

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

Машински факултет

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата **Филипа Г. Вучетића**,
маст. инж. маш., студента докторских студија

Одлуком бр. 711/2 од 4.6.2020. именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Филипа Вучетића под називом „**Утицај концентрације напона и појаве прсине на преостали радни век биоматеријала за реконструктивне плочице**“. На основу прегледа приложеног материјала, Комисија подноси следећи

РЕФЕРАТ

1. Увод

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Кандидат Филип Вучетић, маст.инж.маш., уписао је прву годину докторских студија на Машинском факултету Универзитета у Београду школске 2014/2015. године. Кандидат је поднео захтев за одобрење теме докторске дисертације број 1290/1 од 28.5.2018. године на Катедри за Технологију материјала Машинског факултета Универзитета у Београду. Кандидат је за ментора предложио др Александра Седмака, редовног професора Машинског факултета у Београду.

На основу сагласности Катедре Технологију материјала 1290/2 од 13.6.2018. године, Наставно-научно веће Машинског факултета у Београду донело је 28.6.2018. године Одлуку број 1290/3 о именовању Комисије за оцену подобности теме и кандидата за израду докторске дисертације и научне заснованости теме докторске дисертације у саставу:

Проф. др Александар Седмак, ментор

Проф. др Зоран Радаковић

др Александар Грбовић, ванредни професор

др Катарина Чолић, научни сарадник, ИЦ Машинског факултета у Београду

др Мери Бурзић, научни саветник, ИЦ Машинског факултета у Београду

Комисија за оцену подобности теме и кандидата за израду докторске дисертације и научне заснованости теме докторске дисертације је 11.9.2018. године поднела Наставно-научном већу Машинског факултета у Београду Извештај број 1290/4, у коме предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета у Београду да одобри тему докторске дисертације под насловом „Утицај концентрације напона и појаве прслине на преостали радни век биоматеријала за реконструктивне плочице“, наводећи да Кандидат испуњава све законом предвиђене услове за израду докторске дисертације и да је предложена тема научно утемељена и адекватна и да пружа могућност остваривања значајних научних доприноса. Одлуком Наставно-научног већа број 1290/5 од 20.9.2018. године прихваћена је тема докторске дисертације под насловом: „Утицај концентрације напона и појаве прслине на преостали радни век биоматеријала за реконструктивне плочице“ кандидата Филипа Вучетића, и за ментора је именован др Александар Седмак, редовни професор Машинског факултета у Београду. Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду донело је Одлуку број 61206-4675/2-18 од 29.10.2018. године којом се даје сагласност на предлог теме докторске дисертације кандидата Филипа Вучетића, под насловом: „Утицај концентрације напона и појаве прслине на преостали радни век биоматеријала за реконструктивне плочице“.

На основу обавештења проф. др Александра Седмака да је кандидат Филип Вучетић, завршио докторску дисертацију под насловом: „Утицај концентрације напона и појаве прслине на преостали радни век биоматеријала за реконструктивне плочице“ и предлога Катедре за Технологију материјала, Наставно-научно веће Машинског факултета у Београду је на седници одржаној 4.6.2020. године донело Одлуку број 711/2 којом се именују чланови Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације у саставу:

Проф. др Александар Седмак, ментор

Проф. др Зоран Радаковић

Проф. др Александар Грбовић

др Катарина Чолић, научни сарадник, ИЦ Машинског факултета у Београду

др Милош Милошевић, виши научни сарадник, ИЦ Машинског факултета у Београду

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација под насловом „Утицај концентрације напона и појаве прслине на преостали радни век биоматеријала за реконструктивне плочице“ припада области техничких наука - машинству, а ужој научној области Технологија материјала – машински материјали, за коју је Машински факултет Универзитета у Београду матичан.

1.3. Општи биографски подаци

Филип Вучетић, мастер инжењер машинства, рођен је 29.05.1990. године у Београду од оца Горана и мајке Верице. Основну и средњу школу је завршио у Обреновцу. Средњи ниво образовања је стекао у Техничкој школи Обреновац, где је похађао смер „машински техничар за компјутерско конструисање“. Машински факултет Универзитета у Београду је

уписао 2009. године. Основне студије је завршио у јулу 2012. године, након чега уписује мастер студије на истој установи, на модулу „Заваривање и заварене конструкције“. Дипломирао је у јуну 2014. године. Мастер рад под називом „Триболошке карактеристике материјала на бази Zn-25Al легура намењених за израду клизних компоненти“ је одбранио са оценом 10 (десет). Школске 2014/2015. године уписује докторске студије на Машинском факултету Универзитета у Београду.

У току студирања је похваљиван и награђиван за изванредне резултате постигнуте на Машинском факултету и то: Похвала за најбољег студента на мастер академским студијама из генерације уписане на студије школске 2012/2013. године, односно Похвала за студента на мастер академским студијама, мастер инжењера машинства, који је први завршио студије из генерације уписане на факултет школске 2009/2010. године. Током студија је био стипендиста Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије, односно предузећа „Messer Tehnogas“ и „Гоша Монтажа“.

После завршених мастер студија, у јулу 2014. године заснива радни однос у предузећу „Велестрој“. У овом предузећу је обављао послове на позицији шефа смене машинског сектора градилишта НПС-2 на Трансњефтовом магистралном нафтоводу „Кујумба-Тажет“ у Русији. У јануару 2015. године се запошљава у предузећу „Монт Стублине“, које га упућује на рад у Стокхолм (Шведска), где је обављао послове координатора градилишта испред главног извођача радова (компанија „Xergi A/S“), као и организовања и вођења монтаже процесне и термоенергетске опреме и металних конструкција на постројењу за когенерацију на биогас компаније „Scandinavian Biogas“. Од октобра 2015. године је запослен у Иновационом центру Машинског факултета у Београду и ангажован на пројекту Министарства просвете, науке и технолошког развоја: ТР 35040 (Развој савремених метода дијагностике и испитивања машинских структура). Такође, учесник је на билатералном пројекту „Експериментално одређивање механизма хабања на нано и на макро димензионом нивоу – премошћавање разлика између два нивоа“ у оквиру научне и технолошке сарадње између Републике Србије и Републике Француске у оквиру програма интегрисаних активности „Павле Савић“. Почетком 2018. године заснива радни однос у фирми „TÜV Rheinland InterCert“ где обавља послове на позицији инспектора именованог тела. У 2019. години бива ангажован, на пословима интерне контроле квалитета у заваривању на изградњи „Дубоке прераде“ у рафинерији нафте у Панчеву и при изградњи постројења за когенерацију из биомасе у Хановеру (Немачка). У текућој години је ангажован као надзор за заваривање на изградњи гасовода „Турски ток“ кроз Србију.

Успешно је завршио курсеве за: међународног инжењера заваривања (енг. International Welding Engineer – IWE), међународног инспектора заваривања – напредни ниво (енг. International Welding Inspector – Comprehensive level), курс за визуелну контролу – ниво 2 (енг. Visual testing – level 2) и за интерпретацију радиограма заварених спојева (енг. Radiographic testing – level 2, film interpretation of welds). Поседује сертификат компаније „TÜV Thüringen“ за руководиоце из области безбедности и заштите на раду, као и сертификате компаније „TÜV Rheinland“ за водећег проверача система управљања

квалитетом према ISO 9001:2015 и експерта у области опреме под притиском. Има положен курс на докторским студијама „Нанотрибологија: Теорија и примене“, одржан у јануару 2016. године на Техничком Универзитету Данске. Служи се програмима из пакета Microsoft Office, као и програмима за моделирање и нумеричке прорачуне CATIA, ANSYS и Abaqus. Течно говори енглески језик. Поседује возачку дозволу А и Б категорије.

Ожењен је и живи у Обреновцу.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација кандидата кандидата Филиша Вучетића под називом „Утицај концентрације напона и појаве прслине на преостали радни век биоматеријала за реконструктивне плочице“, садржи: 90 страна формата А4, 80 слика, 26 табела, 48 једначина и списак коришћене литературе који садржи 92 референце.

Докторска дисертација садржи следећа поглавља:

1. Проблем отказа ортопедских импланата
2. Основе механике лома
3. Основе и примена методе коначних елемената
4. Експериментална испитивања карактеристика легуре Ti-6Al-4V
5. Истраживање могућности оцене преосталог радног века нумеричким симулацијама
6. Истраживање могућности побољшања заморних карактеристика применом ласера
7. Закључак
8. Литература

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

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

Поглавље 1: Проблем отказа ортопедских импланата

Ортопедски импланати имају веома широку примену у биомедицинске сврхе, и јако велики број ових импланата се уграђује пацијентима сваке године. Услед екстремних услова оптерећења често долази до њиховог отказа. Проблем који је анализиран у оквиру дисертације првенствено је везан за отказ фиксационих ортопедских плочица за кости услед замора. Анализа проблема отказа импланата у оквиру овога рада фокусира се на замор, услед чињенице да су овакве плочице изложене динамичком оптерећењу цикличне природе, услед активности пацијената, пре свега ходања, те да је замор један од главних узрочника проблема лома ових импланата.

Упркос чињеници да су последњих деценија развијене различите врсте биоматеријала управо за ову сврху, учесталост отказа ортопедских импланата је и даље веома велика, и стога је неопходно пронаћи начине на који се могу побољшати њихове карактеристике, у смислу повећања века трајања. У оквиру овога рада нагласак је на механичком аспекту функционалности импланата, па је поред избора одговарајућег материјала, потребно имати у

виду и геометрију плочица. Још један веома значајан фактор који је узет у обзир при анализи њиховог понашања је делујуће оптерећење, с обзиром да је оно различито у реалним условима експлоатације, и зависи од специфичности појединачног случаја, пре свега од тежине и активности пацијента. Другим речима, сама тежина пацијента је директно везана за интензитет цикличног оптерећења. Поред тежине, треба имати у виду и активност пацијента, односно брзину (учесталост) којом циклично оптерећење делује, а која у великој мери зависи и од старосне групе.

Поглавље 2: Основе механике лома

Овим поглављем су обухваћени основни принципи механике лома, њени параметри и неки од модела који су примењени у оквиру ове дисертације. Такође је описан и феномен замора, који представља главну тему овог истраживања. Механика лома се често примењује при процени интегритета биомедицинских конструкција, међу њима и фискационих плочица, код којих често долази до отказа управо услед замора. Стога је ова област детаљно представљена и примењена при нумеричкој анализи резултата добијених одговарајућим експериментима. Главни разлог за ово лежи у присуству прслине у биоматеријалу, на чему се и концепт механике лома заснива. Теорија описана у оквиру овог поглавља се најпре фокусира на параметре и случајеве оптерећења који су карактеристични за замор ортопедских импланата, односно у овом случају плочица.

Поглавље 3: Основе и примена методе коначних елемената

У оквиру овог поглавља дат је преглед теоријских основа нумеричких метода које су примењене у оквиру дисертације, па су у том смислу приказани основни принципи методе коначних елемената (МКЕ). За нумеричку анализу проблема ортопедских плочица са постојањем прслине у материјалу, код којих је до коначног лома дошло услед заморног оптерећења примењена је проширена метода коначних елемената (ПМКЕ) која је управо осмишљена са циљем да омогући реалну симулацију понашања конструкција оптерећених на замор. У оквиру овог поглавља приказане су основни принципи ове методе, који су касније примењени у оквиру нумеричких симулација. Дати су и примери њене примене у биомедицини, и основне претпоставке и апроксимације које су касније усвојене током израде свих нумеричких модела.

Поглавље 4: Експериментална испитивања карактеристика легуре Ti-6Al-4V

У овом поглављу је приказан експериментални део истраживања, који је имао за циљ механичку карактеризацију изабраног биоматеријала који се примењује за израду орт. плочица. Експерименталним испитивањима обухваћено је и одређивање улазних параметара за нумеричку симулацију, односно механичких и заморних карактеристика легуре титана која је анализирана у оквиру рада (Ti-6Al-4V). Експерименти су обухватили одређивање затезних карактеристика на собној температури, као и ударних особина (живавости) на инструментираном Шарпијевом клатну, такође на собној температури. На крају, одређени су и параметри раста заморне прслине, односно коефицијенти Парис-ове једначине, која представља модел употребљен у оквиру рада за симулирање заморног понашања нумеричким методама.

Поред бројних резултата испитаних епрувета од изабране легуре титана, овде су приказане и одговарајуће експерименталне поставке, као и саме епрувете, уз детаљно објашњење како су припремљене за испитивање. Саме методе испитивања за сваки експеримент су такође укратко објашњене, уз описе опреме која се користила, и врсте резултата које такви експерименти дају. Све експериментална испитивања су рађена у лабораторијским условима, у складу са одговарајућим стандардима.

Поглавље 5: Истраживање могућности оцене преосталог радног века нумеричким симулацијама

У овом поглављу кандидат се бави нумеричком симулацијом разматраног проблема, тј. применом МКЕ коришћењем софтверских пакета ANSYS. У оквиру овог поглавља приказана је и детаљно описана нумеричка симулација понашања модела ортопедских плочица у присуству заморне прслине, применом софтверског пакета ANSYS. Направљено је укупно пет модела, различитих геометрија, али увек исте дебљине, како би се упоредили њихови резултати и извукли закључци о зависности века трајања плочице од геометрије, односно од утицаја концентрације напона. На местима где је постојала максимална концентрација напона су постављене прслине почетне дужине 0.5 mm, чиме је обезбеђено да се добију подаци о преосталом радном веку по појави прслине. Такође су дефинисани гранични услови у складу са релевантним стандардом који описује метод испитивања заморних карактеристика ортопедских плочица, односно описује се процедура за савијање у четири тачке. Што се оптерећења тиче, оно је дефинисано као момент савијања, одређен према тежини пацијента, у сагласности са релевантним изворима из литературе, за три случаја (60, 90 и 120 kg).

Нумеричке симулације су показале који модел плочице је најбољи у погледу броја циклуса оптерећења које може да издржи пре него што раст заморне прслине пређе у нестабилну фазу и дође до коначног лома, при чему су се ове вредности значајно мењале са тежином. Као што је и очекивано, најмањи бројеви циклуса су добијени за највеће тежине. Сам раст заморне прслине је текао исто код свих модела, а сагласно ширењу прслине приказаном при експерименталном испитивању, из литературе, савијањем у четири тачке.

Поглавље 6: Истраживање могућности побољшања заморних карактеристика применом ласера

У овом поглављу је дата поставка могућности побољшања механичких карактеристика биоматеријала и ортопедских плочица применом ласера (LSP), у циљу побољшања отпорности ортопедских импланата на раст заморне прслине. Приказана су експериментална испитивања која су обухватила третирање површине легуре титана директном аблацијом, ласерским сачмарењем са провидним слојем, без заштитног премаза и ласерским сачмарењем са провидним слојем и заштитним премазом. Ова метода подразумева ласерско ојачавање површине материјала, чиме се уноси локална пластична деформација и притисни заостали напони, и као резултат се добија површина са побољшаним механичким особинама, пре свега тврдоћом, што је касније и приказано мерењем. Уношење притисних заосталих напона повољно утиче на отпорност према иницијацији прслине. У оквиру експерименталних

истраживања испитана је примена ове методе са различитим параметрима, чиме је постављена основа за даља истраживања, изакључено је да би даља истраживања свакако требало да обухвате и примену овог поступка на испитане ортопедске импланте.

Поглавље 8: Закључак

У овом поглављу је приказано сумирање свих резултата из претходно описаних експерименталних и нумеричких испитивања, и изведени су одговарајући закључци, везани за понашање плочица од Ti-6Al-4V легуре. Уз очекиване закључке о утицају активности и пре свега тежина пацијента на радни век плочица, такође је уочено и да су релативне разлике међу моделима различитих геометрија веома сличних вредности, чак и при промени тежине. Приказани су утицаји различитих третмана површине легуре титана ласером. Изведен је закључак који од начина третирања ласером даје оптималне вредности површинских карактеристика у смислу повећања површинске храпавости и микротврдоће, који су у директној вези са отпорношћу на иницијацију прслина. Такође је дат кратак опис планова за наредна истраживања заснована на резултатима добијеним у овој тези.

Поглавље 8: Литература У овом поглављу је дата сва цитирана литература.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Истраживања у области понашања ортопедских импланата су значајна и актуелна. Кандидат је дао јасну идентификацију и анализу основних фактора који утичу на отпорност фиксационе плочице на раст заморне прслине, пре свега интензитет и брзину оптерећења, као и геометрију и биоматеријал саме плочице. Докторска дисертација представља савремен и оригиналан допринос разматраној проблематици заморног лома услед постојања грешака типа прслина у материјалу. У оквиру докторске дисертације примењени су савремени истраживачки поступци и лабораторијска мерења уз коришћење најновијих софтверских решења за нумеричке симулације.

Оригиналност добијених резултата у оквиру дисертације потврђују радови који су публиковани и саопштени на научним скуповима или објављени у часописима.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У докторској дисертацији коришћена је обимна литература из различитих области, па су због изразито комплексног карактера теме докторске дисертације референтне области обухватале механику лома и понашања металних материјала, нумеричке метода и симулације, експерименталне методе испитивања и методе ласерске обраде материјала у циљу побољшања њихових карактеристика. Ова литература је кандидату послужила као полазна основа за формирње прегледа постојећих истраживања везаних за област отказа услед лома ортопедских импланата, као и за припрему експеримената и нумеричких модела. Све референце коришћене у раду приказане су на крају рада, а кандидат се позива на анализе, резултате и закључке објављене у научним часописима високог ранга и

конференцијама међународног значаја. Од наведених наслова коришћене литературе, доминирају оне млађе од десет година, као и оне из водећих међународних часописа.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

У изради докторске дисертације примењене су и експерименталне и нумеричке методе. Метода коначних елемената у савременој науци има све већу примену и користи се за испитивања и прорачуне различитих машинских и многих других конструкција, као што су комплексне геометрије вештачких кукова, денталних импланата и др. У склопу нумеричких анализа формирани су нумерички прорачунски модели. Примењене су методе верификације, засноване на поређењу добијених нумеричких и експерименталних резултата, као и метода експертског мишљења током анализе и тумачења добијених резултата. Експерименти су спроведени у складу са дефинисаним препорукама из одговарајућих стандарда.

3.4. Применљивост остварених резултата

Добијени резултати у оквиру докторске дисертације поред научне вредности имају и широку практичну примену, пре свега у прорачунима интегритета биомедицинских плочица за фиксацију прелома. Остварени резултати омогућавају одређивање утицаја замора и различитих геометрија, за велики број случајева оптерећења, који су у овом случају веома разноврсни од пацијента до пацијента. Нумеричке симулације се такође могу веома лако прилагодити променама оптерећења и механичких особина материјала, што ову методу чини веома практичном за оцену интегритета ортопедских импланата. Добијени резултати би могли служити медицинском особљу при дефинисању периодике испитивања преломног места у циљу превентивног откривања прслине у материјалу импланта.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Током израде докторске дисертације кандидат је показао способност за самостални научни рад, као и да решава научне проблеме, односно да има изузетено знање у оквиру области науке о материјалима, биомедицине, затим теоријске и експерименталне механике лома, као и савремене нумеричке анализе, потребно за даљи научно-истраживачки рад. То је потврђено како бројним испитима које је кандидат положио на докторским студијама, тако и бројним коауторским радовима.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Остварени научни доприноси кандидата Филипа Вучетића и његовог доктората под називом „Утицај концентрације напона и појаве прслине на преостали радни век биоматеријала за реконструктивне плочице“, огледају се у следећем:

- Нумеричком симулацијом модела неколико различитих типова ортопедских плочица показано је да је могуће одредити преостали радни век импланта са прслином у материјалу

у условима деловања заморног оптерећења, као што је показано у раду бр. 2, поглавља 4 и 5 (странице 1919-1921), објављеном у часопису *Technical Gazette* који је доступан на линку <https://doi.org/10.17559/TV-20200617192027>, као и у дискусији у докторату, поглавље 5.2, стр. 56.

- Утврђена је зависност преосталог радног века од биоматеријала, оптерећења и геометрије фиксационих плочица, као што је показано у раду који је наведен под бр. 2 (<https://doi.org/10.17559/TV-20200617192027>) на страни 1920 и дијаграмима на сл. 5.28-5.30, стр. 74-76 у докторату.

4.2. Остали битни доприноси

- Уведена је процедура испитивања ортопедских плочица и биоматеријала Ti-6Al-4V применом комбинованих експерименталних и нумеричких метода, чиме је омогућена примена комплексних симулација на анализу заморног лома реалних биомедицинских конструкција, а узимајући у обзир сложене услове цикличног оптерећења, рад бр. 2.
- Анализирана су могућа побољшања механичких карактеристика материјала и ортопедских плочица применом ласерских метода, и предложени су правци будућих истраживања у овој области, као што је показано у раду који је наведен под бр. 1.

4.3. Критичка анализа резултата истраживања

На основу прегледа релевантне научне литературе и постојећих решења из области докторске дисертације, комисија констатује да су приказани резултати истраживања значајни и научно утемељени. Истовремено, на основу увида у задате циљеве истраживања и резултате представљене у докторској дисертацији, констатујемо да су пружени одговори на релевантна питања и да су решени проблеми са којима се кандидат сусрео у току истраживања. Развијени нумерички модели и експерименталне процедуре имају велику примењивост у области процене и очувања интегритета биоматеријала за ортопедске плочице.

4.3. Верификација научних доприноса

Научни допринос кандидата Филипа Вучетића, верификовани су следећим радовима:

1. Petronić S., Čolić K., Đorđević B., Milovanović D., Burzić M., **Vučetić F.**, *Effect of laser shock peening with and without protective coating on the microstructure and mechanical properties of Ti-alloy*, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 129, June 2020, 106052 (<https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106052>) - **M21**
2. **F.Vučetić**, K.Čolić, A.Grbović, A.Petrović, A. Sedmak, D. Kozak, S.Sedmak, *Numerical Simulation of Fatigue Crack Growth in Titanium Alloy Orthopaedic Plates*, *Technical Gazette*, Vol. 27 (6), December 2020, str. 1917-1922 (<https://doi.org/10.17559/TV-20200617192027>) - **M23**

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу детаљног прегледа докторске дисертације, Комисија за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације констатује да се докторска дисертација под називом „**Утицај концентрације напона и појаве прслине на преостали радни век биоматеријала за реконструктивне плочице**“ кандидата Филипа Вучетића, магистарског инжењерског машиничког факултета, прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду. На основу резултата и закључака приказаних у докторској дисертацији, Комисија констатује да је кандидат Филип Вучетић, магистарског инжењерског машиничког факултета, успешно завршио докторску дисертацију у складу са предвиђеним предметом и постављеним циљевима истраживања, а да докторска дисертација под називом „**Утицај концентрације напона и појаве прслине на преостали радни век биоматеријала за реконструктивне плочице**“ представља оригиналан научни рад са научним доприносима у области машинства, ужа научна област **Технологија материјала – машински материјали**.

У Београду, 3.7.2020. год

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

.....
Др Александар Седмак, ред. проф.
Машински факултет Универзитета у Београду

.....
Др Зоран Радаковић, ред. проф.
Машински факултет Универзитета у Београду

.....
Др Александар Грбовић, ред. проф.
Машински факултет Универзитета у Београду

.....
Др Катарина Чолић, научни сарадник
Иновациони центар Машинског факултета у Београду, Универзитет у Београду

.....
Др Милош Милошевић, виши научни сарадник
Иновациони центар Машинског факултета у Београду, Универзитет у Београду

Numerical Simulation of Fatigue Crack Growth in Titanium Alloy Orthopaedic Plates

Filip VUČETIĆ*, Katarina ČOLIĆ, Aleksandar GRBOVIĆ, Ana PETROVIĆ, Aleksandar SEDMAK, Dražan KOZAK, Simon SEDMAK

Abstract: Biomaterials intended for orthopaedic plates manufacturing have much higher mechanical properties relative to the bone itself and still there are many cases where those plates fracture in service, with fatigue as the main failure mode. This causes problem with the healing process and requires that the patient undergoes another surgery. Experience and knowledge of the orthopaedic surgeon is one of the most important factors contributing to the frequency of fatigue failures. If incorrectly implanted, plates will be subjected to overloading from the start, which is convenient for crack initiation. One of the most commonly used biocompatible materials for internal bone fixation is $\alpha + \beta$ titanium alloy Ti-6Al-4V. Focus of this study was to simulate the behaviour of titanium alloy orthopaedic plates in the presence of cracks under four-point bending. The extended finite element method (XFEM) in ANSYS was employed for this purpose. Loads correspond to the ones occurring in human tibia during gait cycle for different body weights. Experimental investigation of tensile and fracture mechanics parameters of Ti-6Al-4V alloy was conducted on tensile testing machine and fractomate. Numerical simulation established the optimal geometry from remaining life point of view, indicating large differences between different geometries. Results also have shown that the remaining life of orthopaedic plates is strongly dependant on patient's body weight (load) and that the relative differences in remaining life between compared plate geometries stay the same under different loads. Influence of corrosive environment of the human body was not taken into consideration.

Keywords: ASTM F382; crack growth; orthopaedic plates, Ti-6Al-4V; XFEM

1 INTRODUCTION

Owing to its good mechanical properties, outstanding corrosion stability and biocompatibility, $\alpha + \beta$ titanium alloy Ti-6Al-4V has been most frequently used for orthopaedic plates manufacturing [1-4]. Fatigue fracturing has shown to be the most common failure mode of in-service orthopaedic plates. Fatigue, as a process of defect accumulation, i.e. crack initiation and propagation due to bending cycles, is likely to occur even under low cycling load. Also, orthopaedic surgeon's experience is crucial for avoiding overloads of the implant due to incorrect implantation [5-7], which can easily cause crack initiation in combination with stress concentration locations [8].

American Society for Testing and Materials (ASTM) has issued a standard [9] for testing metallic bone plate stating that the time frame, number of loading cycles and loading conditions are uncontrollable and unpredictable. Also, there is no acceptable limit for the bending moment or number of cycles which the bone plate should withstand. Testing prescribed in this standard is used for comparison between materials, different designs and materials.

Having the seriousness of plate in-service failure, it is necessary to approach the subject of structural integrity and life of internal fixation devices from all possible aspects. Numerical simulations are widely used for assessing the different behaviours of various implants, such as: artificial hips, dental implants, etc. [10-14]. This study is a step towards explaining the behaviour of different orthopaedic plate designs, under uniaxial bending, with cracks initiated at the stress concentration areas. Probably the most efficient experimental method would be the optical strain measurement systems [8, 15, 16], especially since commercial crack length foils are hardly possible to be used on orthopaedic plates. Here, numerical simulations in ANSYS were used for XFEM simulations based on experimentally determined material parameters. Basic aims were to evaluate remaining life of orthopaedic plates depending on different geometries, so that the optimal one can be selected, and to assess the effect of human weight, i.e. loading.

2 EXPERIMENTAL INVESTIGATION

Tensile and fatigue crack growth testing of Ti-6Al-4V alloy was performed at the Laboratory for Materials testing, Military Technical Institute in Belgrade, providing results for structural integrity and life assessment of reconstructive plates.

2.1 Tensile Testing

Tensile testing was conducted according to EN ISO 6891-1 [17], using a servo hydraulic tensile tester with the ± 100 kN force range, in deformation (elongation) control, under loading rate of 5 mm/min. Test results are presented in Tab. 1.

Table 1 Tensile testing results

| Sample no. | Yield strength, $R_{p0.2}$ / MPa | Ultimate strength R_m / MPa | Elongation A / % |
|------------|----------------------------------|-------------------------------|--------------------|
| 1 | 1035 | 1089 | 7,7 |
| 2 | 1015 | 1062 | 6,0 |
| 3 | 1022 | 1071 | 6,6 |

2.2 Fracture Mechanics Parameters

Room temperature testing of crack growth rate (da/dN) and threshold value of stress intensity factor ΔK_{th} is performed on Charpy test samples, via three point bending method on resonant high frequency pulsator. Testing was done according to ASTM E647 [18], it was load controlled, under load ratio of $R = 0.1$, in 215 - 235 Hz frequency range. Average load and amplitudes were measured with ± 3 Ncm accuracy.

Table 2 Fatigue crack growth parameters

| Sample no. | Stress intensity factor ΔK_{th} / MPa $m^{1/2}$ | Coefficient C | Exponent m |
|------------|---|-----------------------|--------------|
| 1 | 4,5 | $1,54 \cdot 10^{-12}$ | 2,15 |
| 2 | 4,8 | $3,70 \cdot 10^{-13}$ | 2,31 |
| 3 | 4,7 | $1,05 \cdot 10^{-13}$ | 2,32 |

Measurement system is based on indirect potential drop method and continuously indicates the measurement

values. It generates an accurate result of the crack length and can also be used to control the propagation of the crack. Test procedure and calculation is described in detail elsewhere [19, 20], whereas test results are given in Tab. 2.

3 NUMERICAL SIMULATIONS

Extended finite element method (XFEM) in ANSYS software was employed for the purpose of simulating the fatigue crack growth in orthopaedic plates. Numerical simulations were used instead of experimental approach due to cost and time effectiveness. Analysis includes 5 different plate geometries, marked with: A, B, C, D and E (Fig. 1, Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4 and Fig. 5). Cross sections B-B on each plate's drawing show the location and size ($R = 0.5$ mm) of initial cracks. Example of initial crack mesh is shown in Fig. 11.

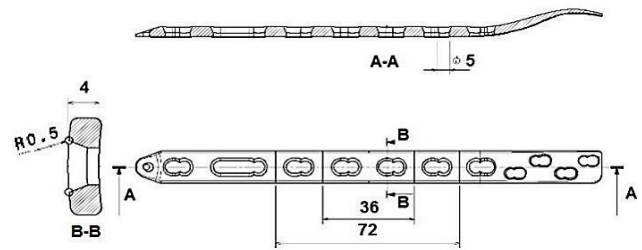


Figure 5 Plate E geometry

Tetrahedral finite elements (10 nodes) mesh was generated for every type of plate (Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9 and Fig. 10). Number of finite elements, their average size and number of nodes per plate is presented in Tab. 3.



Figure 6 Plate A mesh with initial cracks

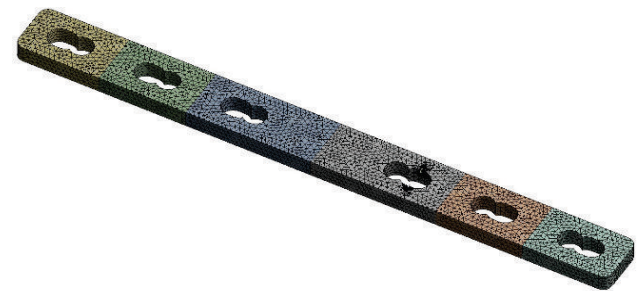


Figure 7 Plate B mesh with initial cracks



Figure 8 Plate C mesh with initial cracks

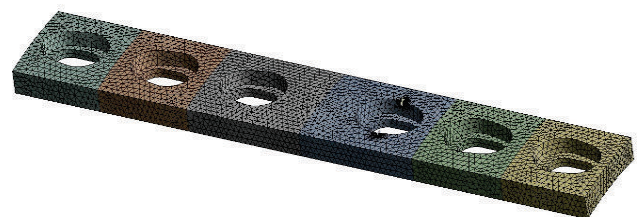


Figure 9 Plate D mesh with initial cracks

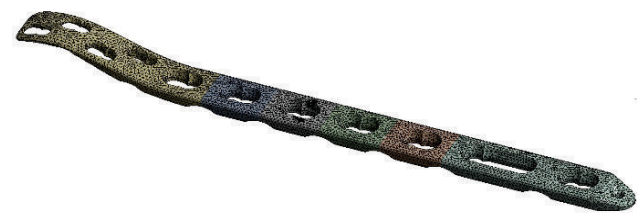


Figure 10 Plate E mesh with initial cracks

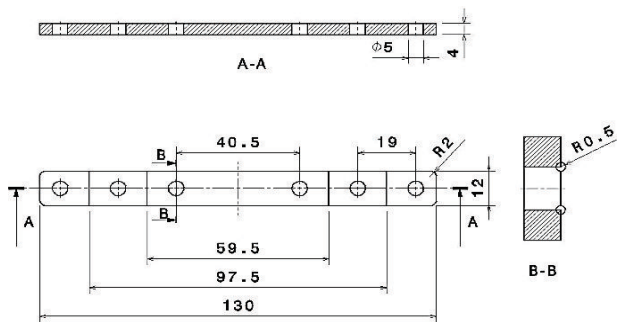


Figure 1 Plate A geometry

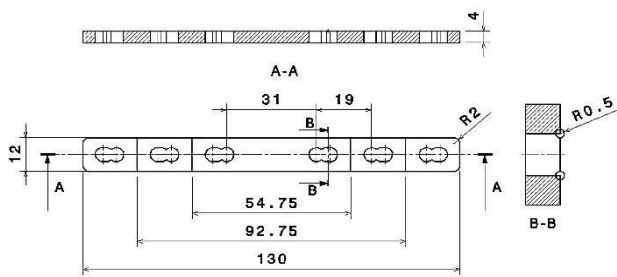


Figure 2 Plate B geometry

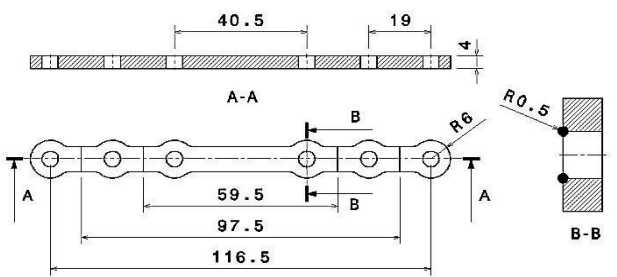


Figure 3 Plate C geometry

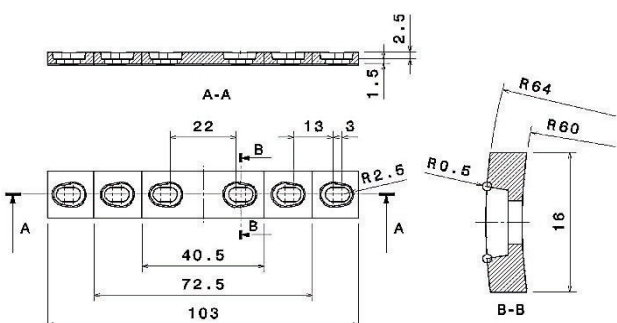


Figure 4 Plate D geometry

Table 3 Details of finite element mesh

| Plate type | Number of finite elements | Average element size / mm | Number of nodes |
|------------|---------------------------|---------------------------|-----------------|
| A | 40614 | 1,18580 | 63020 |
| B | 69386 | 0,98465 | 109765 |
| C | 67457 | 0,84443 | 104213 |
| D | 71599 | 0,90758 | 108990 |
| E | 57196 | 0,57034 | 88534 |

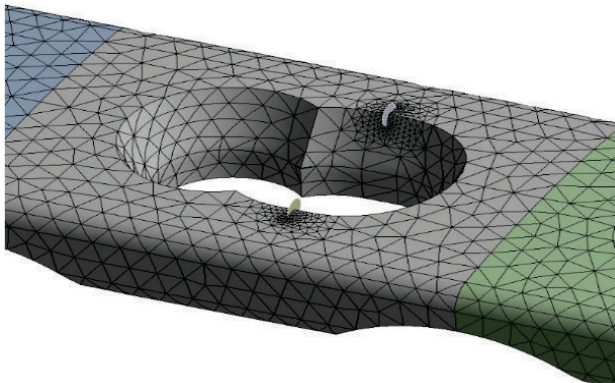


Figure 11 Mesh detail around the initial crack

Conditions described in ASTM F382 [9] were taken as a basis for simulation of four-point bend testing. Maximal bending moments in the human tibia (upper tibia region) were approximately calculated, according to Wehner T. et al. [21], for 60, 90 and 120 kg body weights (BW). In this setup, orthopaedic plates can be observed as simple beams for which the loading forces and support reactions can be determined thus the calculated bending moments are between loading points (Tab. 4). Locations of supports (points A and B), loading points (points C and D) are presented in Fig. 12 for plate D, as an example. *R*-ratio was set to 0.1. Total of 60 steps were set in ANSYS.

Experimentally determined mechanical properties and crack growth parameters were used alongside predefined material parameters existing in ANSYS.

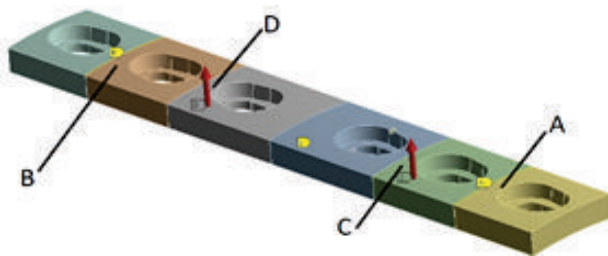


Figure 12 Supports and loading points locations, plate D

Table 4 Loading forces

| Plate type | 60 kg BW / kN | 90 kg BW / kN | 120 kg BW / kN |
|------------|---------------|---------------|----------------|
| A | 2,2 | 3,3 | 4,4 |
| B | 2,2 | 3,3 | 4,4 |
| C | 2,2 | 3,3 | 4,4 |
| D | 2,6 | 3,9 | 5,2 |
| E | 2,3 | 3,45 | 4,6 |

4 RESULTS

The XFEM analysis results are presented in Tab. 5 to Tab. 7 and in Fig. 13 to Fig. 15. As body weights increase, the life of orthopaedic plates decreases. After crack initiation, the remaining life of all plates, under the 120 kg BW and 90 kg BW of load, is $\approx 80\%$ and $\approx 60\%$ shorter when compared to the 60 kg BW case, respectively. Differences between compared plate geometries, in regard to remaining life, stay the same with changes in load, as shown in Fig. 13 to Fig. 15. Plate C has the shortest remaining life in all three cases. Its design, made for providing less contact surface with bone, makes the plate less durable after crack initiation when compared to all other plates. Plates A and B have nearly identical remaining life in all three cases, while the remaining life of the plate E was somewhat shorter. The best geometry under given test conditions was of plate D. If we assume that the average number of walking steps for a person making a recovery after getting an internal fixation device is cca. 1000 [9], it can be easily calculated how many days of walking could bring the orthopaedic plate made of Ti-6Al-4V to fracture after the crack initiation. Patients should keep their physical activity on minimal level and not apply full walking load for a few months at least after the surgery.

Table 5 XFEM analysis results - 60 kg BW

| Plate type | Number of cycles | Stress intensity factor / MPa mm ^{1/2} | Maximal crack length / mm |
|------------|------------------|---|---------------------------|
| A | 65520 | 2256 | 6,4696 |
| B | 67831 | 2102 | 6,2486 |
| C | 43399 | 2791 | 6,2452 |
| D | 100670 | 1748 | 6,3982 |
| E | 58897 | 2150 | 6,1719 |

Results of XFEM show that the maximal obtained crack length is more than 2 mm longer than the plate thicknesses. This is explained by showing the crack propagation path of plate A, given in Fig. 16. In the beginning, crack propagates equally through the plate thickness and along the surface, up to the point where the crack predominantly starts propagating along the surface. When the crack gets along the surface to the full width of the plate it then continues with fast propagation through plate thickness, thus making the longer path then just 4 mm of the plate's thickness. Same crack path (striation marks) was noticed by experimental 4 - point bend testing of orthopaedic plate made of 316L stainless steel and similar geometry to the one of plate E, made by Mohajerzadeh S. et al. [22] which is shown in Fig. 17.

Table 6 XFEM analysis results - 90 kg BW

| Plate type | Number of cycles | Stress intensity factor / MPa mm ^{1/2} | Crack length / mm |
|------------|------------------|---|-------------------|
| A | 25472 | 3396 | 6,5074 |
| B | 26584 | 3152 | 6,2581 |
| C | 16902 | 4205 | 6,294 |
| D | 39016 | 2672 | 6,7589 |
| E | 23066 | 3225 | 6,1592 |

Table 7 XFEM analysis results - 120 kg BW

| Plate type | Number of cycles | Stress intensity factor / MPa mm ^{1/2} | Maximal crack length / mm |
|------------|------------------|---|---------------------------|
| A | 13097 | 4528 | 6,1167 |
| B | 13673 | 4203 | 6,347 |
| C | 8674 | 5607 | 6,2529 |
| D | 20068 | 3563 | 6,5785 |
| E | 11967 | 4268 | 6,151 |

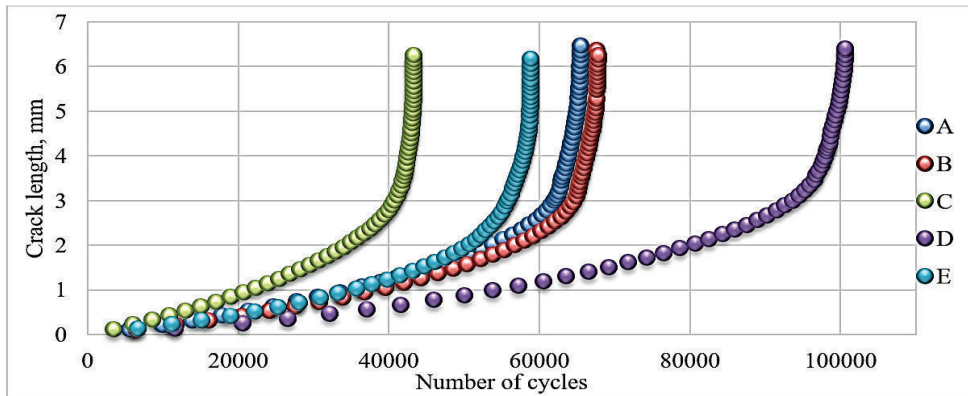


Figure 13 Crack length vs. Number of cycles - 60 kg BW

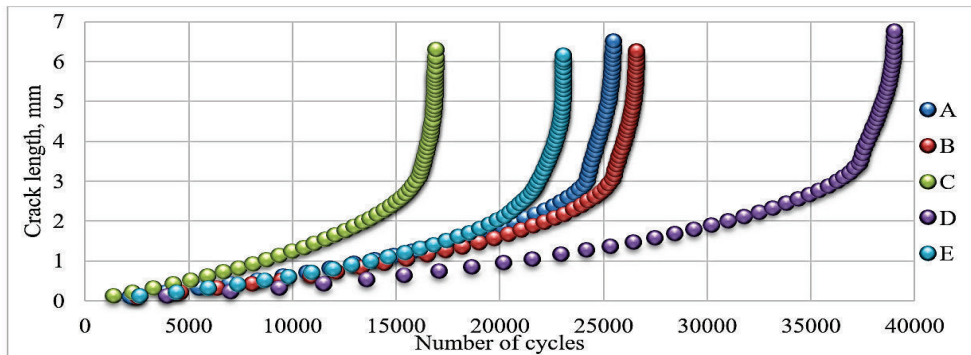


Figure 14 Crack length vs. Number of cycles - 90 kg BW

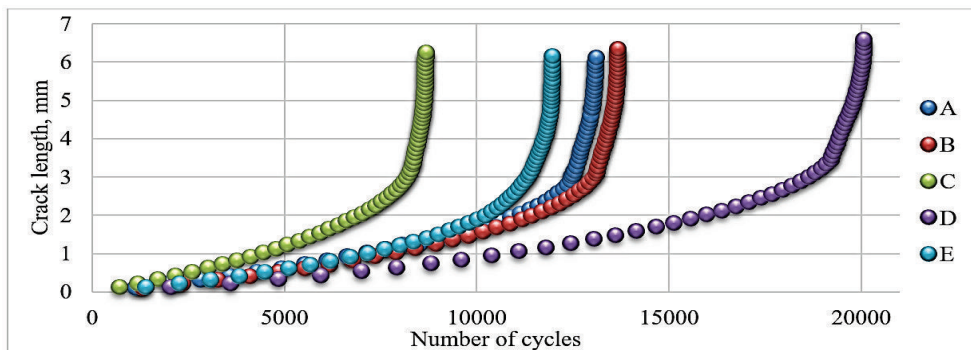


Figure 15 Crack length vs. Number of cycles - 120 kg BW

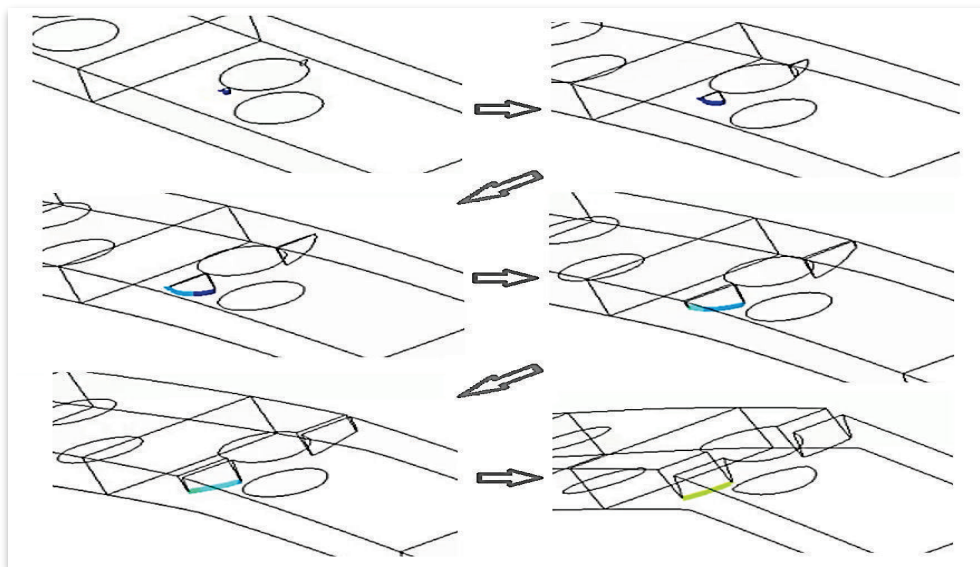


Figure 16 Crack propagation through material-plate A example

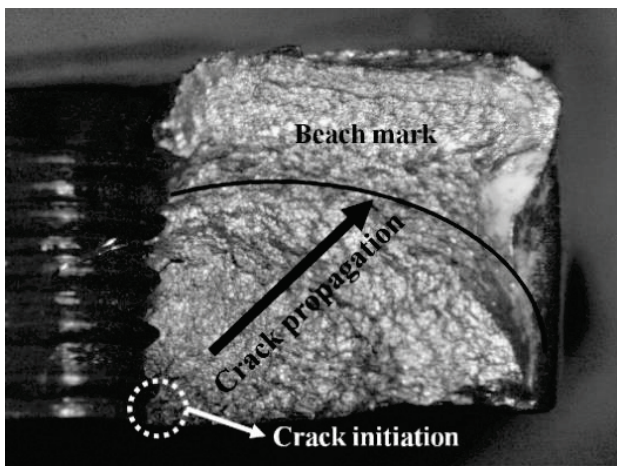


Figure 17 Crack propagation through 316L steel plate under 4 - point bending [22]

5 CONCLUSIONS

Remaining life assessment of Ti-6Al-4V orthopaedic plates after crack initiation was conducted by means of extended finite element method (XFEM) in ANSYS software. Four point bending of five different plate geometries was analysed under three load magnitudes occurring in the tibia. Following conclusions can be drawn:

- After crack initiation, the remaining life of all plates, under the 120 kg BW and 90 kg BW of load, is $\approx 80\%$ and $\approx 60\%$ shorter when compared to the 60 kg BW case, respectively.
- Differences in remaining life between compared plate geometries stay the same under different loads.
- Plate designed for providing less contact with bone surface has the shortest remaining life.
- Crack propagation path is more than 2 mm longer than the plate's thickness in all cases, since the crack stops propagating through thickness at one point and continues along plate surface only. When the surface propagation finishes, crack starts going through the thickness again and faster. This information can be taken in consideration when designing the plates in order to prolong the remaining life after crack initiation.
- Patient should keep his physical activity on minimal level and not apply full walking load for a few months after the surgery at least.

Acknowledgement

This work is supported by the Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia under the project TR 35040.

6 REFERENCES

- [1] Oldani, C. & Dominguez, A. (2012). *Titanium as a Biomaterial for implants*, in Fokter S.: Recent Advances in Arthroplasty, 149-162. <https://doi.org/10.5772/27413>
- [2] Hosseini, S., Hudak, R., et al. (2012). Fatigue of Ti-6Al-4V. *Biomedical Engineering-Technical Applications in Medicine*, 75-92. <https://doi.org/10.5772/45753>
- [3] Pohler, O. E. M. (2002). Failures of Metallic Orthopedic Implants, *ASM Handbook*, 11, *Failure analysis and prevention*, ASM International. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v11.a0001819>
- [4] ASTM F1472-14, *Standard Specification for Wrought Titanium-6Aluminum-4Vanadium Alloy for Surgical Implant Applications (UNS R56400)*. ASTM International <https://doi.org/10.1520/F1472-14>
- [5] Brunner, H. & Simpson, J. P. (1980). Fatigue fracture of bone plates. *Injury: The British Journal of Accident Surgery*, 11, 203-207. [https://doi.org/10.1016/S0020-1383\(80\)80044-1](https://doi.org/10.1016/S0020-1383(80)80044-1)
- [6] Kanchanomai, C., Phiphobmongkol, V., & Muanjan, P. (2008). Fatigue failure of an orthopaedic implant-A locking compression plate. *Engineering Failure Analysis*, 15, 521-530. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2007.04.001>
- [7] Sedmak, A., Čolić, K., Burzić, Z., & Tadić, S. (2010). Structural integrity assessment of hip implant made of Cobalt Chromium multiphase alloy. *Structural Integrity and Life*, 10(2), 161-164.
- [8] Tatić, U., Čolić, K., Sedmak, A., Mišković, Ž., & Petrović, A. (2018). Evaluation of the Locking Compression Plates Stress-Strain Fields. *Technical Gazette*, 25(1), 112-117. <https://doi.org/10.17559/TV-20170420121538>
- [9] ASTM F382-17, *Standard Specification and Test Method for Metallic Bone Plates*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/F0382-17>
- [10] Milovanovic, A., Sedmak, A., Čolić, K., Tatić, U., & Đorđević, B. (2017). Numerical Analysis of Stress Distribution in Total Hip Replacement Implant. *Structural Integrity and Life*, 17(2), 139-144
- [11] Sedmak, A., Čolić, K., Grbović, A., Balac, I., & Burzić, M. (2019). Numerical Analysis of Fatigue Crack Growth of Hip Implant. *Engineering Fracture Mechanics*, 216, 106492. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2019.106492>
- [12] Mijatović, T., Milovanović, A., Sedmak, A., Milović, Lj., & Čolić, K. (2019). Integrity Assessment Of Reverse Engineered Ti-6Al-4V ELI Total Hip Replacement Implant. *Structural Integrity and Life*, 19(3), 237-242.
- [13] Čolić, K., Grbović, A., Sedmak, A., & Legweel K. (2019). Application of Numerical Methods in Design and Analysis of Orthopedic Implant Integrity. In: Mitrovic N., Milosevic M., Mladenovic G. (eds). *Experimental and Numerical Investigations in Materials Science and Engineering. CNNTech 2018*. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 54. Springer, Cham., 96-111. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99620-2_8
- [14] Tatić, U., Miletić, V., Sedmak, S., Mitrović, N., Eždenci, A., Gubeljak, L., & Milošević, M. (2014). Influence Of The Cavity Shape In Restorative Dentistry On The Stress-Strain Distribution In Dentine And Enamel Caused By Polymerization. *Structural Integrity and Life*, 14(3), 199-204.
- [15] Glaser, B., Predan, J., Kozak, D., & Gubeljak, N. (2019). Comparison between Stereo Optical Strain Measurements and Finite Element Results in Stress Concentration Zones. *Technical Gazette*, 2(5), 1346-1352. <https://doi.org/10.17559/TV-20190224220311>
- [16] Čolić, K., Burzić, M., Gubeljak, N., Petronić, S., & Vučetić, F. (2017). Digital Image Correlation Method in Experimental Analysis of Fracture Mechanics Parameters. *Scientific Technical Review*, 67(2), 47-53. <https://doi.org/10.5937/str1702047C>
- [17] EN ISO 6891-1, *Metallic materials-Tensile testing-Part 1: Method of test at room temperature*.
- [18] ASTM E647-15, *Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/E0647-15E01>
- [19] Čamagić, I., Vasić, N., Vasić, Z., Burzić, Z., & Sedmak, A. (2013). Compatibility of Fracture Mechanics Parameters and Fatigue Crack Growth Parameters in Welded Joint Behaviour Evaluation. *Technical Gazette*, 20(2), 205-211.
- [20] Novoselac, S., Kozak, D., Ergic, T., Damjanovic, D. (2017). Fatigue Damage Assessment of Bolted Joint Under Different Preload Forces and Variable Amplitude Eccentric Forces for High Reliability. Pluvinage, G., Milovic, Lj. (eds). *Fracture at*

all scale. Lecture Notes in Mechanical Engineering, 239-268.

https://doi.org/10.1007/978-3-319-32634-4_13

- [21] Wehner, T., Claes, L., & Simon, U. (2009). Internal loads in the human tibia during gait. *Clinical Biomechanics*, 24, 299-302. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2008.12.007>
- [22] Mohajerzadeh, S., Farhangdoost, K., Zamani, P., & Kolasangiani, K. (2018). Experimental Investigation on Fatigue Evaluation of Orthopaedic Locking Compression Plate. *International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology*, 11(4), 47-52.

Contact information:

Filip VUČETIĆ, M.Sc.ME, Research Assistant,

(Corresponding author)

Innovation Center of Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade,

Kraljice Marije 16, 11120 Belgrade, Republic of Serbia

E-mail: fvucetic@mas.bg.ac.rs

Katarina ČOLIĆ, PhD, Senior Research Associate,

Innovation Center of Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade,

Kraljice Marije 16, 11120 Belgrade, Republic of Serbia

E-mail: kbojic@mas.bg.ac.rs

Aleksandar GRBOVIĆ, PhD, Full Professor,

University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering,

Kraljice Marije 16, 11120 Belgrade, Republic of Serbia

E-mail: agrbovic@mas.bg.ac.rs

Ana PETROVIĆ, PhD, Assistant Professor,

University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering,

Kraljice Marije 16, 11120 Belgrade, Republic of Serbia

E-mail: aspetrovic@mas.bg.ac.rs

Aleksandar SEDMAK, PhD, Full Professor,

University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering,

Kraljice Marije 16, 11120 Belgrade, Republic of Serbia

E-mail: asedmak@mas.bg.ac.rs

Dražan KOZAK, PhD, Full Professor,

Josip Juraj Strossmayer University of Osijek,

Mechanical Engineering Faculty in Slavonski Brod,

Trg Ivane Brlić-Mažuranić 2, 35000 Slavonski Brod, Croatia

E-mail: drazan.kozak@sfsb.hr

Simon SEDMAK, PhD, Research Associate,

Innovation Center of Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade,

Kraljice Marije 16, 11120 Belgrade, Republic of Serbia

E-mail: simon.sedmak@yahoo.com