

ТЕХНОЛОШКО-МЕТАЛУРШКИ
ФАКУЛТЕТ
35/31
(Број захтева)

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
ВЕЋЕ НАУЧНИХ ОБЛАСТИ ТЕХНИЧКИХ НАУКА
(Назив већа научне области и коме се захтев упућује)

14.02.2019.
(Датум)

ЗАХТЕВ

за давање сагласности на предлог теме докторске дисертације

Молимо да, сходно члану 47. ст. 5. тач. 3. Статута Универзитета у Београду („Гласник Универзитета“, број 131/06), дате сагласност на предлог теме докторске дисертације:

„Површинска наноструктурна модификација и карактеризација материјала на бази титана за примену у медицини“
(пун назив предложене теме докторске дисертације)

НАУЧНА ОБЛАСТ: ТЕХНОЛОШКО ИНЖЕЊЕРСТВО

ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ:

1. Име, име једног од родитеља и презиме кандидата:

ДРАГАНА (Ранко) БАЊАКТАРЕВИЋ, мастер инжењер технологије

2. Назив и седиште факултета на коме је стекао основно образовање: Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет.

3. Година дипломирања: 2011.

4. Назив и седиште факултета на коме је стекао мастер образовање: Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет.

5. Година дипломирања: 2012.

Студент је уписан на докторске академске студије школске 2012/2013. године.

На захтев студента, у складу са Законом о високом образовању, декан је донео Решење бр.20/158 од 28.09.2018. године о продужењу рока за завршетак студија до истека троструког броја школских година потребних за реализацију уписаног студијског програма, односно до краја школске 2020/2021. године.

Обавештавамо Вас да је Наставно-научно веће, на седници одржаној 31.01.2019. године размотрило предложену тему и закључило да је тема подобна за израду докторске дисертације.

ДЕКАН ФАКУЛТЕТА

Проф. др Петар Ускоковић

Прилог:

1. Предлог теме докторске дисертације са образложењем
2. Акт надлежног тела факултета о подобности теме за израду докторске дисертације
3. Подаци о ментору.

ПОДАЦИ О МЕНТОРУ

за кандидата Драгана (Ранко) Барјактаревић

Име и презиме ментора: др Марко Ракин

Звање: редовни професор

Списак радова који квалификују ментора за вођење докторске дисертације:

1. Cvijović-Alagić I., Cvijović Z., Mitrović S., **Rakin M.**, Veljović Dj., Babić M., Tribological Behaviour of Orthopaedic Ti-13Nb-13Zr and Ti-6Al-4V Alloys, Tribology Letter, Vol 40, 2010, pp. 59-70 (ISSN 1023-8883, IF(2010)=1.574).
2. Cvijović-Alagić I., Cvijović Z., Mitrović S., Panić V., **Rakin M.**, Wear and corrosion behaviour of Ti-13Nb-13Zr and Ti-6Al-4V alloys in simulated physiological solution, Corrosion Science, Vol 53, 2011, pp. 796-808, (ISSN: 0010-938X, IF(2011)=3.734).
3. Cvijović-Alagić I., Gubeljak N., **Rakin M.**, Cvijović Z., Gerić K.: Microstructural morphology effects on fracture resistance and crack tip strain distribution in Ti-6Al-4V alloy for orthopedic implants, Materials and Design, Vol 53, 2014, pp. 870-880, (ISSN: 0264-1275, IF (2013)=3.171).
4. Cvijović-Alagić I., Cvijović Z., Bajat J., **Rakin M.**, Composition and processing effects on the electrochemical characteristics of biomedical titanium alloys, Corrosion Science, Vol 83, 2014, pp. 245-254, (ISSN: 0010-938X, IF(2014)=4.422).
5. Dimić I., Cvijović-Alagić I., Obradović N., Petrović J., Putić S., **Rakin M.** and Bugarski B., Vitro biocompatibility assessment of Co-Cr-Mo dental cast alloy, Journal of the Serbian Chemical Society, Vol 80, 2015, pp. 1541-1552 (ISSN: 0352-5139, IF(2015)=0.997).
6. Dimić I., Cvijović-Alagić I., Völker B., Hohenwarter A., Pippan R., Veljović Đ., **Rakin M.**, Bugarski B., Microstructure and metallic ion release of pure titanium and Ti-13Nb-13Zr alloy processed by high pressure torsion, Materials and Design, Vol 91, 2016, pp. 340-347, (ISSN: 0264-1275, IF(2016)=4.364).
7. Barjaktarević D., Dimić I., Cvijović-Alagić I., Veljović Đ, **Rakin M.**, Corrosion resistance of high pressure torsion obtained commercially pure titanium in acidic solution, Technical Gazette, Vol 24, 2017, pp.1689-1695, (ISSN 1330-3651, IF(2017)=0.686).
8. Tomića N., Veljović Š, Trifković K., Međo B., **Rakin M.**, Radojević V., Jančić-Heinemann R, Numerical and experimental approach to testing the adhesive properties of modified polymer blend based on EVA/PMMA as coatings for optical fibers, International Journal of Adhesion & Adhesives Vol 73, 2017, pp. 80-91, (ISSN: 0143-7496, IF(2017)=2.065).
9. Dimić I., Cvijović-Alagić I., Hohenwarter A., Pippan R., Kojić V., Bajat J., **Rakin M.**, Electrochemical and biocompatibility examination of high-pressure torsion processed titanium and Ti-13Nb-13Zr alloy, Journal of Biomedical

Materials Research B Applied Biomaterials, Vol 106, 2018, pp.1097-1107, (ISSN: 1552-4973, IF(2018)=3.373).

Заокружити одговарајућу опцију (А, Б, В или Г):

А) У случају менторства дисертације на докторским студијама у групацији техничко-технолошких, природно-математичких и медицинских наука ментор треба да има најмање три рада са SCI, SSCI, AHCI или SCIE листе, као и Math-Net.Ru листе.

Б) У случају менторства дисертације на докторским студијама у групацији друштвено-хуманистичких наука ментор треба да има најмање три рада са релевантне листе научних часописа (Релевантна листа научних часописа обухвата SCI, SSCI, AHCI и SCIE листе, као и ERIH листу, листу часописа које је Министарство за науку класификовало као M24 и додатну листу часописа коју ће, на предлог универзитета, донети Национални савет за високо образовање. Посебно се вреднују и монографије које Министарство науке класификује као M11, M12, M13, M14, M41 и M51.)

В) У случају израде докторске дисертације према ранијим прописима за кандидате који су стекли академски назив магистра наука ментор треба да има пет радова (референци) које га, по оцени Већа научних области, квалификују за ментора односне дисертације.

Г) У случају да у ужој научној области нема квалификованих наставника, приложити одлуку Већа докторских студија о именовању редовног професора за ментора.

ДЕКАН ФАКУЛТЕТА

Датум: 28.12.2018.

М.П.

Проф. др Петар Ускоковић

ПОДАЦИ О МЕНТОРУ

за кандидата Драгана (Ранко) Барјактаревић

Име и презиме ментора: др Вељко Ђокић

Звање: научни сарадник

Списак радова који квалификују ментора за вођење докторске дисертације:

1. Socol G., Gnatyuk Yu., Stefan N., Smirnova N., **Djokić V.**, Sutan C., Malinovschi V., Stanculescu A., Korduban O., Mihailescu I.N., Photocatalytic activity of pulsed laser deposited TiO₂ thin films in N₂, O₂ and CH₄, Thin Solid Films, Vol 518, 2010, pp. 4648-4653, (ISSN: 0040-6090, IF (2010) = 1.935).
2. **Djokić V.**, Marinković A., Mitrić M., Uskoković P., Petrović R., Radmilović V., Janačković Dj., Preparation of TiO₂/carbon nanotubes photocatalysts: The influence of the method of oxidation of the carbon nanotubes on the photocatalytic activity of the nanocomposites, Ceramics International, Vol 38, 2012, pp. 6123-6129, (ISSN: 0272-8842, IF (2012) = 1.789).
3. Petrović R., Tanasković N., **Djokić V.**, Radovanović Ž., Janković-Častvan I., Stamenković I., Janačković Dj., Influence of the Gelation and Calcination Temperatures on Physical Parameters and Photocatalytic Activity of Mesoporous Titania Powders Synthesized by the Nonhydrolytic Sol-gel Process, Powder Technology, Vol 219, 2012, pp. 239-243, (ISSN: 0032-5910, IF (2012) = 2.024).
4. **Djokić V.**, Marinković A., Ersen O., Uskoković P., Petrović R., Radmilović V., Janačković Dj., The dependence of the photocatalytic activity of TiO₂/carbon nanotubes nanocomposites on the modification of the carbon nanotubes, Ceramics International, Vol 40, 2014, pp. 4009-4018, (ISSN: 0272-8842, IF (2014) = 2.605).
5. Bjelajac A., **Djokić V.**, Petrović R., Socol G., Mihailescu I.N., Florea I., Ersen O., Janačković Dj., Visible light-harvesting of TiO₂ nanotubes array by pulsed laser deposited CdS, Applied Surface Science, Vol 309, 2014, pp. 225-230, (ISSN: 0169-4332, IF (2014) = 2.711).
6. Albrbar A. J., **Djokić V.**, Bjelajac A., Kovač J., Ćirković J., Mitrić M., Janačković Dj., Petrović R., Visible-light active mesoporous, nanocrystalline N, S-doped and co-doped titania photocatalysts synthesized by non-hydrolytic sol-gel route, Ceramics International, Vol 42, 2016, pp. 16718-16728, (ISSN: 0272-8842, IF (2016) = 2.986).
7. Bjelajaca A., **Djokić V.**, Petrović R., Bundaleski N., Socol G., Mihailescu I. N., Rakočević Z., Janačković Dj., Absorption boost of TiO₂ nanotubes by doping with N and sensitization with CdS quantum dots, Ceramics International, Vol 43, 2017, pp. 15040-15046, (ISSN: 0272-8842, IF (2017) = 3.057).
8. Bjelajac A., Petrović R., **Djokić V.**, Matolin V., Vondraček M., Dembele K., Moldovan S., Ersen O., Socol G., Mihailescu I. N., Janačković Dj., Enhanced absorption of TiO₂ nanotubes by N-doping and CdS quantum dots sensitization:

insight into the structure, RSC Advances, Vol 8, 2018, pp. 35073-35082, (ISSN: 2046-2069, IF (2017) = 2.936).

Заокружити одговарајућу опцију (А, Б, В или Г):

А) У случају менторства дисертације на докторским студијама у групацији техничко-технолошких, природно-математичких и медицинских наука ментор треба да има најмање три рада са SCI, SSCI, AHCI или SCIE листе, као и Math-Net.Ru листе.

Б) У случају менторства дисертације на докторским студијама у групацији друштвено-хуманистичких наука ментор треба да има најмање три рада са релевантне листе научних часописа (Релевантна листа научних часописа обухвата SCI, SSCI, AHCI и SCIE листе, као и ERIH листу, листу часописа које је Министарство за науку класификовало као M24 и додатну листу часописа коју ће, на предлог универзитета, донети Национални савет за високо образовање. Посебно се вреднују и монографије које Министарство науке класификује као M11, M12, M13, M14, M41 и M51.)

В) У случају израде докторске дисертације према ранијим прописима за кандидате који су стекли академски назив магистра наука ментор треба да има пет радова (референци) које га, по оцени Већа научних области, квалификују за ментора односне дисертације.

Г) У случају да у ужој научној области нема квалификованих наставника, приложити одлуку Већа докторских студија о именовању редовног професора за ментора.

ДЕКАН ФАКУЛТЕТА

Датум: 28.12.2018.

М.П.

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. 31. и 32. Правилника о докторским студијама ТМФ-а, на седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета од 31.01.2019. године, донета је

О Д Л У К А

о прихватању Реферата Комисије за оцену подобности теме и кандидата
за израду докторске дисертације

Прихвата се Реферат Комисије за оцену подобности теме и кандидата и одобрава израда докторске дисертације Драгани Барјактаревић, мастер инжењеру технологије, под називом: **„Површинска наноструктурна модификација и карактеризација материјала на бази титана за примену у медицини“**.

Одлуку о давању сагласности на предлог теме докторске дисертације доноси Универзитет у Београду.

За менторе се одређују др Марко Ракин, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет и др Вељко Ђокић, научни сарадник, Иновационог центра Технолошко-металуршког факултета.

Одлуку доставити: Универзитету у Београду, кандидату, менторима, Служби за наставно студентске послове и архиви Факултета.

Д Е К А Н

Проф. др Петар Ускоковић

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Подобност теме и кандидата Драгане Р. Барјактаревић, мастер инж. техн., за израду докторске дисертације

Одлуком 35/399 бр. од 01.11.2018. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата Драгане Р. Барјактаревић, мастер инж. техн., за израду докторске дисертације и научне заснованости теме **“ПОВРШИНСКА НАНОСТРУКТУРНА МОДИФИКАЦИЈА И КАРАКТЕРИЗАЦИЈА МАТЕРИЈАЛА НА БАЗИ ТИТАНА ЗА ПРИМЕНУ У МЕДИЦИНИ”**.

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

РЕФЕРАТ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Драгана Р. Барјактаревић, мастер инж. технологије, је рођена 03.06.1987. године у Београду. Технолошко–металуршки факултет Универзитета у Београду је уписала школске 2006/2007. године на студијском програму Хемијска технологија; студијско подручје Фармацеутско инжењерство и дипломирала 2011. Завршни рад на тему „Прорачун дебљине плитких торисферичних данаца према стандарду EN 13445-3“, под руководством ментора проф. др Марка Ракина, одбранила је са оценом 10. Мастер академске студије уписала је на Технолошко-металуршком факултету Универзитета у Београду 2011. године на студијском програму Хемијско инжењерство. Мастер рад на тему „Димензионисање и прорачун чврстоће хоризонталног пролазног аутоклава према прорачунској температури и испитном притиску“ под руководством ментора проф.др Марка Ракина одбранила је са оценом 10, у јулу 2012. године. Укупна просечна оцена студирања је изнад 8.

1.2. Стечено научноистраживачко искуство

Докторске студије на Технолошко-металуршком факултету Универзитета у Београду је уписала школске 2012/2013. године на студијском програму Инжењерство материјала.

Положила је све програмом предвиђене испите са просечном оценом 9,50 и одбранила завршни испит на тему “Електрохемијска корозија титана и легуре Ti-13Nb-13Zr и концентратори напона као критична места за напонску корозију“. Положени испити и остварени бодови у оквиру докторских студија су наведени у продужетку:

<i>Р.бр.</i>	<i>Предмет</i>	<i>Оцена</i>	<i>ЕСПБ</i>
1	Термодинамика чврстог стања	10	5
2	Одабрана поглавља нумеричке анализе	9	5
3	Отпорност материјала	10	4
4	Механика ламинарних композитних плоча и љуски	10	3
5	Метода коначних елемената у инжењерству материјала	10	4
6	Хемијска кинетика	7	5
7	Галванска техника	10	5
8	Наука о материјалима и инжењерство материјала	10	6
9	Енглески језик	10	-
10	Физика лома	8	4
11	Структура и својства композитних материјала	10	5
12	Физичко-механичка испитивања материјала (виши курс)	10	4
13	Завршни испит	10	30
ПРОСЕЧНА ОЦЕНА		9.50	80

Одлуком Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета, на седници одржаној 23.06.2016. године, Драгана Р. Барјактаревић је изабрана у истраживачко звање истраживач приправник. Од октобра 2016. године запослена је на Технолошко-металуршког факултету у истраживачком звању истраживач приправник и ангажована на реализацији научноистраживачког пројекта финансираног од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије под називом „Микромеханички критеријуми оштећења и лома“ (евиденциони број ОН 174004). Од 2018. године учествује у реализацији билатералних пројеката под називом “Нове интелигентне силикатне и органосиликатне наноструктуре за дијагностику и испоруку лекова“ (евиденциони број пројекта: 451-03-01963/2017-09/05) и “Процена интегритета, носивости и сигурности рада шавних и бешавних цеви на основу испитивања епрувета облика прстена (Pipe-RING)”.

Драгана Р. Барјактаревић је свој научноистраживачки рад усмерила на неколико области: примена поступка увијања под високим притиском у циљу добијања ситнозрне микроструктуре металних биоматеријала, примена и оптимизација процеса електрохемијске анодизације за добијање наноструктурне површине код металних биоматеријала, испитивање механичких својстава, корозионог оштећења и биокомпатибилности биоматеријала који се користе за замену коштаних ткива у људском организму, као и израда нумеричких модела применом методе коначних елемената у лиценцираног софтверског пакета Abaqus.

Кандидат Драгана Р. Барјактаревић је 22.10.2018. године предложила тему докторске дисертације под називом „Површинска наноструктурна модификација и карактеризација материјала на бази титана за примену у медицини “. Сprovedена истраживања у оквиру докторске дисертације, чију основу би чинило развијање и карактеризација нових биоматеријала и унапређење њихових својстава као и развијање процеса добијања и модификације, резултовало би и објављивањем радова у међународним и националним научним часописима. У току свог досадашњег научноистраживачког рада као аутор или коаутор објавила је 2 рада у часописима међународног значаја и часописима међународног значаја верификованих посебном одлуком, 10 радова саопштених на скуповима међународног и националног значаја штампаних у целини или у изводу.

Списак објављених научних и стручних радова

Радови објављени у часописима међународног значаја (M23)

1. **Barjaktarević D.**, Dimić I., Cvijović-Alagić I., Veljović Đ., Rakin M.: Corrosion resistance of high pressure torsion obtained commercially pure titanium in acidic solution: Technical Gazette, Vol. 24 No. 6, 2017, pp.1689-1695, ISSN 1330-3651, IF (2017)=0.686, <https://doi.org/10.17559/TV-20160303141534>.

Радови објављени у часописима међународног значаја верификовани посебним одлукама (M24)

1. **Barjaktarević D.**, Cvijović-Alagić I., Dimić I., Đokić V., Rakin M.: Anodization of Ti-based materials for biomedical applications: A review: Metallurgical and Materials Engineering, Vol. 22 No. 3, 2016, pp.129-143, ISSN 2217-8961, UDC: 669.295.018.8.
2. **Barjaktarević D.**, Đokić V., Rakin M.: Nanotubular oxide layer formed on the Ti-based implants surfaces-application and possible damages: A review: Metallurgical and Materials Engineering, ISSN 2217-8961, accepted, <https://doi.org/10.30544/401>.
3. **Barjaktarević D.**, Rakin M., Đokić V.: Characterisation of the nanotubular oxide layer formed on the ultrafine-grained titanium: Metallurgical and Materials Engineering, ISSN 2217-8961, accepted, <https://doi.org/10.30544/402>.

Саопштења са међународних скупова штампана у целини (M33)

1. **Barjaktarević D.**, Dimić I., Cvijović-Alagić I., Bajat J., Rakin M.: The electrochemical impedance spectroscopy study of ultrafine-grained titanium in artificial saliva, Conference TEAM 2015, Belgrade, Serbia, 2015, Proceedings of TEAM 2015, pp. 336-339, ISBN 978-86-7083-877-2.
2. **Barjaktarević D.**, Rakin M., Međo B., Đokić V.: Nanoindentation study of ultrafine-grained titanium-based materials, TEAM 2018, Novi Sad, Serbia 2018, Proceedings of TEAM 2018, pp. 117-122 ISBN 78-86-6022-098-3.

Саопштења са међународних скупова штампана у изводу (M34)

1. **Barjaktarević D.**, Dimić I., Cvijović-Alagić I., Đokić V., Bajat J., Rakin M.: Corrosion behavior of nanotubular oxide layer formed on titanium and Ti-13Nb-13Zr alloy processed by high pressure torsion, Nineteenth Annual Conference YUCOMAT 2017, Materials Research Society of Serbia, Herceg Novi, Montenegro, September 2017, Programme and the book of abstract, pp. 101, ISBN 9788691911126.
2. **Barjaktarević D.**, Dimić I., Cvijović-Alagić I., Đokić V. and Rakin M.: Morphology of Nanotubular Oxide Layer Formation on Titanium and Titanium Alloy Using Electrochemical Anodization, ELMINA 2018, Belgrade, Serbia, August 2018, Book of Abstracts pp.160-162, ISBN 978-86-7025-785-6.
3. **Barjaktarević D.**, Bajat J., Cvijović-Alagić I., Dimić I., Hohenwarter A., Đokić V. and Rakin M.: The corrosion resistance in artificial saliva of titanium and Ti-13Nb-13Zr alloy processed by high pressure torsion, European Conference on Fracture 2018 - Loading and Environmental effects on Structural Integrity, Belgrade, Serbia, 2018, pp. 494, ISBN 978-86-900686-0-9.
4. **Barjaktarević D.**, Veljović Đ., Dimić I., Đokić V. and Rakin M.: The biocompatibility of nanotubular oxide layer formed on the ultrafine-grained Ti-13Nb-13Zr alloy, Serbian Ceramic Society Conference Advanced Ceramics and Application VII Belgrade, Serbia, September 2018, Book of Abstracts pp.85, ISBN 978-86-915627-6-2.

Саопштења са скупова националног значаја штампана у целини (M63)

1. Dimić I., Međo B., Putić S., Obradović N., Rakin M., **Barijaktarević D.**: Primena materijala na bazi titana za izradu implanata Savetovanje, Savremeni materijali i mogućnosti njihove primene, Požarevac, Srbija, Novembar 2015, Zbornik radova, pp. 48-57, ISBN 978-86-911159-4.

Саопштења са скупова националног значаја штампана у изводу (M64)

1. **Barijaktarević D.**, Dimić I., Bajat J., Rakin M.: Koroziono ponašanje čistog titana i Ti-13Nb-13Zr legure u rastvoru veštačke pljuvačke, Third Conference of Young Chemists of Serbia 2015, Belgrade, Serbia, Book of Abstracts, pp. 79, ISBN 978-86-7132-059-7.
2. **Barijaktarević D.**, Dimić I., Đokić V., Rakin M.: Nanotubular oxide layer formation on Ti-13Nb-13Zr alloy as a function of anodizing time, Forth conference of young chemists of Srebia, Belgrade, November 2016, Book of Abstracts pp.90, ISBN 978-86-7132-059-7.
3. **Barijaktarević D.**, Dimić I., Cvijović-Alagić I., Đokić V., Bajat J., Rakin M.: Electrochemical behavior of anodic Ti-13Nb-13Zr oxide nanotubes in simulated body fluid, Fifth Conference of Young Chemists of Serbia Society, Belgrade, Serbia, September 2017, Book of Abstracts pp. 101, ISBN 978-86-7132-059-7.

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

На основу досадашњег рада и приказаних резултата остварених током докторских студија, Драгана Р. Барјактаревић је показала изузетно интересовање, склоност и способност за бављење научноистраживачким радом, што се огледа, у самосталном осмишљавању и реализацији истраживања везаних за докторску дисертацију и кроз рад на осталим пројектним активностима. На основу биографских података кандидата, њених научних и стручних активности, Комисија сматра да је кандидат подобан за ефикасан теоријски и експериментални рад на предложеној теми докторске дисертације.

2. Предмет и циљ истраживања

Развој металних биоматеријала треба да обезбеди несметано функционисање импланата без штетних ефеката на околна ткива и продужење животног века импланата у људском организму. Комерцијално чист титан (eng. *Commercially Pure Titanium*, *cpTi*) и легуре титана због механичких својстава као и корозионе постојаности, хемијске стабилности, добре биокомпатибилности и осеоинтеграције са околним ткивима у људском организму, најчешће су коришћени материјали за изradу импланата у медицини [1-4]. Један од недостатака је значајна разлика између модула еластичности ове групе металних биоматеријала и коштаних људских ткива, што може довести до проблема у прихватању импланата и структурног оштећења костију [5]. Такође, недостаци ове групе металних биоматеријала су могућност корозионог оштећења у течностима људског организма што може изазвати проблем код биокомпатибилности импланата са околним ткивом и повећано хабање услед спољног оптерећења током контакта имплант-кост.

Прва генерација титана и титанових легура, међу којима је и Ti-6Al-4V легура, има задовољавајуће клиничке резултате, али је модул еластичности ових материјала знатно већи (110 GPa) од вредности модула еластичности костију у људском организму (10-30 GPa) [6]. Додатни проблем трокомпонентне Ti-6Al-4V легуре јесте и садржај ванадијума чије отпуштање јона у околну средину може довести до алергијских реакција у људском организму и бити узрок различитих неуролошких поремећаја. У новим генерацијама легура на бази титана дошло је до примене легирајућих елемената као што су молибден, ниобијум и цирконијум чији је циљ да доведу до повећања биокомпатибилности, смањења корозионог оштећења и побољшања механичких својстава (пре свега чврстоће и дуктилности) уз постизање адекватне вредности модула еластичности [6-12].

Један од праваца даљег развоја материјала на бази титана јесте примена различитих савремених поступака интензивног пластичног деформисања (ИПД, *eng. Severe Plastic Deformation, SPD*) чији је основни циљ добијање ситнозрних (*eng. ultrafine-grained, UFG*) металних материјала [13-17]. Ситнозрни метални материјали најчешће показују побољшана механичка својства [13] у односу на металне материјале добијене конвенционалним поступцима израде, док питање биокompatibilности и корозионог оштећења остаје отворено за истраживање. Једна од метода интензивног пластичног деформисања је и метода увијања под високим притиском (УВП, *eng. High Pressure Torsion, HPT*) [18-23].

Материјали на бази титана нашли су своју клиничку примену у ортопедији као фиксатори прелома (плочице, завртњи, екстерни фиксатори), фиксатори за кичму, импланти за замену комплетног коштаног ткива (тоталне протезе кука, колена и лакта) и као импланти у стоматологији. Након уградње импланта на бази титана долази до процеса осеоинтеграције. Овај феномен се односи на формирање структурне и функционалне везе између кости и импланта при чему настаје кост-имплант комплекс као јединствена целина. Фактори који утичу на осеоинтеграцију су облик импланта (дужина и пречник), хемијски састав материјала од кога је имплант израђен, присуство превлаке и стање површине импланта. Осим тога, оксидни слојеви који се стварају на површини титана и легура титана у контакту са физиолошким раствором омогућавају бржу осеоинтеграцију.

Понашање металних биоматеријала одређују и карактеристике површине, које су и један од кључних фактора у интеракцијама импланта са околним ткивом. За оптимизацију и побољшање биолошких и механичких својстава импланата често је неопходна модификација површине [24]. Овакве методе, познате као површински третмани или модификације, могу се поделити у четири групе: механичке, физичке, хемијске и биолошке површинске модификације.

У хемијске површинске модификације спадају хемијске методе, електрохемијске методе, сол-гел методе и хемијска депозиција из парне фазе. У последњој деценији, електрохемијске методе које омогућавају површинску наноструктурну модификацију све више налазе своју примену у производњи импланата, а једна од ових метода је и електрохемијска анодизација (анодна оксидација) која на површини металног материјала омогућава добијање наноструктурног оксидног слоја састављеног од наноцеви [25-35]. Предност електрохемијске анодизације у односу на друге површинске наноструктурне модификације јесте могућност контроле морфологије наноструктурних оксидних слојева и величине наноцеви варирањем електролита, рН вредности, напона или времена електрохемијске анодизације. Најчешће коришћени електролити у процесу електрохемијске анодизације материјала на бази титана су у форми воденог киселог раствора који садржи киселине H_2SO_4 , HNO_3 , HF , H_3PO_4 и флуоридне јоне [24]. Оптимална вредност напона, која доводи до формирања наноцеви пречника од 30 nm до 150 nm, је у распону од 10 V до 25 V, док је време потребно за формирање наноструктурног оксидног слоја од 30 до 120 минута [5]. Повећање времена електрохемијске анодизације доводи до повећања дебљине наноструктурног оксидног слоја и пречника наноцеви. Са друге стране, изузетно дугачак процес електрохемијске анодизације доводи до танких зидова наноцеви. Циљ је успоставити адекватне параметре електрохемијске анодизације како би се на површини материјала формирао хомогени наноструктурни оксидни слој са наноцевима између којих не постоје канали или су они изузетно малих димензија. Оваква површина металних биоматеријала треба да доведе до смањења вредности тврдоће и површинског модула еластичности и приближавања вредностима костију у људском организму [36-38] али и до повећања корозионе отпорности [39-47]. Такође, циљ наноструктурне модификације је и повећање храпавости површинског слоја, чиме се мења контактна површина металног биоматеријала, што омогућава бољу биокompatibilност, као и степен осеоинтеграције [48-57].

Испитивање корозионог оштећења и биокомпатибилности титана и титанових легура, са наноструктурном модификованом површином, као и испитивање површинских физичких и механичких својстава (модула еластичности и тврдоће) остаје отворено и још увек недовољно испитано, поготово када је реч о ситнозрном титану и ситнозрним легурама титана.

Управо из горе поменутих разлога, циљ научног истраживања у оквиру предложене докторске дисертације је примена процеса електрохемијске анодизације за добијање наноструктурне површине крупнозрних и ситнозрних материјала на бази титана, као и анализа њеног утицај на површинска физичка и механичка својства (модул еластичности, тврдоћу, отпорност према оштећењу и лому наноструктурног оксидног слоја), затезна својства, биокомпатибилност и понашања у корозионој средини.

Релевантни библиографски извори:

1. Duraccio D., Mussano F., Faga M., Biomaterials for dental implants: current and future trends, *J Mater Sci*, 50 (2015) 4779-4812.
2. Liua X., Chub P., Ding Ch., Surface modification of titanium, titanium alloys, and related materials for biomedical applications, *Mater Sci Eng R*, 47 (2004) 49-121,.
3. Prasad S., Ehrensberger M., Gibson M., Kim H., Monaco Jr E., Review Biomaterial properties of titanium in dentistry, *J of Oral Biosci*, 57 (2015) 192-199,.
4. Chiang C., Chiou S., Yang W., Hsu M., Yung M., Tsai M., Chen L., Huang E., Formation of TiO₂ nano-network on titanium surface increases the human cell growth, *Dent Mater*, 25 (2009) 1022-1029.
5. Ossowska A., Sobieszczyk S., Supernak M., Zielinski A., Morphology and properties of nanotubular oxide layer on the "Ti-13Zr-13Nb" alloy, *Sur & Coat Techn*, 258 (2014) 1239-1248.
6. Bai Y., Deng Y., Zheng Y., Li Y., Zhang R., Lv Y., Zhao Q., Wei Sh., Characterization corrosion behavior, cellular response and in vivo bone tissue compatibility of titanium-niobium alloy with low Young's modulus, *Mater Sci Eng C*, 59 (2016) 565-576.
7. Mohammed M., Khan Z., Siddiquee A., Beta Titanium Alloys: The Lowest Elastic Modulus for Biomedical Applications: A Review, *Inter J Chem, Molec Nucl Mater Metall Eng*, 8 (2014) 822-827.
8. Huang H., Wu Ch., Sun Y., Huang H., Lee T., Enhanced corrosion resistance and biocompatibility of β -type Ti-25Nb-25Zr alloy by electrochemical anodization, *Th Sol Film*, 549 (2013) 87-92.
9. Rajamallu K., Niranjana M., Dey S., First principles theoretical investigations of low Young's modulus beta Ti-Nb and Ti-Nb-Zr alloys compositions for biomedical applications, *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl*, 50 (2015) 52-58.
10. Li Y., Yang C., Zhao H., Qu S., Li X., Li Y., New developments of Ti-based alloys for biomedical applications, *Mat*, 7 (2014) 1709-1800.
11. Nie L., Zhan Y., Liu H., Tang C., Novel β -type Zr-Mo-Ti alloys for biological hard tissue replacements, *Mater Des*, 53 (2014) 8-12.
12. Rack H., Qazi J., Titanium alloys for biomedical applications, *Mater Sci Eng C*, 26 (2006) 1269-1277.
13. Valiev Z., Semenova I., Latysh V., Rack H., Lowe T., Petruzalka J., Dluhos L., Hrusak D. and Sochova J., Nanostructured Titanium for Biomedical Applications, *Adv Eng Mat*, 10 (2008) 1-4.
14. Valiev R., Estrin Y., Horita Z., Langdon T., Zehetbauer M., Zhu, Y. Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation, *JOM*, 58 (2006) 33-39.
15. Sanusi K., Makinde O., Oliver G., Equal channel angular pressing technique for the formation of ultra-fine grained structures, *S Afr J Sci*, 108 (2012) 1-7.

16. Valiev R., Langdon T., Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement, *Prog Mater Sci*, 51 (2006) 881-981.
17. Azushima A., Kopp R., Korhonen A., Yang D., Micari F., Lahoti G., Groche P., Yanagimoto J., Tsuji N., Rosochowski A., Yanagida A., Severe plastic deformation (SPD) processes for metals, *Cirp Ann-Manuf Techn*, 57 (2008) 716-735.
18. Zhilyaev A., Langdon T., Using high-pressure torsion for metal processing: Fundamentals and applications, *Prog Mater Sci*, 53 (2008) 893-979.
19. Lin Z., Wang L., Yeung K., Qin J., The ultrafine-grained titanium and biomedical titanium alloys processed by Severe Plastic Deformation (SPD), *SOJ Mater Sci Eng*, 1 (2013) 2-6.
20. Yilmazer H., Niinomi M., Nakai M., Cho K., Hieda J., Todaka Y., Miyazaki T., Mechanical properties of a medical β -type titanium alloy with specific microstructural evolution through high-pressure torsion, *Mater Sci Eng C*, 33 (2013) 2499-2507.
21. Valiev R., Islamgaliev R., Alexandrov I., Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation, *Prog Mater Sci*, 45 (2000) 103-189.
22. Kim H., Sasaki T., Okutsu K., Kim I., Inamura T., Hosoda H., Miyazaki S., Texture and shape memory behavior of Ti-22Nb-6Ta alloy, *Acta Mater*, 54 (2006) 423-433.
23. Shahmir H., Nili-Ahmadabadi M., Huang Y., Langdon T., Evolution of microstructure and hardness in NiTi shape memory alloys processed by high-pressure torsion, *J Mater Sci*, 49 (2014) 2998-3009.
24. Minagar S., Berndt C., Wanga J., Ivanova E., Wena C., A review of the application of anodization for the fabrication of nanotubes on metal implant surfaces, *Acta Biomater*, 8 (2012) 2875-2888.
25. Kim K. and Ramaswamy N., Electrochemical surface modification of titanium in dentistry, *Dent Mater J*, 28 (2009) 20-36.
26. Hernández-López J., Conde A., Damborenea J., Arenas M., Electrochemical response of TiO₂ anodic layers fabricated on Ti6Al4V alloy with nanoporous, dual and nanotubular morphology, *Corr Sci*, 112 (2016) 194-203.
27. Tan A., Pingguan-Murphy B., Ahmad R., Akbar S., Review of titania nanotubes: Fabrication and cellular response, *Ceramics Inter*, 38 (2012) 4421-4435.
28. Wang L., Jin M., Zheng Y., Guan Y., Lu X., Luo J., Nanotubular surface modification of metallic implants via electrochemical anodization technique, *Int J Nanomed*, 9 (2014) 4421-4435.
29. Mosiałek M., Nawrat G., Szyk-Warszyńska L., Żak J., Maciej A., Radwański K., Winiarski A., Szade J., Nowak P., Simka W., Anodic oxidation of the Ti-13Nb-13Zr alloy, *J Sol Sta Electrochem*, 18 (2014) 3073-3080.
30. Macak J., Tsuchiya H., Taveira L., Ghicov A., Schmuki P., Self-organized nanotubular oxide layers on Ti-6Al-7Nb and Ti-6Al-4V formed by anodization in NH₄F solutions, *J Biomed Mater Res A*, 75 (2005) 928-933.
31. Saji V., Choe H., Brantley W., Nanotubular oxide layer formation on Ti-13Nb-13Zr alloy as a function of applied potential, *J Mater Sci*, 44 (2009) 3975-3982.
32. Zieliński A., Antoniuk P., Krzysztofowicz K., Nanotubular oxide layers and hydroxyapatite coatings on 'Ti-13Zr-13Nb' alloy, *Surf Engin*, 30 (2014) 643-649.
33. Al-Mobarak N., Al-Swayih A., Development of Titanium Surgery Implants for Improving Osseointegration Through Formation of a Titanium Nanotube Layer, *Int J Electrochem Sci*, 9 (2014) 32-45.
34. Tsuchiya H., Macak J., Ghicov A., Tang Y., Fujimoto Sh., Niinomi M., Noda T., Schmuki P., Nanotube oxide coating on Ti-29Nb-13Ta-4.6Zr alloy prepared by self-organizing anodization, *Electroch Acta*, 52 (2006) 94-101.
35. Tsuchiya H., Akaki T., Nakata J., Terada D., Tsuji N., Koizumi Y., Minamino Y., Schmuki P., Fujimoto S., Anodic oxide nanotube layers on Ti-Ta alloys: Substrate composition, microstructure and self-organization on two-size scales, *Corr Sci*, 51 (2009) 1528-1533.

36. Crawford G., Chawla N., Houston J., Nanomechanics of biocompatible TiO₂ nanotubes by Interfacial Force Microscopy (IFM), *J Mech Behav Biomed Mater*, 2 (2009) 580-587.
37. Crawford G., Chawla N., Da K., Bose S., Bandyopadhyaya A., Microstructure and deformation behavior of biocompatible TiO₂ nanotubes on titanium substrate, *Acta Biomater*, 3 (2007) 359-367.
38. Xu Y., Liu M., Wang M., Oloyede A., Bell J., Yan C., Nanoindentation study of the mechanical behavior of TiO₂ nanotube arrays, *J of Appl Phys*, 118 (2015) 145301-145310.
39. Oliveira N., Ferreira E., Duarte L., Biaggio S., Rocha-Filho R., Bocchi N., Corrosion resistance of anodic oxides on the Ti-50Zr and Ti-13Nb-13Zr alloys, *Electrochim Acta*, 51 (2006) 2068-2075.
40. Saji V., Choe H., Brantley W., An electrochemical study on self-ordered nanoporous and nanotubular oxide on Ti-35Nb-5Ta-7Zr alloy for biomedical applications, *Acta Biomater*, 5 (2009) 2303-2310.
41. Wu H., Li L., Chen Ch., Diao E., Anodic TiO₂ nanotube arrays for dye-sensitized solar cells characterized by electrochemical impedance spectroscopy, *Ceramics Intern*, 38 (2012) 6253-6266.
42. Asumpinwong W., Saengkiattiyut K., Srimaneepong V., Different Constant Voltages of Anodization on the Corrosion Behavior of Ti-6Al-4V Alloy, *J Sci*, 42 (2015) 238-247.
43. Al-Swayih A., The Electrochemical Behavior of Titanium Improved by Nanotubular Oxide Formed by Anodization for Biomaterial Applications: A Review *Orient J Chem*, 32 (2016) 2841-2856.
44. Kim W., Choe H., Nanostructure and Corrosion Behaviors of Nanotube Formed Ti-Zr alloy, *Nonferrous Met Soc China*, 19 (2009) 1005-1008.
45. Jang S., Choe H., Ko Y., Brantley W., Electrochemical characteristics of nanotubes formed on Ti-Nb alloys, *Thin Sol Film*, 517 (2009) 5038-5043.
46. Balamurugan A., Rajeswari S., Balossier G., Corrosion aspect of metallic implant- an review, *Mater Corr*, 59 (2008) 855-869.
47. Liu C., Wang Y., Wang M., Huang W., Chu P., Electrochemical stability of TiO₂ nanotubes with different diameters in artificial saliva, *Sur and Coat Tech*, 206 (2011) 63-67.
48. Larsson C., Thomsen P., Lausmaa J., Rodahl M., Kasemo B., Ericson L., Bone response to surface modified titanium implants: studies on electropolished implants with different oxide thickness and morphology, *Biomater*, 15 (1994) 1062 -1074.
49. Ask M., Rolander U., Lausmaa J., Kasemo B., Microstructure and morphology of surface oxide films on Ti-6Al-4V, *J Mater Res*, 5 (1990) 1662-1667.
50. Sul Y., Johansson C., Wennerberg A., Cho L., Chang B., Albrektsson T., Optimum surface properties of oxidized implants for reinforcement of osseointegration: surface chemistry, oxide thickness, porosity, roughness, and crystal structure, *Int J Oral Maxillofac Impl*, 20 (2005) 349-59.
51. Schupbach P., Glauser R., Rocci A., Martignoni M., Sennerby L., Lundgren A. et al., The human bone-oxidized titanium implant interface: a light microscopic, scanning electron microscopic, back-scatter scanning electron microscopic, and energy-dispersive X-ray study of clinically retrieved dental implants, *Clin Implant Dent Relat Res*, 7 (2005) 36-43.
52. Aguirre R., Echeverry-Rend M., Quintero D., Castano J., Harmsen M., Robledo S., Echeverria E., Formation of nanotubular TiO₂ structures with varied surface characteristics for biomaterial applications. *J Biomed Mater Res Part A* 106 (2018) 1341-1354.
53. Frandsen J., Brammer K., Jin S., Variations to the Nanotube Surface for Bone Regeneration, *Int J of Biomater*, (2013) 1-10.
54. Eisenbarth E., Velten D., Schenk-Meuser K., Linez P., Biehl V., Duschner H., Breme J., Hildebrand H., Interactions between cells and titanium surfaces, *Biomolec Eng*, 19 (2002) 243-249.
55. Thuy-Duong T., Park I., Lee M., Bae T., Enhanced biocompatibility of a pre-calcified nanotubular TiO₂ layer on Ti-6Al-7Nb alloy, *Sur & Coat Techn*, 236 (2013) 127-134.

56. Huang H., Wu C., Sun Y., Huang H., Lee T., Enhanced corrosion resistance and biocompatibility of β -type, Ti-25Nb-25Zr alloy by electrochemical anodization, *Th Sol Film*, 549 (2013) 87-92.
57. Manjaiah M., Laubscher R., Effect of anodizing on surface integrity of Grade 4 titanium for biomedical applications, *Sur & Coat Techn*, 310 (2017) 263-272.

3. Полазне хипотезе

Детаљни преглед литературе показује да наноструктурна површина код металних материјала на бази титана може бити формирана применом електрохемијске анодизације, али остаје отворено питање каква је морфологија на ситнозрним металним материјалима добијеним УВП поступком, као и да ли и у којој мери површинска наноструктурна модификација материјала на бази титана утиче на површински модул еластичности, тврдоћу, корозиону отпорност, биокомпатибилност и затезна својства материјала. Према томе, у раду ће се испитати степен корозионе отпорности и степен биокомпатибилности материјала у средини која симулира услове у људском организму како би се дошло до закључка да ли материјали након УВП поступка и након површинске наноструктурне модификације, доводе до побољшаних карактеристика у односу на материјале добијене конвенционалним поступцима израде. Испитаће се модул еластичности и тврдоћа како би се дошло до закључка да ли површинска наноструктурна модификација доводи до прибиближавања њихових вредности вредностима костију у људском организму, а анализираће се и утицај површинске наноструктурне модификације на затезна својства биоматеријала. Истраживања ће бити започета на основу следећих хипотеза:

-Титан и његове легуре показују бољу корозиону постојаност, биокомпатибилност, осеоинтеграцију и нижу вредност модула еластичности у поређењу са другим металним биоматеријалима;

-Као резултат примене УВП поступка добијају се ситнозрни метални материјали побољшаних механичких и биолошких својстава у поређењу са материјалима добијеним конвенционалним поступцима израде;

-Понашање металних биоматеријала одређују и карактеристике површине, које су и један од кључних фактора у интеракцијама са околним ткивом;

-У циљу побољшања карактеристика материјала на бази титана, потребно је развити материјал добре корозионе постојаности и биокомпатибилности, са смањеном вредношћу модула еластичности у површинском слоју;

-Као резултат примене електрохемијске анодизације могу се добити наноструктурни оксидни слојеви састављени од наноцеви на површини металних материјала на бази титана, чија се морфологија може оптимизовати варирањем параметара процеса;

-У поређењу са материјалима добијеним конвенционалним поступцима израде, материјали на бази титана чија је површина наноструктурно модификована показују већи степен корозионе отпорности, бољу биокомпатибилност и мању вредност модула еластичности у површинском слоју.

4. Научне методе истраживања

Материјали: За потребе испитивања биће коришћене две групе материјала на бази титана. Прву групу чини крупнозрни (*eng. coarse-grained, CG*) материјал добијен конвенционалним методама: трокомпонентна легура титана нове генерације Ti-13Nb-13Zr (CG Ti-13Nb-13Zr, CG TNZ). Другу групу чине ситнозрни материјали добијени поступком интензивног пластичног деформисања (ИПД, *eng. Severe Plastic Deformation, SPD*) односно поступком увијања под високим притиском (УВП, *eng. High Pressure Torsion, HPT*): ситнозрни

комерцијално чист титан (*eng. Ultrafine-grained*, UFG cpTi) и ситнозрна трокомпонентна Ti-13Nb-13Zr легура (*eng. Ultrafine-grained*, UFG TNZ).

Метод: Наноструктурна модификација површине биће урађена на горе поменутим металним материјалима, применом методе електрохемијске анодизације. Карактеризација свих испитиваних материјала, како оних добијених конвенционалним методама, тако и материјала добијених савременим УВП поступком, биће извршена применом скенирајуће електронске микроскопије (*eng. Scanning Electron Microscopy, SEM*), док ће се трансмисиона електронска микроскопија (*eng. Transmission Electron Microscopy, TEM*) користити по потреби. Карактеризација хемијског састава материјала биће урађена применом рендгенске флуоресцентне анализе (*eng. X-ray fluorescence, XRF*). Хомогеност материјала након УВП поступка и утицај УВП поступка на микротврдоћу биће процењено испитивањем микротврдоће дуж пречника узорака применом Викерсове методе.

Карактеризација морфологије наноструктурне површине добијене на различитом времену биће урађена применом СЕМ, док ће топографија и храпавост површине материјала пре и након електрохемијске анодизације бити одређена применом микроскопије атомских сила (*eng. Atomic Force Microscopy, AFM*). Такође, биће урађена хемијска карактеризација добијене наноструктурне површине испитиваних материјала применом енергетске дисперзионе спектроскопије (*eng. Energy Dispersive Spectroscopy, EDS*).

Отпорност према корозији материјала крупнозрне и ситнозрне микроструктуре, као и ових материјала након површинске наноструктурне модификације испитаће се применом потенциодинамичке методе и методе спектроскопије електрохемијске импеданције (*eng. Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS*), при чему ће бити одређени електрохемијски параметри корозионе стабилности, природа и карактеристике наноструктурних оксидних слојева, као и процена корозионог оштећења поменутих материјала. Наведени материјали ће бити изложени раствору који симулира услове у људском организму на температури од 37 °C са одређеном pH вредности.

Оцена цитотоксичности биоматеријала и вијабилности ћелијске културе вршиће се применом агар дифузионог теста (*eng. Agar Diffusion Test, ADT*) и колориметријског теста са тетразолијум солима (*eng. MTT test*) коришћењем мишијих фибробласта (L-929) и хуманих фибробласта плућа (MRC-5) у течном медијуму. Морфологија и адхезија ћелија на површини биће анализирана применом СЕМ.

Испитивање површинског модула еластичности и тврдоће пре и након УВП поступка, као и након површинске наноструктурне модификације, биће урађено применом теста наноиндентације (*eng. Nanoindentation test*). По потреби, анализа деформисања и оштећења или лома наноструктурног оксидног слоја након наноиндентације урадиће се применом СЕМ. Испитивање затезних својстава металних биоматеријала биће урађено применом микро затезних епрувета (*eng. Micro Tensile Specimens*) правоугаоног попречног пресека. Током испитивања затезањем, примениће се метода стереометријског мерења деформација на површини узорка до коначног лома епрувете, применом система *Aramis* који подразумева снимање помоћу две камере и обраду резултата у одговарајућем софтверском пакету. Тумачење преломних површина микро епрувета након теста затезањем урадиће се применом СЕМ.

Метода коначних елемената (МКЕ, *eng. Finite Element Method, FEM*) је нумеричка метода која се користи у многим инжењерским областима, укључујући анализу понашања материјала и структура изложених дејству статичког и динамичког оптерећења. Резултати прорачуна МКЕ омогућавају одређивање величина које је тешко или немогуће одредити експериментално, као и смањење обима експерименталних испитивања. У овој докторској дисертацији, МКЕ ће се пре свега користити за предвиђање понашања материјала на бази титана са наноструктурним оксидним слојевима на површини, изложених спољном оптерећењу.

Нумеричка анализа деформисања материјала на бази титана са наноструктурним оксидним слојем, изложених наноиндентацији, ће бити урађена применом дводимензионалних (2Д) и

тродимензионалних (3Д) модела у лиценцираном софтверском пакету Abaqus. Тродимензионални модели у пуној мери узимају у обзир просторну морфологију површинског наноструктурног оксидног слоја, али подразумевају веома велики број коначних елемената и дуготрајне прорачуне. Поједностављени 2Д модели у равном стању деформације ће бити примењени у анализи утицаја морфологије наноструктурног оксидног слоја на отпорност према дејству спољног оптерећења, изражену преко модула еластичности и тврдоће. Са друге стране, комплексним 3Д моделима ће се предвидети утицај просторне расподеле наноцеви (од којих се састоји површински наноструктурни оксидни слој) на добијене резултате. Одредиће се критеријуми отказа површинског наноструктурног оксидног слоја, пре свега механизмом кртог лома. Дискутоваће се утицај величине коначних елемената на резултате прорачуна, као и њихове формулације: биће коришћени елементи континуума, љуске или греде, са различитим редом интерполације и нумеричке интеграције. У нумеричкој анализи испитивања епрувета за затезање, посебна пажња ће се посветити локалном израженом пластичном деформисању и развоју лома у области појаве врата. Размотриће се утицај правоугаоног попречног пресека на нехомогеност напонског стања у поређењу са цилиндричном геометријом епрувете.

5. Очекивани научни допринос

Очекује се да ће испитивања металних биоматеријала на бази титана након УВП поступка и након површинске наноструктурне модификације, дати значајан научни допринос, који се огледа у следећем:

- развијеним новим ситнозрним металним биоматеријалима са електрохемијски модификованим површинским слојем;
- одређивању утицаја УВП поступка на морфологију наноструктурно модификоване површине;
- дефинисању утицаја времена електрохемијске анодизације, на димензије наноцеви и морфологију оксидног површинског слоја;
- одређивању утицаја површинске модификације на корозиону постојаност испитиваних биоматеријала у средини која симулира услове у људском организму;
- постизању значајно мањих вредности модула еластичности у површинском слоју биоматеријала у поређењу са биоматеријалом без наноструктурне модификације;
- утврђивању утицаја површинске наноструктурне модификације на затезна својства и механизам оштећења и лома испитиваних биоматеријала;
- развијеним нумеричким моделима применом методе коначних елемената, за одређивање утицаја морфологије наноструктурног оксидног слоја (дефинисане димензијама и распоредом наноцеви) на вредности механичких и физичких својстава у површинском слоју;
- развијеним материјалима побољшане биокompatibilности са постигнутом одговарајућом хлапавости површинског слоја;
- процени могућности имплантације површински наноструктурно модификованих материјала у људски организам на основу тестова цитотоксичности и визуализације и испитивања адхезије ћелија на површини.

Истраживања која ће бити урађена, треба да покажу да се применом површинске наноструктурне модификације добијају нови имплантни материјали побољшаних биолошких, физичких и механичких својстава, што би представљало крупан напредак у развоју металних биоматеријала. Наведено се односи како на ситнозрне материјале на бази титана добијене описаним УВП поступком - што јесте примарни допринос у горе наведеним ставкама, тако и на одговарајуће полазне - крупнозрне материјале који ће такође бити електрохемијски третирани ради постизања наноструктурне површине.

6. План истраживања и структура рада

На почетку ће бити дефинисани параметри поступка за формирање наноструктурне површине код крупнозрних и ситнозрних материјала на бази титана, применом електрохемијске анодизације. У наставку, даљим испитивањима ће бити подвргнуте следеће групе материјала: крупнозрни материјали добијени конвенционалним методама и ситнозрни материјали добијени УВП поступком и поменути материјали након површинске наноструктурне модификације. Испитивања ће обухватити: карактеризацију површине и процену топографије и храпавости површине материјала, електрохемијска испитивања, *in vitro* тестове цитотоксичности и испитивања морфологије и адхезије ћелија на површини имплантних металних материјала, испитивања наноиндентацијом, тестове затезањем и нумеричку анализу деформисања материјала на бази титана.

Докторска дисертација ће обухватати следећа поглавља: *Увод, Теоријски део, Експериментални део, Резултати и Дискусија, Закључак и Литература.*

У поглављу *Увод* ће бити дато образложење предмета и циљева истраживања, као и научни допринос.

У оквиру *Теоријског дела* биће приказани најновији – релевантни литературни подаци везани за проблематику предложене дисертације. С обзиром на то да људски организам и ткива представљају изузетно захтевно окружење за прихватање металних материјала, биће дат преглед карактеристика које материјали на бази титана треба да поседује да би били погодни за употребу у медицини. Развој металних материјала, осим што подразумева модификације микроструктуре применом метода интезивног пластичног деформисања, често захтева и модификацију површине ради добијања наноструктурне морфологије. На основу тога, у раду ће бити дат преглед садашњег стања производње и могућих модификација биоматеријала у циљу добијања бољих карактеристика металних имплантата.

У поглављу *Експериментални део* докторске дисертације биће описани материјали и методе, према редоследу експерименталног истраживачког рада. Прво ће бити дат опис поступка добијања материјала на бази титана ситнозрне микроструктуре применом УВП поступка. Након тога ће бити дат опис експерименталног поступка добијања наноструктурне површине на крупнозрним и ситнозрним материјалима на бази титана, применом електрохемијске анодизације. Биће описане методе карактеризације материјала на бази титана, електрохемијска испитивања, испитивања цитотоксичности, морфологије и адхезије ћелије на површини материјала на бази титана. У наставку ће бити дат приказ метода испитивања физичких и механичких својстава, односно тест наноиндентацијом и тест затезањем којима ће бити подвргнути материјали на бази титана са наноструктурном површином, ради поређења са материјалима добијеним конвенционалним поступцима израде и УВП поступком. Биће дат приказ стереометријског система мерења, којим ће се пратити тродимензионално поље деформација током оптерећења затезних епрувета до лома.

Добијени резултати ће бити приказани и дискутовани у поглављу *Резултати и Дискусија*.

У поглављу *Закључак* биће сумирани добијени резултати са освртом на предности и могућност примене биокомпатибилних материјала са наноструктурном површином и са назначеним простором за даља унапређења.

7. Закључак и предлог

На основу изложеног Комисија сматра да је тема докторске дисертације под насловом „Површинска наноструктурна модификација и карактеризација материјала на бази титана за примену у медицини“ коју је предложила Драгана Р. Барјактаревић, мастер инж. технологије, научно заснована и да представља значајан допринос научној области Технолошко инжењерство за коју је Технолошко-металуршки факултет Универзитета у Београду матична

установа. Ужа научна област предложене теме је Инжењерство материјала. Комисија предлаже Наставно-научном већу Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду да кандидату Драгани Р. Барјактаревић одобри израду докторске дисертације под наведеним насловом. За менторе докторске дисертације Комисија предлаже др Марка Ракина, редовног професора Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду и др Вељка Ђокића, научног сарадника, Иновационог центра Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду.

У Београду, 20.12. 2018.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

.....
Др Марко Ракин, редовни професор,
Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет

.....
Др Вељко Ђокић , научни сарадник,
Универзитета у Београду, Иновациони центар Технолошко-металуршког факултета

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

.....
Др Ивана Цвијовић-Алагић, научни сарадник
Универзитета у Београду, Институт за нуклеарне науке Винча

.....
Др Ђорђе Вељовић, доцент,
Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет

.....
Др Бојан Међо, доцент,
Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет