстава ове групе имплантних материјала и продужења њиховог радног века у захтевном радном окружењу, које карактеришу корозиона средина и значајна механичка оптерећења. Микроструктурном карактеризацијом је утврђено да примена НРТ поступка доводи до израде ситнозрног имплантног материјала са величином микроструктурних конституената на нанометарском нивоу. Детаљном карактеризацијом је потврђено да се применом моделовања на *ab initio* нивоу може предвидети развој микроструктуре и фазног састава легуре титана, као и утицај уситњавања микроструктурних конституената на својства испитиваног материјала, чиме је могуће обезбедити једноставније и економичније одређивање оптималних услова израде и прераде легура уз предвиђање понашања материјала у захтевним радним условима присутним у људском организму. Поред тога, остварени резултати су показали да је примена ласерске модификације површине у великој мери утицала на механичка својства, биокомпатибилност, остеоинтеграционе карактеристике и корозиону постојаност легуре титана са високим садржајем ниобијума, с обзиром на то да су овом методом остварене значајне промене у морфолошким и хемијским карактеристикама површинских слојева испитиваног имплантног материјала. Управо због тога, главни циљ докторске дисертације јесте био да се сагледају механичке карактеристике, биокомпатибилност и корозиона постојаност материјала на бази титана добијених конвенционалним и савременим поступцима израде, подвргнутих ласерској површинској модификацији, као и развој нове серије имплантних материјала на бази титана побољшане биомеханичке компатибилности и остеоинтеграционих својстава чиме би се обезбедило функционисање импланата у људском организму без појаве штетних ефеката, продужење радног века импланта и побољшање квалитета живота пацијената.

Увидом у доступну литературу и резултате истраживања добијене у овој докторској дисертацији се може установити да су остварени резултати значајни са научног аспекта, да дају јасан допринос примени на овај начин модификованих материјала на бази титана у медицини, као и да представљају помак ка даљем развоју и потенцијалној примени нових материјала оптималних својстава у имплантологији. На овај начин је обезбеђена добра основа за истраживање примене ових материјала у *in vivo* условима.

4.3. Верификација научних доприноса

Кандидат Слађана Р. Лакетић је резултате истраживања добијене у току израде ове докторске дисертације потврдила објављивањем радова у часописима међународног значаја и саопштавањем радова на међународним и националним скуповима. Резултати досадашњег научноистраживачког рада кандидата у овој области приказани су у 8 (осам) радова објављених у часописима међународног значаја (ознака групе М20: врста резултата М21а-1 рад; М21-5 радова; М22-1 рад; М23-1 рад), 12 (дванаест) радова објављених у зборницима скупова међународног значаја штампаних у целини и изводу (ознака групе М30: врста резултата М33-2 рада; М34-10 радова) и 3 (три) рада објављена у зборницима скупова националног значаја штампана у изводу (ознака групе М60: врста резултата М64-3 рада).

Списак радова који квалификују кандидата за одбрану докторске дисертације:

M21 - Врхунски међународни часопис:

M21-1. **Laketić, S.**, Rakin, M., Momčilović, M., Ciganović, J., Veljović, Đ., Cvijović-Alagić, I., Influence of laser irradiation parameters on the ultrafine-grained Ti-45Nb alloy surface characteristics, - *Surface and Coatings Technology*, vol. 418, 127255, 2021 (**IF=4,158**) (ISSN: 0257-8972) DOI: 10.1016/j.surfcoat.2021.127255

M22 - Истакнути међународни часопис:

M22-1. **Laketić, S.**, Rakin, M., Momčilović, M., Ciganović, J., Veljović, Đ., Cvijović-Alagić, I., Surface modifications of biometallic CP-Ti and Ti-13Nb-13Zr alloy by picosecond Nd:YAG laser, - *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, vol. 28, no. 2, pp. 285-295, 2021 (**IF=2,232**) (ISSN: 0946-2171) DOI: 10.1007/s12613-020-2061-9

M23 - Рад у међународном часопису:

M23-1. **Laketić, S.**, Rakin, M., Čairović, A., Maksimović, V., Cvijović-Alagić, I., Laser surface modification of metallic implant materials, *Srpski arhiv za celokupno lekarstvo (Serbian Archives of Medicine)*, vol. 147, no. 7-8, pp. 497-501, 2019 (**IF=0,300**) (ISSN: 0370-8179) DOI: 10.2298/SARH181126054L

M33 - Саопштење са међународног скупа штампано у целини:

M33-1. **Laketić, S.**, Rakin, M., Momčilović, M., Ciganović, J., Veljović, Đ., Cvijović-Alagić, I.: „Interaction of picosecond Nd:YAG laser irradiation with Ti-13Nb-13Zr alloy surface in air and argon atmosphere”, - *Proceedings of 14th Multinational Congress on Microscopy (MCM2019)*, Belgrade, Serbia, 2019., pp. 354-356.

M33-2. **Laketić, S.**, Međo, B., Momčilović, M., Bajat, J., Veljović, Đ., Kojić, V., Cvijović-Alagić, I.: „Improvement of the β -Ti alloy properties in bio-environment”, - *Proceedings of XXV YuCorr*, Divčibare mountain, Serbia, 2024., pp. 158-166.

5. ПРОВЕРА ОРИГИНАЛНОСТИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

На основу Правилника о поступку провере оригиналности докторских дисертација, које се бране на Универзитету у Београду, коришћењем програма iThenticate извршена је провера оригиналности докторске дисертације кандидаткиње Слађане Р. Лакетић, мастер инжењера технологије, под називом „Модификација структуре и својстава легуре титана са високим садржајем ниобијума за биомедицинску примену”. Извештај, који садржи резултате провере оригиналности, ментори су добили дана 26. 12. 2024. Утврђени проценат подударности је 2%. Неки од узрока подударања делова текста докторске дисертације са изворима из литературе су навођење назива примењених метода истраживања, физичких величина, установа у којима су запослени чланови Комисије и др. У тексту докторске дисертације постоје и подударања са општим местима из литературе, као и са радовима у којима су објављени резултати докторандовог истраживања, који су проистекли из рада на изради докторске дисертације. На основу свега изнетог, а у складу са чланом 8 став 2 Правилника о поступку провере оригиналности докторских дисертација које се бране на

Универзитету у Београду, изјављујемо да извештај указује на оригиналност докторске дисертације, те да се прописани поступак припреме за њену одбрану може наставити (позитивна оцена).

6. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу свега наведеног Комисија сматра да докторска дисертација кандидата Слађане Р. Лакетић, мастер инжењера технологије, под насловом „Модификација структуре и својстава легуре титана са високим садржајем ниобијума за биомедицинску примену“ представља значајан и оригиналан научни допринос у области Инжењерства материјала, што је и потврђено кроз објављивање радова у часописима међународног значаја и зборницима скупова националног и међународног значаја. Предмет и циљеви, који су постављени, су јасно наведени и у потпуности остварени. Комисија је мишљења да докторска дисертација под називом „Модификација структуре и својстава легуре титана са високим садржајем ниобијума за биомедицинску примену“ у потпуности испуњава све захтеване критеријуме, као и да је кандидат током израде дисертације показао изузетну научноистраживачку способност у свим фазама израде ове дисертације.

Имајући у виду квалитет, обим и научни допринос постигнутих и приказаних резултата, Комисија предлаже Наставно-научном већу Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду, да прихвати овај Реферат и да га заједно са поднетом дисертацијом Слађане Р. Лакетић, мастер инжењера технологије, под називом „Модификација структуре и својстава легуре титана са високим садржајем ниобијума за биомедицинску примену“ пружи на увид јавности у законом предвиђеном року и упуту на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду, као и да након завршетка процедуре позове кандидата на усмену одбрану дисертације пред Комисијом у истом саставу.

У Београду, 21. јануар 2025. године

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

.....
Др Радмила Јанчић-Хајнеман, редовни професор
Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет

.....
Др Јелена Бајат, редовни професор
Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет

.....
Др Милош Момчиловић, научни саветник
Универзитет у Београду, Институт за нуклеарне науке „Винча“
– Институт од националног значаја за Републику Србију

.....
Др Дејан Загорац, научни саветник
Универзитет у Београду, Институт за нуклеарне науке „Винча“
– Институт од националног значаја за Републику Србију