

Образац 2.

Факултет Машински

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

Веће научних области техничких наука
(Назив стручног већа коме се захтев упућује, сагласно

1072/5

члану 6. и чл. 7 став 1. овог правилника)

(Број захтева)

20.08.2012. године

(Датум)

ЗАХТЕВ

за давање сагласности на реферат о урађеној докторској дисертацији

Молимо да, сходно члану 46. ст. 5 тач. 4. Статута Универзитета у Београду („Гласник Универзитета“, број 131/06), дате сагласност на реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата:

КАТАРИНЕ (ГОРАН) ЧОЛИЋ, рођ. БОЈИЋ

(име, име једног од родитеља и презиме)

КАНДИДАТ **КАТАРИНА (ГОРАН) ЧОЛИЋ, рођ. БОЈИЋ**

(име, име једног од родитеља и презиме)

Пријавио је докторску дисертацију под називом:

АНАЛИЗА ОТПОРНОСТИ НА ЛОМ БИОМАТЕРИЈАЛА ЗА ВЕШТАЧКИ КУК

Универзитет је дана 16.04.2010. год. својим актом под бр. 020-1212/4-2/10 дао сагласност на предлог теме докторске дисертације која је гласила:

АНАЛИЗА ОТПОРНОСТИ НА ЛОМ БИОМАТЕРИЈАЛА ЗА ВЕШТАЧКИ КУК

Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата: **КАТАРИНЕ (ГОРАН) ЧОЛИЋ, рођ. БОЈИЋ**
(име, име једног од родитеља и презиме)

Образована је на седници одржаној 07.06.2012. године, одлуком факултета под бр. 1072/2, у саставу:

Име и презиме члана комисије	звање	научна област	установа у којој је запослен
1. Др Александар Седмак	Ред. професор	Технологија мат.- Маш.матер. и заваривање	Машински факултет Београд
2. Др Александар Вег	Ред. професор	Теор. механизма и машина и Инжењерско цртање са нацрт. геометријом	Машински факултет Београд
3. Др Марко Ракин	Ванр. професор	Инжењерство материјала	ТМФ Београд
4. Др Вера Шијачки-Жеравчић	Ред. професор	Технологија мат.- Маш.матер. и заваривање	Машински факултет Београд
5. Др Борислав Дулић	Ред. проф. у пензији	Ортопедија	Медицински факултет Београд

Наставно-научно веће факултета прихватило је извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације на седници одржаној дана 12.07.2012. године.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

Проф.др Милорад Милованчевић

Прилог: 1. Извештај комисије са предлогом.

2. Акт Наставно-научног већа факултета о усвајању извештаја.

3. Примедбе дате у току стављања извештаја на увид јавности,
уколико је таквих примедби било.

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ –
Број: 1072/4
Датум: 12.07.2012. године
Београд, Краљице Марије 16

На основу чл. 30. Закона о високом образовању (Сл.гласник 76/05, 100/07 и 44/10) и чл. 37. Правилника о докторским студијама Машинског факултета Универзитета у Београду и извештаја Комисије у саставу: проф.др Александар Седмак, ментор, проф.др Александар Вег, проф.др Марко Ракин, ТМФ Београд, проф.др Вера Шијачки-Жеравчић, др Борислав Дулић, ред.проф. Медицинског факултета Београд у пензији о оцени докторске дисертације „Анализа отпорности на лом биоматеријала за вештачки кук“ докторанта Катарине Чолић, дипл.инж.маш., Наставно-научно веће Машинског факултета на седници одржаној 12.07.2012. године, донело је следећу

ОДЛУКУ

Усваја се извештај за оцену и одбрану докторске дисертације **„АНАЛИЗА ОТПОРНОСТИ НА ЛОМ БИОМАТЕРИЈАЛА ЗА ВЕШТАЧКИ КУК“** докторанта **КАТАРИНЕ ЧОЛИЋ**, дипл.инж. маш.

Одобрава се одбрана докторске дисертације, пошто је докторска дисертација са извештајем Комисије за оцену и одбрану била стављена на увид јавности у трајању од 30 дана, па како је после свих разматрања на ННВ М.Ф. на крају извештај Комисије коначно усвојен, доставља се Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду да да сагласност на извештај о урађеној докторској дисертацији.

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

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

Проф.др Милорад Милованчевић

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

Предмет: Извештај о завршеној докторској дисертацији **Катарине Г. Чолић, дипл. инж. маш.**, студента докторских студија

Одлуком Наставно-научног већа Машинског факултета Универзитета у Београду број 1072/2 од 07.06.2012. године именовани смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације Катарине Чолић под насловом "Анализа отпорности на лом биоматеријала за вештачки кук", о којој подносимо следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. УВОД

1.1 Наслов и обим докторске дисертације

Докторска дисертација кандидата Катарине Чолић, дипл. инж. маш., под насловом „Анализа отпорности на лом биоматеријала за вештачки кук“ изложена је на 250 страна у оквиру осам поглавља, списак коришћене и цитиране литературе на 10 страна.

1.2 Хронологија одобравања израде дисертације

Кандидат Катарина Чолић, дипл. инж. маш., завршила је докторске студије на Машинском факултету Универзитета у Београду 2008.год. и пријавила је израду докторске дисертације 28.12.2009. године. под бројем 2377/1 Катедри за технологију материјала Машинског факултета у Београду, а за ментора предложила редовног професора др Александра Седмака. Научно-наставно веће је на основу сагласности Катедре за технологију материјала бр. 255/1 од 16.02.2010, на седници 18.02.2010, донело одлуку бр. 255/2, о формирању Комисије за оцену испуњености услова кандидата и научне заснованости теме докторске дисертације у саставу проф. др Александар Седмак, проф. др Вера-Шијачки Жеравчић, ван. проф. др Марко Ракин, са Технолошко–металуршког факултета у Београду. Комисија за оцену испуњености услова кандидата и научне заснованости теме докторске дисертације је 01.03.2010. год. поднела Наставно-научном већу Машинског факултета у Београду извештај бр. 255/3 о испуњености услова за одобрење тезе. Комисија је поднела извештај у коме предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета у Београду да одобри тему докторске дисертације под радним називом „Анализа отпорности на лом биоматеријала за вештачки кук“ наводећи да кандидат испуњава законске услове за израду докторске дисертације, и да предложена тема као актуелна, атрактивна и значајна, може бити тема докторске дисертације. У вези са захтевом докторанта Катарине Чолић, дипл. инж. маш. да се одобри израда докторске дисертације, одлуке Наставно-

научног већа Машинског факултета од 04.03.2010. год. о испуњености услова кандидата за израду докторске дисертације и о именовању ментора, на седници одржаној 16.04.2010. године Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду дало је сагласност којом се одобрава рад на теми докторске дисертације „Анализа отпорности на лом биоматеријала за вештачки кук“, под менторством редовног професора др Александра Седмака (одлука бр. 020-1212/4-2/10). Усвајањем Извештаја Наставно-научног већа Машинског факултета о испуњености услова кандидата за израду докторске дисертације и о именовању ментора, а на основу сагласности Већа научних области техничких наука Универзитета у Београду са седнице од 16.04.2010., декан Машинског факултета у Београду је 17.04.2010. год. донео закључак бр. 255/5 да се одобри рад на теми докторске дисертације „Анализа отпорности на лом биоматеријала за вештачки кук“ кандидату Катарини Чолић. За ментора дисертације је именован проф. др Александар Седмак. На основу члана 30 Закона о високом образовању и члана 24 Правилника о докторским студијама Машинског факултета Универзитета у Београду, Наставно-научно веће Машинског факултета, на седници одржаној 15.09.2011. године донело је одлуку бр. 2435/1 о продужењу рока за израду докторске дисертације.

О завршетку докторске дисертације „Анализа отпорности на лом биоматеријала за вештачки кук“, ментор др Александар Седмак, ред. проф. обавестио је Катедру за технологију материјала, као и Наставно-научно веће Машинског факултета у Београду, дописом број 1072/1 од 05.06.2012. Предложена је Комисија за оцену и одбрану рада у саставу: ментор, проф. др Александар Седмак, проф. др Александар Вег, ван. проф. др Марко Ракин, са Технолошко Металуршког факултета у Београду, проф. др Вера Шијачки-Жеравчић и проф. др Борислав Дулић, проф. Медицинског факултета у Београду у пензији.

На основу наведеног извештаја ментора проф. др Александра Седмака, од 05.06.2012, бр. 1072/1, да је докторант Катарина Чолић завршила докторску дисертацију под називом "Анализа отпорности на лом биоматеријала за вештачки кук", предлога Катедре за технологију материјала и члана 30. Закона о високом образовању, Наставно-научно веће Машинског факултета је на седници од 07.06.2012. године једногласно усвојило обавештење о завршетку дисертације кандидата и донело одлуку број 1072/2 од 07.06.2012. године о именовању предложене Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације.

1.3 Место дисертације у одговарајућој научној области

Докторска дисертација „Анализа отпорности на лом биоматеријала за вештачки кук“ припада области техничких наука, односно машинству, односно ужој научној области Наука о материјалима, механика лома.

1.4 Биографски подаци о кандидату

Катарина Чолић, девојачко презиме Бојић, рођена је 17.5.1977. године у Београду. Основну школу Краљ Петар I и III београдску гимназију завршила је у Београду. Дипломирала је на Машинском факултету Универзитета у Београду 2006. године на Катедри за Хидроенергетику, са просечном оценом оценом 8,38 (осам и тридесет осам). Одбранила је дипломски рад са оценом 10 (десет) на тему "Системи пнеуматског транспорта и прорачун система са низ струјним повећањем пречника" код проф. др Цветка Црнојевића. Докторске студије уписала је на Машинском факултету Универзитета у Београду 2006. године.

Запослена је у звању истраживач-сарадник у Иновационом центру Машинског факултета у Београду од 2006. године. Бави се научно-истраживачким радом у области машинског и биомедицинског инжењерства, пре свега у области примене биоматеријала и примене нумеричких метода у машинском инжењерству. Током досадашњег рада овлада је коришћењем нумеричких програма за моделирање и анализу понашања различитих чврстих тела и структура методом коначних елемената, пре свега програмом Abaqus. Кандидат активно примењује у раду рачунарске алате који укључују добро познавање апликација за дизајн у машинству, као што су Catia и Solid Works, као и основно познавање програмских језика Visual

Basic, C++ и C#. Користи енглески језик на конверзацијском нивоу, а на основном нивоу влада немачким и шпанским језиком. Овладала је теоријским и практичним знањем из области понашања материјала и примене нумеричких метода.

Током докторских студија у Катарина Чолић је била ангажована као сарадник у извођењу наставе на следећим предметима додипломских и дипломских студија на Машинском факултету Универзитета у Београду: Методе коначних елемената 2 (предметни наставник проф. др Александар Седмак), Биоматеријали 2 (предметни наставник проф. др Александар Седмак), Интегритет и век конструкција (предметни наставник проф. др Александар Седмак) и Мехатроника (предметни наставник проф. др Александар Вег). Током школске 2011/2012 године ангажована је на предметима Методе коначних елемената и Биоматеријали у медицини и стоматологији, на којима је предметни наставник проф. др Александар Седмак.

У досадашњем стручном и истраживачком раду Катарина Чолић учествовала је у више националних и међународних пројекта, укључујући пројекте које је финансирало Министарство за науку. Током досадашњег истраживања била је ангажована као сарадник на неколико међународних пројеката, а неки од њих су „Eureka E!4573 On line monitoring of structures and fatigue PRO-FACTORZ GPMS“, „Eureka E!4040 Assessment of mechanical recycling technologies for plastic“. Сарадник је на иновационим пројектима и пројектима технолошког развоја, а неки од пројеката на којима је од сада учествовала су „Пројектовање и израда уређаја за рану дијагностику пигментних кожных уређаја и меланома“ (ТР6349), „Развој биолошки мотивисаних контролних и сензорских система и израда студијског прототипа ножног помагала“, (ТР 20152), „Истраживање и развој нове генерације мини денталних имплантата“, иновациони пројекат. Тренутно је ангажована као сарадник на пројекту „Развој савремених метода дијагностике и испитивања машинских структура“ одобреног од стране Министарства за просвету и науку републике Србије под евиденционим бројем TR 35040.

Кандидат је активни члан у неколико професионалних асоцијација: ДИВК (Друштво за интегритет и век конструкција), IFTOMM (International Federation for the promotion of the Theory of Machines and Mechanisms). У току досадашњег усавршавања Катарина Чолић учествовала је на неколико стручних курсева и семинара, а неки од њих су:

- [1] International workshop Structural Integrity Assessment and Residual Life Time, University of Maribor, Slovenia, 5-7July, 2010.
- [2] Семинар из Механике лома у организацији ДИВК-а, Златибор, 2008.
- [3] Курс из коришћења нумеричког програмског пакета “ABAQUS - Finite element program for modeling and analysis of the behavior of solids and structures”, Универзитет у Београду, Технолошко-Металуршки Факултет, Београд, 2008.
- [4] Семинар “Numerical Methods in Engineering” Универзитет у Београду, Машински факултет, у организацији TU Erlangen-Nürnberg and DAAD, 2006.

Катарина Чолић је на основу досадашњих истраживања и испитивања, објавила више научних и стручних радова. Аутор је и коаутор на више од **20** радова који су саопштени на научним скуповима или објављени у часописима различитих категорија.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Структура и садржај дисертације

Докторска дисертација кандидата Катарине Чолић, дипл. инж. маш., под насловом „Анализа отпорности на лом биоматеријала за вештачки кук“ је документ формата А4, штампан једнострано, са текстом на српском језику и изложена је на 250 нумерисаних страна. У оквиру дисертације материја је приказана у укупно осам поглавља, списак ознака дат је на почетку рада, док је списак коришћене литературе дат као девето поглавље. На почетку рада дат је продужени резиме рада на српском и енглеском језику, а на крају биографски подаци кандидата.

Дисертација садржи следећих осам поглавља:

- 1) Увод
- 2) Идентификација проблема отказа протеза за замену кука
- 3) Механика деформације металних биоматеријала
- 4) Експериментални приступ у анализи параметара механике лома металних биоматеријала
- 5) Експериментална испитивања механичких карактеристика тоталне протезе вештачког кука
- 6) Примена методе коначних елемената за нумеричко моделирање понашања биоматеријала у протезама за вештачки кук
- 7) Анализа и дискусија добијених експерименталних и нумеричких резултата
- 8) Закључак

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

Докторска дисертација „Анализа отпорности на лом биоматеријала за вештачки кук“ састоји се из осам поглавља.

Прво поглавље представља увод у коме су приказана почетна разматрања која обухватају предмет истраживања и стање науке у предметној области. Предмет ове докторске дисертације односи се на истраживање, испитивање и анализу отпорности на лом биоматеријала који се користе за израду тоталних протеза вештачког кука. У оквиру овог поглавља дат је кратак приказ проблема који доводе до потребе за операцијом замене зглоба и кратак историјски осврт на проблематику развоја замене људског кука тоталним протезама, односно имплантима. У уводном поглављу дат је историјски приказ успешности постављања тоталне протезе и проблематике отказа ортопедских импланта услед лома, као и кратак осврт на историју развоја механике лома. У оквиру овог поглавља дат је и преглед актуелних приступа пројектовања и истраживања протеза за тоталну замену кука. Образлаже се значај истраживања биоматеријала коришћених код тоталних протеза, са посебним освртом на правце развоја нових материјала за ове импланте. Кандидат на бази сакупљених и обрађених података дефинише предмет истраживања и детаљно образложе циљеве и научне методологија решавања постављених задатака.

У другом поглављу дефинисани су основни појмови неопходни за проучавање проблематике израде и постављања тоталних протеза и идентификовани су најугроженији фактори који доводе до настанка прслине и потпуног отказа ових импланта. У оквиру овог поглавља кандидат на бази сакупљених и обрађених података уочава проблеме постојећих решења протеза за тоталну замену кука и дефинише који су најугроженији чиниоци који доводе до лома. Примећено је да су у ортопедским применама, попут протеза колена и кука, лом услед замора и хабање идентификовани као највећи проблеми који су повезани са разлабављењем импланта и коначним отказом импланта. Протезе зглобова имају, уопште узевши, краткорочни успех, пошто биолошки и механички конфликти често узрокују отказ имплантата. Постоји пуно потенцијалних проблема који могу утицати на дугорочни исход операције, након што је урађена имплантација. Протезе зглобова направљене од легура титана осетљиве су на многе механизме оштећења. Током хируршке процедуре и рада са протезом неминовно ће доћи до појаве огреботина на њеној површини, што може узроковати локације за појаву прслине. У оквиру овог поглавља дата је детаљна анализа постојећих типова протеза за тоталну замену зглоба кука, постојеће методе израде и фиксације протеза, као и кратак приказ карактеристичних биоматеријала који се примењују при изради ових протеза. Такође, у оквиру овог поглавља образложени су разлози за постизање и осигурање интегритета тоталних протеза за замену зглоба, са тачке гледишта хирурга и инжењера.

У трећем поглављу дефинисане су основне величине од којих се полази у проучавању структуралних и механичких карактеристика металних биоматеријала и постављене су физичко-математичке основе неопходне за укупну научно-стручну структуру рада. У овом поглављу дат је и систематизован приказ најзначајнијих карактеристика металних биоматеријала које ће бити предмет истраживања у дисертацији. Наведене су групе три

карактеристична метална биоматеријала, који су развијени за примену у биомедицинским апликацијама и чије су захтеване особине дефинисане одговарајућим стандардима. Метални материјали се у биомедицинским применама сматрају биоматеријалима, пошто се уводе у биолошко окружење. У зависности од регије у коју се имплантирају и функције коју ће обављати, увелико се разликују особине које ови биоматеријали треба да имају. Три класе материјала које се најчешће користе за израду импланата за замену зглобова су нерђајући челик, легуре титана и Co-Cr легуре. Такође, описане су и методе испитивања механичких карактеристика металних биоматеријала. Класичне методе испитивања металних биоматеријала и данас се користе и добро су познате, а углавном се ради о подацима који се добију затезним и ударним испитивањима. Истакнуто је да практичној примени биоматеријала као конструкцијских материјала у медицинским апликацијама треба да претходи детаљно проучавање њихових механичких и експлоатацијских својстава, како би се сигурност делова биомедицинске конструкције, а тиме и конструкције у целини, обезбедила на нивоу већ достигнуте сигурности, или чак и побољшала.

У оквиру четвртог поглавља дате су оновне поставке механике лома и дефинисани карактеристични параметри непоходни за одређивање отпорности на лом металних биоматеријала. Параметри механике лома, односно мера чврстоће материјала у присуству прслине коначне величине у подручју важења Хуковог закона (линеарно-еластична механика лома - ЛЕМЛ) је критични фактор интензитета напона K_{Ic} . У еластопластичном подручју (ЕПМЛ), механика лома је усмерена на праћење раста прслине после прекорачења напона течења. Описано је напонско поље око врха прслине у изотропном, линеарно-еластичном телу и дате су основне једначине за дефинисање фактора интензитета напона у три карактеристична случаја - модови I, II и III. Представљени су и услови под којима се линеарно еластична механика лома може применити у пројектовању биомедицинских импланата. Такође су приказане и стандардне процедуре за експериментално одређивање жилавости лома при РСД, при чему је у овом поглављу посебно анализирана механика лома три карактеристична метална биоматеријала који се најчешће примењују за израду фемурске основе вештачког кука, односно челика 316L, Ti-легура и CoCr-легура. У оквиру овог поглавља приказана су и оригинална експериментална мерења настанка и раста прслине у изабрана два типа биоматеријала карактеристичних за пројектовање носећих структура у ортопедским имплантима. Параметри пројектовања, које треба разматрати у вештачким имплантима су и параметри механике лома, па је стога неопходно разумевање појаве иницијације прслине и њеног даљег ширења, ради спречавања катастрофалног лома импланта. Истражено је понашање лома нерђајућег челика 316L и титанове легуре Ti-6Al-4V, применом стандардних испитивања механике лома изведених на модификованим СТ епруветама. Дат је детаљан опис поступака испитивања, као и коришћене експерименталне инсталације. Оптички систем GOM и Aramis софтвер примењени су за извођење тродимензионалне експерименталне оптичке анализе испитиваних епрувета. Осим тога, пошто су легуре титана веома осетљиве на замор услед зареза, извршена су стандардна експериментална испитивања теста кидања са оштрим зарезом.

У оквиру петог поглавља дефинисани су критеријуми анализе механичких карактеристика тоталне протезе вештачког кука током експлоатације. У том смислу, проучавање понашања биоматеријала који се користе за израду тоталних протеза вештачког кука под дејством спољашњег оптерећења има важну улогу у обезбеђивању интегритета и сигурног рада импланта. Нарочито је важно дефинисати под којим условима долази до њиховог лома и који фактори утичу на динамику губитка носивости. Потребно је познавати поље напона и деформација које настаје дејством релевантних оптерећења која се јављају на импланту током циклуса ходања, и то пре свега на местима концентрације напона и у околини врха прслине. У том циљу у оквиру овог поглавља је приказана детаљна анализа делујућих сила на имплант кука, које се јављају као последица различитих активности људског тела. Такође су приказане и основне поставке анализе биомеханике кука, да би се објаснила оптерећења која делују на имплант. Анализирани су различити случајеви оптерећења и дефинисане су критичне вредности и правци деловања оптерећења код импланта за тоталну замену кука. У оквиру овог поглавља дефинисана је матрица оптерећења за услове нормалне експлоатације и екстремне случајеве. Такође су у овом поглављу дефинисане и методе испитивања понашања ортопедских импланата прописане стандардима. Најчешћи стандард који се примењује за одређивање отпорности феморалних компоненти протеза кука је ISO 7206, којим се прописују лабораторијски тестови. У овом поглављу приказана су оригинална експериментална мерења

понашања искоришћених импланата под дејством изабраних критичних вредности оптерећења у складу са дефинисаним стандардом. Детаљно су описани експериментална инсталација и програм мерења, који су обухватили примену савремених мерних система за тродимензионално бесконтактно мерење поља деформација. У циљу извођења експерименталних испитивања, израђен је адаптер, као оригинални део инсталације за испитвање импланата. Разматрани су принципи мерења, методе калибрације, као и проблеми који се могу јавити при мерењу понашања компликованих геометрија. Предложена је методологија испитивања механичког понашања материјала, код компликованих геометрија које су честе у биомедицинским апликацијама.

У оквиру шестог поглавља анализира се примена методе коначних елемената (МКЕ) у симулацији понашања импланата тоталне протезе кука под карактеристичним оптерећењем. У том смислу потребно је дефинисати поуздан нумерички модел који даје резултате блиске добијеним експерименталним вредностима. Услед постојања првобитних одступања нумеричких од експерименталних вредности, нумерички модели су побољшани и дорађени, након чега су урађени поновни прорачуни. Геометрија импланта се у овој фази се није мењала, али су урађена побољшања мреже коначних елемената, у смислу већег броја чворова и елемената и одабира другог типа коначног елемента, и редефинисани су гранични услови. У анализи структуре применом МКЕ, избор типа коначног елемента и густине мреже, као и правилно дефинисање карактеристика материјала и граничних услова, од пресудног су значаја за тачност прорачуна. Такође су у оквиру овог поглавља дате основне дефиниције и претпоставке које су потребне за разумевање и примену методе коначних елемената. У оквиру овог поглавља приказани су оригинални нумерички модели добијени применом МКЕ. Приказан је поступак израде модела, у првом кораку применом савремене опреме за дигитализацију реалних модела импланата оптичким скенером ATOS и даљом припремом солид модела који су коришћени у даљем нумеричком прорачуну. Такође је приказана израда нумеричких модела импланта урађених у програмском пакету за МКЕ ABAQUS, а прслине су уведене применом корисничких потпрограма које овај софтвер подржава. У симулацији ширења прслине класичне МКЕ су веома ограничене услед потреба за креирањем нове мреже након сваког корака ширења. При моделирању проблема ширења прслине у материјалу, коришћене су најсавременије технике моделирања које подразумевају примену проширене методе коначних елемената, у оквиру потпрограма које коришћени софтвер подржава.

У седмом поглављу дат је приказ укупних научних резултата остварених у оквиру дисертације. Приказани су и анализирани оригинално добијени експериментални и нумерички резултати истраживања који се односе на уочене проблеме и постављене циљеве. Дакле, приказани су оригинални експериментални резултати добијања параметара механике лома према стандардним мерењима применом модификованих СТ епрувета и епрувета са зарезом. Извршена је и упоредна анализа добијених параметара, а резултати су приказани табеларно и дијаграмски. Такође, приказани су резултати поља деформација током отварања врха прслина и лома на анализираним епруветама од нерђајућег челика и титан легура, добијени применом релевантног софтвера. Резултати показују да примењена оптичка стереометријска метода мерења даје добре резултате у истраживању понашања лома металних биоматеријала. У оквиру овог поглавља приказани су и анализирани оригинално добијени резултати након експерименталних мерења импланата од легуре титана, применом методологије испитивања базиране на модификацији стандарда за тестирање биомедицинских протеза. Како би се анализирано механичко понашање протезе под реалним физиолошким оптерећењем, услови експеримента су базирани на ISO 7206 стандарду, али су примењена максимална оптерећења на импланту, која се могу јавити *in vivo*, те је приказана и упоредна анализа са резултатима мерења добијених применом оптерећења која су прописана стандардом. У оквиру овог поглавља приказани су и анализирани оригинални нумерички резултати добијени након симулације оптерећења на израђеним виртуалним моделима, који су верификовани поклапањем поља деформација са експериментално измереним вредностима. Дати су примери дводимензионалне и тродимензионалне симулације оптерећења импланта и ширења прслине применом МКЕ. Такође су табеларно и дијаграмски приказане вредности нумерички добијених параметара механике лома биоматеријала применом МКЕ софтверског пакета. У оквиру овог поглавља приказани су и резултати анализе оригиналног тродимензионалног модела добијени применом проширене методе коначних елемената за симулацију ширења прслине у материјалу до

коначног отказа протезе. За симулацију раста прслине и добијање параметара жилавости лома је коришћен подпрограмски пакет који подржава софтвер ABAQUS.

У оквиру осмог поглавља сагласно претходно дефинисаним циљевима истраживања и добијеним резултатима сублимирају се стручни и научни доприноси остварени у тези. Такође, наводе се главни резултати као потврда постављених хипотеза на почетку истраживања. На основу ових података, у овом поглављу дати су закључци дисертације и указано је на могуће правце даљих истраживања.

3. Оцена дисертације

3.1. Савременост, оригиналност и значај

Докторска дисертација „Анализа отпорности на лом биоматеријала за вештачки кук“ представља савремен и оригиналан допринос разматраној проблематици лома ортопедских импланата услед постојања прслина у материјалу. У оквиру докторске дисертације примењени су савремени истраживачки поступци и лабораторијска мерења уз коришћење најновијих софтверских решења за нумеричке симулације.

Механика деформације биоматеријала се може анализирати применом различитих метода, базираних на контактним или неконтактним шемама за мерење померања, при чему се нове оптичке стереометријске методе све чешће користе у истраживању механичког понашања биоматеријала. У складу са модерним истраживачким трендовима, кандидат у дисертацији примењује најсавременије бесконтактне методе експерименталне анализе биоматеријала базиране на тродимензионалној оптичкој методологији мерења. Применом ове методе омогућена је тродимензионална анализа површинских деформација, при чему мерни системи проучавају реалну геометрију компоненте, што није могуће користећи традиционалне мерне уређаје. У оквиру дисертације приказани су поступци лабораторијских мерења који укључују тродимензионалну експерименталну оптичку анализу карактеристичних металних биоматеријала и испитивање поља деформација у имплантима, при чему су коришћени GOM оптички систем и софтвер Aramis. Применом савремених експерименталних методологија мерења омогућена је верификација резултата добијених нумеричким приступом. При изради нумеричких модела примењени су најсавременији софтверски пакети, при чему су почетни виртуелних модели добијени применом оптичког скенера Atos у циљу дигитализације реалних узорака вештачког кука. Нумерички прорачуни су спроведени применом MKE у софтверском пакету Abaqus, и одговарајућих подпрограма.

Приступ кандидата је оригиналан јер се у тези дају поступци анализе и експерименталног одређивања отпорности на лом карактеристичних биоматеријала који се користе за израду ортопедских импланата, применом нових оптичких метода мерења на стандардно дефинисаним епруветама, али и на реалним конструкцијама импланта. У оквиру тезе приказани су резултати испитивања добијени праћењем поља деформација и померања применом бесконтактне оптичке методе на три узорка протезе кука који су уклоњени из пацијента након ревизије, што је први овакав случај анализе у литератури. Како би се извршио овај експеримент, поред HB250 машине за тестирање коришћен је оригинално израђен адаптер за учвршћење импланта, као део оригиналне експерименталне инсталација у циљу што адекватније симулације услова фиксације и оптерећења који се срећу код протеза кука.

Оригиналност добијених резултата у оквиру дисертације потврђују радови који су публиковани и саопштени на научним скуповима или објављени у часописима. Дисертација се може оценити веома успешном, узевши у обзир да су добијене резултате у тези пратили зрели научни и инжењерски закључци.

Истраживања у области понашања материјала у биомедицинским апликацијама су веома значајна и актуелна. Кандидат даје јасну идентификацију и анализу основних проблема који доводе до потпуног отказа вештачког кука, што представља значајан проблем у

савременом биомедицинском инжењерству. У оквиру дисертације детаљно је обрађено понашање у односу на лом биоматеријала који се користе за израду тоталних протеза вештачког кука, као проблематика која има важну улогу у обезбеђивању сигурног рада импланта. Показано је да је примена тродимензионалне оптичке мерне методе корисна у одређивању неких од кључних особина металних материјала у биомедицинским применама. Дакле, резултати истраживања параметара механике лома и анализе раста прслине у импланту од суштинског су значаја за процену интегритета и века трајања тоталне протезе вештачког кука.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У докторској дисертацији коришћена је обимна литература из области механике лома и понашања металних материјала, нумеричких метода и симулације ширења прслине. Осим тога, узевши у обзир да је дисертација уско повезана са облашћу биомедицине, коришћена литература је обухватила и широк спектар радова из области пројектовања, имплементације и испитивања ортопедских импланта. Ова литература је кандидату послужила као полазна основа за формирање прегледа постојећих истраживања везаних за област отказа услед лома у ортопедским имплантима, као и за припрему експеримената и нумеричких модела.

Од наведених наслова коришћене литературе, више од 35 референци је млађе од десет година, а већина тих радова је из водећих међународних часописа.

3.3. Анализа примењених научних метода и њихова адекватност за спроведено истраживање

У докторској дисертацији је, у циљу истраживања отпорности на лом карактеристичних металних биоматеријала, коришћен већи број савремених научно-истраживачких метода, које су примењиване сходно типу проблема који је решаван. Услед комплексности проблема анализе отпорности на лом биоматеријала у реалним условима оптерећења тоталне протезе вештачког кука, кандидат је у истраживању користио и нумерички и експериментални приступ истраживања.

У складу са класичним експерименталним процедурама дефинисаним стандардима, у оквиру дисертације извршена су лабораторијска испитивања и извршено је израчунавање параметара механике лома. Експериментална испитивања представљена у овој дисертацији обухватила су анализу нерђајућег челика и легура титана као карактеристичних металних материјала за биомедицинске примене. Примењена методологија испитивања базирана је на тродимензионалном оптичком мерном систему, који је примењен за анализу структуралног интегритета и одређивања својстава материјала. Примењени су стандардни тестови из механике лома који су изведени на модификованим СТ епруветама по стандарду ASTM International Standard Test for Materials E18-20-08. Пошто су легуре титана веома осетљиве на замор услед зареза, извршен је и тест кидања са оштрим зарезом. Понашање легуре Ti-6Al-4V при замору је истражено помоћу теста по стандарду ASTM International Standard Test for Materials E338-03. Експерименти су изведени у лабораторији за испитивање материјала на Машинском факултету у Марибору, Словенија (Laboratory for Machine Parts and Structures, Faculty of Mechanical Engineering, University of Maribor).

Даље експерименталне анализе урађене у оквиру дисертације обухватају анализу три типа искоришћених импланта од легуре титана, при чему се методологија испитивања базира на модификацији постојећих стандарда за тестирање биомедицинских протеза. Упркос напретку на пољу пројектовања и тестирања, и даље се срећу ломови стемова кука. Стога је циљ извршеног испитивања био анализа ефекта максималних оптерећења која делују на имплант, а која се могу појавити *in vivo*. Како би се анализирао механичко понашање протезе под физиолошким оптерећењем, методологија примењена у оквиру експерименталних испитивања током израде дисертације базирана је на ISO 7206 стандарду који се користи за

одређивање отпорности феморалних компоненти протеза кука. За експериментално тестирање протеза кука коришћена је машина за серво-хидраулично динамичко и статичко тестирање материјала ZWICK ROELL HB250. За одређивање поља деформација и померања коришћена је GOM опрема за тродимензионално мерење деформација и софтверски систем Agamis. Експерименти су изведени применом мерне опреме лабораторије за Анализу напона и деформација, у лабораторији за испитивање машинских елемената и система Машинског факултета у Београду.

Имајући у виду комплексност проблема анализе отпорности на лом биоматеријала у реалним условима, најефикаснију могућност даљих истраживања у оквиру дисертације дале су нумеричке методе, односно метода коначних елемената. Основни проблем у примени ове методе на решавање проблема раста прслине у биоматеријалу био је у дефинисању услова при којима почиње раст прслине и начина његове симулације. У циљу израде нумеричког прорачунског модела импланта извршена је дигитализација постојећих реалних узорака вештачког кука, који су скенирани оптичким скенером Atos. Кандидат је у оквиру дисертације урадио нумеричке прорачуне у софтверском пакету за прорачун МКЕ ABAQUS. Тежило се изради што гушће а тачније мреже, са вођењем рачуна и о процесорским и меморијским ограничењима компјутера на којима је прорачун спроведен. Метода коначних елемената је одабрана као метод у овом истраживању зато што је помоћу МКЕ могуће описати шта се дешава у одређеној структури при оптерећењу а да се при том истраживање не спроводи *in vivo*, тј. да пацијент није изложен никаквим непријатним или болним методама.

У оквиру докторске дисертације примењене су научне методе моделирања и симулације које су омогућиле анализу реалних проблема у виртуелном окружењу, затим методе коначних елемената за прорачун и добијање параметара механике лома, односно одређивање напонско-деформационог стања и вредности фактора интензитета напона у тачкама фронта прслине. Примењене су методе верификације, засноване на поређењу добијених нумеричких и експерименталних резултата, као и метода експертског мишљења током анализе и тумачења добијених резултата.

3.4. Оцена примењивости и верификације остварених резултата

Добијени резултати у оквиру докторске дисертације поред научне вредности имају и широку практичну примену, пре свега у прорачунима века тоталне протезе вештачког кука код којих постоји могућност појаве прслине у материјалу.

Остварени експериментални резултати омогућавају одређивање приближног места настанка прслине на имплантима анализом поља деформација које се добија применом дефинисане методологије мерења. Нумеричким моделима могуће је постављањем прслине на место највеће вероватноће њене појаве на импланту, одредити отпорност биоматеријала на лом дејством дефинисаног максималног оптерећења. Резултати нумеричких симулација сложене геометријске структуре импланта верификовани су поређењем са експерименталним резултатима.

Методологија експерименталних испитивања дефинисана у оквиру тезе базирана је на примени тродимензионалног оптичког мерног система, методе погодне за анализу неправилних геометрија и предмета израђених од разних материјала, што је често случај у биомедицинским применама. Дакле, принципи поставке експерименталних мерења и добијени резултати које је кандидат приказао су практично применљиви и на основу њих је могућ развој нове методологије за испитивање механичких карактеристика биоматеријала, укључујући реално праћење понашања материјала, при чему је могућа примена методологије и у другим ортопедским или стоматолошким апликацијама.

3.5. Оцена способности кандидата за самостални научни рад

Током израде докторске дисертације кандидат је показао способност за самостални научни рад. Анализом постављених претпоставки и експерименталних резултата приказаних у тези, кандидат је показао да је у стању да самостално решава научне проблеме, као и да успешно влада научним и истраживачким методама. Поседује широко радно и истраживачко искуство, као и потребно теоријско знање за даљи успешан научно-истраживачки рад.

4. ОСТВАРЕН НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ оствареног научног доприноса

Коначан резултат и основни научни допринос истраживања спроведених у оквиру дисертације јесте систематски приказ и потпуно разумевање понашања испитиваних металних биоматеријала и импланата сложене геометрије код којих се јавља прлина и лом под дејством спољног оптерећења. Као основни остварени научни циљ ове дисертације поставља се добијање неопходних параметара у циљу дефинисања отпорности на лом биоматеријала који се примењују у изради тоталне протезе вештачког кука, а зарад добијања што тачнијег предвиђања понашања, интегритета и века импланата.

Остварени научни допринос докторске дисертације „Анализа отпорности на лом биоматеријала за вештачки кук“ је вишеструк:

- врло прегледно је приказана проблематика узрока који доводе до потпуног отказа импланата вештачког кука, у смислу препознавања потребе за анализом појаве прлина у биоматеријалима који се примењују, чиме је јасно указано на актуелност проблема који су решавани у тези;
- експериментално су одређене вредности параметара механике лома код два карактеристична метална биоматеријала за израду вештачког кука, нерђајућег челика S316L и Ti-6Al-4V легуре; дефинисана је методологија испитивања која укључује примену тродимензионалне оптичке анализе за добијање вредности параметара механике лома и поља деформација у материјалу током испитивања са циљем да се једноставније може лоцирати најслабије место у материјалу;
- дефинисана је матрица оптерећења за услове нормалне експлоатације који су дефинисани стандардима, али и за екстремне случајеве оптерећења који се могу јавити код тоталних протеза кука; дате су смернице да је при испитивањима потребно применити максималне реалне вредности које могу да се појаве *in vivo* током циклуса ходања, пошто оптерећења дефинисана стандардима одговарају средњим вредностима;
- експериментално су одређене вредности напонског стања код три импланта вештачког кука који су уклоњени из пацијента након тоталне ревизије, при чему су примењене максималне реалне вредности оптерећења током циклуса ходања;
- дефинисана је методологија испитивања ортопедских импланата модификацијом стандардних препорука, која укључује примену тродимензионалне оптичке анализе за добијање вредности поља деформација у материјалу током испитивања, са циљем да се што једноставније може лоцирати најслабије место у импланту; израђен је адаптер потребан за постављање реалне конструкције тоталне протезе вештачког кука и испитивање импланта на преси према дефинисаном програму испитивања.
- развијени су оригинални тродимензионални прорачунски нумерички модели импланта и употребом одговарајућег МКЕ софтвера добијени су резултати симулације понашања

биоматеријала у имплантима у односу на лом; развијен је оригинални тродимензионални нумерички модел импланта са иницијалном прслином која је потом ширена применом проширене методе коначних елемената и добијене су вредности фактора интензитета напона;

- верификовани су тродимензионални нумерички модели упоредном анализом са експерименталним резултатима; применом верификованих нумеричких модела извршена је процена отпорности на лом биоматеријала за вештачки кук у односу на постојеће услове експлоатације импланта;
- предложена је и експериментално верификована нова методологија испитивања отпорности на лом биоматеријала испитивањем напонског стања на импланту и затим примене верификованих нумеричких модела.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

На основу прегледа литературе и сагледавања постојећих решења из области дисертације, констатујемо да су решења добијена у тези оригинална и значајна, те да су применљива у пракси. Ови научни резултати су од изузетног значаја за постављање критеријума отпорности на лом биоматеријала као једног од основних параметара при конструкцији импланата.

Такође, на основу увида у задате циљеве истраживања и резултате представљене у дисертацији можемо закључити да су пружени одговори на сва битна питања и решени проблеми са којима се кандидат сусрео у току истраживања. Основна полазна хипотеза подразумева да су узроци који доводе до потпуног отказа импланата вештачког кука узроковани механичким карактеристикама биоматеријала, односно пре свега отпорношћу на лом. Анализа понашања биоматеријала у односу на лом поставља се као један од основних критеријума при пројектовању протезе, па су у том смислу и спроведена истраживања у оквиру дисертације базирана на почетној хипотези. Верификацијом модела потврђено је да је могуће одредити силе раста прслине нумеричким прорачуном, а експериментално је потврђено да су истраживања у лабораторијским условима меродавна за одређивање параметара лома биоматеријала.

Имајући у виду значај истраживања у областима важним за успешно пројектовање и обезбеђење интегритета импланата који се користе у организму, као и чињеницу да су у тези приказана методологија која омогућава одређивање карактеристика механике лома, као и поља деформација импланата сложених геометријских облика, дисертација представља важан допринос у својој области.

4.3. Очекивана примена резултата у пракси

Применом нумеричке методе верификоване у тези знатно се поједностављује процес анализе отпорности на лом биоматеријала за вештачки кук и омогућава провера понашања импланата са прслином *in vitro*, у циљу прелиминарне анализе понашања пре уградње самог импланта. Осим тога, експериментално верификован тродимензионални нумерички модел импланта може послужити и за даља истраживања јер представља одличну замену за скупа и дуготрајна експериментална истраживања.

Методологија која је коришћена за експериментална мерења и добијени резултати које је кандидат приказао су практично применљиви, пошто отварају могућност за даља

истраживања у циљу добијања нове методологије за испитивање понашања биоматеријала у геометријски компликованим биомедицинским апликацијама.

Резултати истраживања на овом пољу имају значајне ефекте на аспект безбедности самих импланата, али и могућност постизања значајних економских ефеката применом методологије симулације понашања импланта са прслином пре уградње, што доприноси сигурнијем и дуготрајнијем раду импланата.

4.4. Верификовани научни доприноси

Научни допринос докторске дисертације је верификован радовима објављеним у часописима и саопштеним на конференцијама током вишегодишњег истраживања:

M20 Рад у међународном часопису

Врхунски међународни часопис (M₂₁)

[1] S. Tadic, R. Jancic-Heinemann, **K. Colic**, A. Sedmak, *High-temperature deformation behaviour of Ti3Al-11Nb intermetallic*, International Journal of Materials Research, vol. 102, No. 4 ,2011, pp. 452-456, ISSN 1862-5282 IF 0,830

Међународни часопис (M₂₃)

[2] S. Tadić, R. Prokić-Cvetković, I. Balać, R. Heinemann-Jančić, **K. Bojic**, A. Sedmak, *Deformation Mechanisms in Ti3Al-Nb Alloy at Elevated Temperatures*, Materiali in Tehnologije (Materials and technology), 2010, vol. 44, pp. 357-361, ISSN 1580-2949 IF 0,312

Часопис међународног значаја верификован посебним одлукама (M₂₄)

[3] **K. Colic**, A. Sedmak, N. Gubeljak, M. Burzic, S. Petronic, *Experimental analysis of fracture behavior of stainless steel used for biomedical applications*, Integritet i vek konstrukcija (Structural Integrity and Life), Vol. 12, No. 1 , 2012, pp.59-63, ISSN 1451-3749, UDC: 621

M51 Рад у водећем часопису националног значаја

[4] **K. Colic**, S. Petronic, A. Sedmak, A. Milosavljevic, Z. Kovacevic, *Laser Welding Process of Stainless Steel Used for Biomedical Applications*, Welding and Material Testing, Vol. 20/3, 2011, ISSN 1453-0392

M33 Саопштења са међународних скупова штампана у целини

[5]**K. Colic**, A. Sedmak, N. Gubeljak, M. Burzic, I. Hut, *3D Experimental optical analysis of titanium alloys for biomedical applications*, 15th IEEE International Conference on Intelligent Engineering Systems 2011, 2011, pp. 399-403, ISBN:978-1-4244-8955-8

[6] A. Sedmak, **K. Colic**, Z. Burzic, S. Tadic, *Structral Integrity Assesment of Hip Implant Made of Cobalt-Chromium Multiphase Alloy*. NT2F9 New Trends in Fatigue and Fracture- NT2F9 "Failures of materials and structures by fatigue and fracture", Belgrade, Serbia, October 12-14, 2009, pp. 171-177, Vol. 10, No. 2, , ISSN 1451-3749

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу прегледа докторске дисертације од стране Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације под називом „Анализа отпорности на лом биоматеријала за вештачки кук“ кандидата Катарине Чолић, дипл. инж. маш., Комисија за оцену и одбрану констатује да је урађена докторска дисертација написана према свим стандардима у научно истраживачком раду, као и да испуњава све услове предвиђене Законом о високом образовању, стандардима и Статутом Машинског факултета у Београду. На основу резултата и закључака приказаних у докторској дисертацији и чињенице да је анализирана проблематика веома актуелна у научној јавности, констатује се да је кандидат Катарина Чолић, дипл. инж. маш., успешно завршила докторску дисертацију у складу са предвиђеним предметом и постављеним циљевима истраживања. Кандидат је дошао до оригиналних резултата који су и верификовани, што им обезбеђује велику применљивост у овој атрактивној области.

Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације закључила је да теза представља оригинални научни рад са научним доприносом у области машинства, Наука о материјалима, механика лома, па сагласно томе предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета Универзитета у Београду да кандидату Катарини Чолић, дипл. маш. инж. одобри одбрану докторске дисертације под називом “Анализа отпорности на лом биоматеријала за вештачки кук”, када се за то стекну законски услови, пред комисијом у истом саставу.

Београд, 03.07. 2012. год.

Чланови Комисије за оцену и одбрану:

др. Александар Седмак, ментор,
ред. проф. Машинског факултета у Београду

др. Александар Вег,
ред. проф. Машинског факултета у Београду

др. Марко Ракин, ван. проф. Технолошко
Металуршког факултета у Београду

др. Вера Шијачки-Жеравчић,
ред. проф. Машинског факултета у Београду

др. Борислав Дулић, проф. Медицинског
факултета у Београду у пензији

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ –
Број:1072/6
Датум: 12.07.2012. године
Београд, Краљице Марије бр. 16

На основу члана 12.2 Статута Машинског факултета Универзитета у Београду и члана 37. Правилника о докторским студијама, Наставно-научно веће на седници одржаној 12.07.2012. године, донело је

ОДЛУКУ

I Прихвата се извештај о позитивној оцени урађене докторске дисертације коју је поднела КАТАРИНА ЧОЛИЋ и одобрава јавна одбрана дисертације по добијању сагласности од Универзитета, под насловом: „АНАЛИЗА ОТПОРНОСТИ НА ЛОМ БИОМАТЕРИЈАЛА ЗА ВЕШТАЧКИ КУК“

II Универзитет је дана 16.04.2010. године, својим актом број 020-1212/4-2/10 дао сагласност на предлог теме докторске дисертације кандидата.

III Радови кандидата у часопису међународног значаја:

[1] S. Tadic, R. Jancic-Heinemann, **K. Colic**, A. Sedmak, *High-temperature deformation behaviour of Ti3Al-11Nb intermetallic*, International Journal of Materials Research, vol. 102, No. 4, 2011, pp. 452-456, ISSN 1862-5282

[2] S. Tadić, R. Prokić-Cvetković, I. Balać, R. Heinemann-Jančić, **K. Bojic**, A. Sedmak, *Deformation Mechanisms in Ti3Al-Nb Alloy at Elevated Temperatures*, *Materiali in Tehnologije* (Materials and technology), 2010, vol. 44, pp. 357-361, ISSN 1580-2949

Одлуку доставити: кандидату, ментору, Катедри за технологију материјала и архиви факултета.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

Проф.др Милорад Милованчевић