

НАСТАВНО НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Извештај Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата мр Катарине Максимовић, дипл. маш. инж.

Одлуком Наставно научног већа Машинског факултета у Крагујевцу бр. 01-1/408/3 од 17. 12. 2009. именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата мр Катарине Максимовић, дипл. маш. инж. под насловом

"ЧВРСТОЋА И ПРОЦЕНА ВЕКА ЕЛЕМЕНАТА МАШИНСКИХ КОНСТРУКЦИЈА ПРИ ОПШТЕМ СПЕКТРУ ОПТЕРЕЋЕЊА"

На основу увида у приложену докторску дисертацију и увида у подобност кандидата и теме докторске дисертације која је одобрена за израду Одлуком Машинског факултета у Крагујевцу бр. 01-277 од 09. 09. 2004., а коју је потврдило Стручно веће Универзитета у Крагујевцу Одлуком бр. 1074/61 од 9.11. 2004. године, Упутства о реализацији докторских дисертација у области технике на Универзитету у Крагујевцу, Комисија подноси Наставно научном већу следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Значај и допринос докторске дисертације са становишта актуелног стања у научној области чврстоће и процене века машинских конструкција при општем спектру оптерећења

При дефинисању предмета рада ове докторске дисертације, једна од главних премиса је била истраживање чврстоће машинских конструкција при цикличним оптерећењима. Полазећи од чињенице да се сам материјал при дејству оваквог оптерећења на неки начин "замори" и да му се смањује способност да издражава и преноси променљива оптерећења, указује на то да је **стратешки мотив савремених истраживања** и пројектовања машинских конструкција, обезбеђење захтеваног века.

Постоје два основна домена процене века:

- до појаве иницијалног оштећења и
- век ширења прслина (прскотина) до критичне величине.

Предмет ове дисертације је век ширења прслине до критичне величине.

Облици и димензије иницијалних оштећења као и дефинисање критичних позиција у структуралним елементима су битни параметри за саму анализу ширења оштећења а тиме и реалну процену века. Будући да су дисконтинуитети (извори концентрације напрезања, нпр. отвори) у структуралним елементима конструкције редовно и критични са аспекта појаве лома, то су исти и предмет истраживања у докторској дисертацији. *Посебно значајно је и дефинисање фактора интензитета напона (ФИН) за специфичне 3-Д облике оштећења у структуралним елементима сложених машинских веза.*

У раду је дата и историја развоја метода истраживања са посебним освртом како се развијала и мењала филозофија пројектовања и испитивања конструкција, везано за појаве ломова током експлоатације.

До почетка 80 - тих година процена века машинских конструкција, вршила се углавном на основу експеримената који су у основи скупи и дуготрајни. Зато *савремени трендови у науци и пракси* налажу да се све фазе пројектовања, истраживања, анализирања и др., а због ефикасности и брзине, спроводе са *ефикасном рачунарском подршком*. У том контексту, један од *основних значаја и доприноса докторске дисертације је у развијању методологије и прорачунских модела и софтвера за нумеричку симулацију* понашања конструкција под дејством цикличних оптерећења.

Посебна пажња у раду је посвећена анализирању утицаја "пикова" (вршна оптерећења) у оквиру општег спектра оптерећења на укупан век структуралних елемената сложених конструкција и/или сложених веза елемената као што је *веза крило – труп* (отвори, контакти, променљиво оптерећење, прслине, ...) код лаког школског авиона и др. Ту се пре свега мисли на истраживање карактера "пикова" на укупан век структуралних елемената у присуству иницијалне прслине па све до рапидног лома. Добро је познато да поједини "пикови" у оквиру спектра оптерећења могу имати значајан утицај на успорење или пак убрзање ширења прслине. Мање је познато како се сам карактер и интензитет појединих пикова може нумерички симулирати у циљу истраживања њиховог утицаја на повећање или смањење века. *У том смислу се може сматрати оригиналним научним доприносом развој новог приступа процене укупног века елемената машинских конструкција, који је заснован на методи густине енергије деформације (ГЕД).*

У циљу верификације предложене процедуре, за процену века структуралних елемената, спроведена је комплетна нумеричка симулација и анализа *напонских стања предметне везе крило – труп, применом методе коначних елемената за све нивое оптерећења, чиме се доприноси реалној процени века, а извршена су и сопствена експериментална истраживања, чиме су добијени нумерички резултати верификовани.*

Проблематика која је разматрана у овој докторској дисертацији је веома актуелна и сваки ново добијени резултат (а има их доста у раду) представља изузетан допринос развоју научне мисли.

2.0 Оцена да је докторска дисертација резултат оригиналног научног рада кандидата у научној области чврстоће и процене века машинских конструкција при општем спектру оптерећења

Оригинални научни рад кандидата мр Катарине Максимовић, дипл. маш. инж., презентира у оквиру докторске дисертације под насловом "Чврстоћа и процена века елемената машинских конструкција при општем спектру оптерећења", огледа се у следећем:

- Полазећи од основног циља при конципирању ове докторске дисертације, да истрживања у овој докторској дисертацији треба да пруже подлогу за дефинисање нових или допуну и потврђивање већ постојећих законитости и утицајних фактора на процену века машинских делова у присуству различитих извора концентрације напона и оштећења при цикличним оптерећењима, кандидат је прво направио систематизацију досадашњих сазнања и препознао проблем који треба решити. *Тиме је кандидат испољио научни степен прилаза конкретној проблематици.*
- Дефинисани су погодни модели: аналитички, нумерички и експериментални за анализу ширења оштећења под дејством цикличних оптерећења константне амплитуде и под дејством општег спектра оптерећења. Прво, за анализе ширења прслина се, користе конвенционалне методе попут *Парисовог* закона као и низа других. Кандидат констатује да је при процени века структуралних елемената веома битно укључивање *нелинеарних ефеката* (пластификације) посебно у непосредној зони оштећења а и шире. У ту сврху кандидат укључује *различите моделе нелинеарних ефеката у непосредној зони око оштећења, применом МКЕ.*
Да би се описали реални структурални модели, опште 3–Д стање напона, користи се различити типови коначних елемената.
- Кандидат је *развио и применио нови/побољшани приступ процене укупног века* елемената машинских конструкција, који је заснован на *методи густине енергије деформације (ГЕД).* Према овој методи за разлику од конвенционалног приступа, сматра се да је оптерећење цикличног карактера (карактеристике малоцикличног замора, *МЦЗ*). При таквом оптерећењу, приступило се нумеричкој анализи ширења прслине и процени преосталог века.
- *Развијен је одговарајући софтверски пакет* за анализу ширења прслине на бази ГЕД и извршена је комплетна верификација презентованог приступа на проблему ширења прслине при цикличним оптерећењима константне амплитуде и «степенастог» спектра оптерећења. Извршена су детаљна поређења презентоваг приступа са добро документованим сопственим експерименталним резултатима за анализу ширења прслине као и са конвенционалним законима ширења прслине.
- Кандидат је развијени нови поступак, ради верификације, применио на раванском проблему, тј. код плоче са једним и два отвора и прслинама. При оваквим *мешовитим модovima* механике лома, приказана је трајекторија ширења прслине. Резултати нумеричке симулације упоређени су са експерименталним резултатима и показана је добра сагласност.

- После верификоване методе, кандидат је исту *применио на комплексном проблему сложене везе крило-труп авиона* (ушке, осовинице, контактни проблеми идр.). Кандидат је анализирао утицај облика површинских оштећења на преостали век (погл. 4) и показано је да парцијална оштећења ушки доводе до повећања преосталог века. У раду је за прецизно одређивање напонског стања у зони концентрације напона коришћена *метода коначних елемената*. Тако је уједно *дефинисана и критична локација* за појаву иницијалне прслине. За овако дефинисану критичну локацију појаве иницијалне прслине извршено је нумеричко моделирање параметара механике лома, односно *Фактора Интензитета Напона (ФИН)*, који су потом коришћени за анализу ширења прслине и процене преосталог века. Процена века, до појаве иницијалног оштећења, извршена је коришћењем релације SWT (*Swith-Watson-Topper*) која узима у обзир утицаје средњих напона.
- *Кандидат је показао да се презентовани нумерички приступ, који је пре свега економичнији и ефикаснији, може успешно применити за процену укупног века код сложенних конструкција под дејством цикличних оптерећења у виду спектра оптерећења.*
- Разматрани су и различити облици иницијалних оштећења (на реалним примерима, какви се могу користити у процесу пројектовања са аспекта допустивих оштећења ("*damage tolerance approach*"). Посебно су анализирана три карактеристична облика иницијалних оштећења:
 1. Прслина по целој дебљини елемента,
 2. Парцијално оштећење у виду парцијалне ивичне прслине и
 3. Елемента са полуелиптичном прслином у зони контакта са осовиницом.
- Посебна пажња је усмерена на анализу утицаја појединачних позитивних "*пикова*" при променљивом оптерећењу, на брзину ширења прслине.
- За прорачунску процену преосталог века на бази густине енергије деформације (*ГЕД*) развијен је *компјутерски програм* под радним називом "P1 SST 2219-T851" са којим се врши анализа ширења прслине. У циљу верификације резултата ширења прслине на бази *ГЕД* извршена су и поређења са конвенционалним законима ширења прслине.
- У циљу верификације прорачунске процене укупног века, *извршена су и експериментална истраживања* на мерном серво-хидрауличном систему МТС у ВТИ- Београд. За испитивање су коришћене "комплексне" епрувете које представљају реални део везе крило-труп авиона, а под дејством "степенастог" спектра оптерећења који одговара лету авиона у трајању од 50 сати.

У распложивој литератури, проблематика која је разматрана у овој докторској дисертацији није довољно изучена, те тако резултати до којих се дошло представљају изузетан допринос научној мисли.

3.0 Приказ дисертације

Докторска дисертација кандидата мр Катарине Максимовић под насловом **"ЧВРСТОЋА И ПРОЦЕНА ВЕКА ЕЛЕМЕНАТА МАШИНСКИХ КОНСТРУКЦИЈА ПРИ ОПШТЕМ СПЕКТРУ ОПТЕРЕЋЕЊА"**, изложена је на 157 страна и садржи 10 глава:

1. Увод
2. Процена века елемената конструкција са иницијалним оштећењима применом методе густине енергије
3. Анализа ширења прслине за спектар оптерећења у присуству пикова
4. Утицај облика оштећења на параметре механике лома и преостали век код проблема ушки за везу крило труп авиона
5. Одређивање ФИН за ушку са полу-елиптичним површинском прслином
6. Процена укупног века елемената конструкција коришћењем цикличних карактеристика материјала
7. Процена укупног века везе крило-труп авиона и поређење прорачуна са експериментима
8. Нумеричка симулација трајекторије ширења прслине при мешовитим модовима механике лома
9. Примена експерименталних метода за анализе ширења прслине у структуралним елементима
10. Закључак

Рад садржи, списак коришћених ознака, списак слика, списак табела и попис коришћене литературе. У циљу илустративног приказа, рад садржи 121 слику (графичка приказа) и 36 табела. Кандидат мр Катарина Максимовић је користила домаћу и страну литературу од чега је наведено 111 наслова.

У **Уводу** је дат кратак садржај рада и истрживања која су спроведена у циљу успостављања погодног прорачунског приступа за процену века елемената конструкција под дејством цикличних оптерећења. Дата је сажета историја развоја замора са посебним освртом како се развијала и мењала филозофија пројектовања и испитивања конструкција, посебно авионских, везано за појаве ломова током експлоатације.

У **Глави 2** дата је комплетна методологија прорачуна преостале чврстоће елемената конструкција са иницијалним оштећењима у виду прслина(прскотина) под дејством цикличних оптерећења. Истакнуто је да се процена преосталог века базира на анализи ширења прслине. За анализе ширења прслина примарно су коришћене конвенционалне методе попут Парисовог закона као и низа других. Код конвенционалних закона ширења прслина користе се динамичке карактеристике материјала које треба посебно експериментално одредити. Поред конвенционалних закона ширења, у последње време, за анализе ширења прслине се користе методе *на бази енергије*. Овај приступ базира на анализи вредности локалне еласто-пластичне деформације енергије у врху прслине. Суштина овог приступа заснива се на претпоставци да се оштећење у материјалу у врху прслине јавља када енергија у материјалу, у зони врха прслине, достигне критичну вредност. Овај приступ је познат као *метод густине енергије деформације (ГЕД)*. Треба истаћи да је овај приступ анализе ширења прслине на бази *ГЕД* још у развоју. Суштина овог

приступа је у томе да он за анализу ширења прслине користи параметре који се користе за описивање цикличне криве понашања материјала. Управо овај приступ анализе ширења прслине, на бази *ГЕД*, је теоријски илустрован у овом поглављу. Поред теоријских разматрања везано за метод *ГЕД* у овом поглављу је кроз нумеричке симулације извршена и верификација презентованог приступа. Резултати анализе ширења прслине, односно процене преосталог века на бази *ГЕД* су упоређени са добро документованим експерименталним резултатима. Поређења резултата између презентованог нумеричког приступа, на бази *ГЕД*, и експерименталних су извршена на примеру плоче са иницијалном прслином (репрезент поља оплате крила летелице) под дејством цикличних оптерећења константне амплитуде као и под дејством спектра оптерећења. За прорачунску процену преосталог века на бази густине енергије деформације (*ГЕД*) развијен је компјутерски програм под радним називом “**P1 SST 2219-T851**” са којим се врши анализа ширења прслине. У циљу верификације резултата ширења прслине на бази *ГЕД* извршена су и поређења са конвенционалним законима ширења прслине. У овој глави (тачка 2.2) је, на примеру поља оплате са два отвора и прслине између њих, дата комплетна процедура за успостављање аналитичког израза за фактор интензитета напона (*ФИН*) као и сама анализа ширења прслине на бази *ГЕД*.

Утицај “пикова” у оквиру спектра оптерећења на брзину ширења прслине је дата у **глави 3**. Пажња у овом поглављу је усмерена на анализу утицаја појединачних позитивних пикова на брзину ширења прслине. Дата је комплетна формулација за моделирање утицаја позитивних пикова ("overload") на успорење ширења прслина, што је илустровано примерима из литературе. Извршена је и нумеричка симулација утицаја позитивних пикова на успорење ширења прслине. Супротно, при појави негативних пикова ("underload"), долази до убрзања ширења прслине. Наводи се, да ови ефекти нису довољно изучени у литератури, без обзира на Wohler-ove моделе. Зато се кандидат определио да у својој дисертацији усмери пажњу на анализу утицаја позитивних пикова на ширење прслина. Резултати до који се дошло приказани су дијаграмски за случајеве:

- када је преоптерећење $R_{OL} = 1,5$ што је довело до успорења ширења прслине за око 23% и
- када је преоптерећење $R_{OL} = 2,25$ што је довело до успорења ширења прслине за око 280% .

При томе је показано добро слагање нумеричких и експерименталних резултата.

Глава 4 посвећена је анализи утицаја оштећења на параметре механике лома и проблему одређивања параметара механике лома као и процене преосталог века код реалних структуралних елемената, на пример: машински део (ушка, сл 4.1.1.1)) који служи за везу крило/труп авиона. Разматрани су различити облици иницијалних оштећења код ушки са аспекта допустивих оштећења (“*damage tolerance approach*”). Три карактеристична облика иницијалних оштећења код овог машинског дела су:

1. Прслина по целој дебљини ушке,
2. Парцијално оштећење у виду парцијалне ивичне прслине и
- 3 Ушка са полуелиптичном прслином у зони контакта са осовиницом.

За одређивање фактора интензитета напона (*ФИН*) код ушки са ова три типа иницијалних оштећења коришћен је метод коначних елемената с једне и аналитички

изрази с друге стране. Коришћењем МКЕ у овим анализама, верификована је тачности аналитичких израза за ФИН. При томе су прво коришћени сингуларни коначни елементи (сл. 4. 1.1.2). Знатно ефикаснија анализа је извршена применом 3-Д коначних елемената, при чему су укључљни и проблеми контакта између зидова отвора код ушке и осовинице која у разматраној вези има значајну улогу. За процену преосталог века код ушки, за различите облике иницијалних оштећења у виду прлина, коришћени су конвенционални закони ширења прлине као и метод густине енергије деформације (ГЕД). Резултати до којих се дошло, а који су *потпуно нови и оригинално дело кандидата*, приказани су у облику слика, дијаграма и табела.

У глави 5 дата је комплетна методологија за аналитичко одређивање фактора интензитета напона (ФИН) код структуралних елемената са оштећењима типа површинских прлина полуелиптичних облика. Приказана је комплетна методологија за успостављање аналитичких израза код равне плоче са површинском прлином полуелиптичног облика оптерећене на истезање користећи “вишеслојни модел”. Такође је приказана методологија за процену преосталог века равне плоче са полуелиптичном површинском прлином, оптерећене цикличним оптерећењима на истезање и савијање. У циљу верификације тачности аналитичких израза за ФИН извршене су нумеричке симулације применом методе коначних елемената (МКЕ). За одређивање ФИН као и за анализе ширења прлине, односно за процене преосталог века коришћени су специјални сингуларни коначни елементи. Врло ефектно и илустративно су приказани резултати до којих је кандидат дошао и који представљају велике помаке у расветљавању појава површинских прлина и одређивања ФИН.

У глави 6 приказана је комплетна методологија за процену укупног века (исказане преко броја циклуса; до појаве иницијалног оштећења, као и за време ширења прлине) код равне епрувете са кружним отвором. Процена укупног века је извршена под дејством цикличних оптерећења променљиве амплитуде. За процену века до појаве иницијалног оштећења коришћена је *Morrow*-а релација. У овом случају битно је прецизно одређивање напонских стања у критичној зони. За разматрање еласто-пластичног стања напона у зони концентрације напона коришћене су две методе. Прва, користи *Neuber*-ов приступ и базирана је на коришћењу линеарне анализе МКЕ и цикличне криве понашања материјала. Друга, користи комплетну нелинеарну анализу МКЕ са цикличном кривом понашања материјала. У раду су дати резултати ове анализе у облику слика, дијаграма и табела. Нарочито је *индикативно* поређење резултата до којих се дошло линеарном и нелинеарном анализом који су дати у облику дијаграма (сл. 6.3.1.2). Такође, овом анализом је показано *слагање нумеричких резултата са Neuber-овим моделом*. За анализу ширења прлине коришћен је метод густине енергије деформације (ГЕД) где се такође користе исте цикличне карактеристике као и за процену века до појаве иницијалног оштећења. Показана је зона пластификације око врха прлине. *Значи при процени укупног века како до појаве иницијалног оштећења тако и при анализи ширења прлине сматра се да је промена оптерећења циклична*. Резултати прорачунске процене укупног века код равне епрувете са кружним отвором су упоређени са експерименталним резултатима. Ова испитивања су извршена на мерном систему МТС у Војнотехничком институту-Београд. За процену века до појаве иницијалног оштећења је коришћен конвенционални метод решавања. Посебан аспект у овом поглављу био је усмерен на прорачунску процену и

експерименталну верификацију ширења прслине на бази *ГЕД*. Показано је да се презентована методологија за прорачунску процену укупног века, за равну епрувету са кружним отвором, слаже са спроведеним експерименталним резултатима.

Глава 7 представља оригиналне резултате кандидата. Приказана је прорачунска процедура за процену укупног века *реалне везе* крило-труп авиона. Наиме, развијена прорачунска процедура процене укупног века равне епрувете са кружним отвором у глави 5.0, која је верификована, примењена је на знатно сложенији проблем везе крило-труп авиона под дејством *реалног спектра оптерећења*. Комплексни део структуре крила, који је био предмет истраживања, израђен је од легуре дуралуминијума 2024 T351 за који су у оквиру овог рада експериментално одређене карактеристике материјала при цикличном оптерећењу. За одређивање напонских стања коришћена је МКЕ. Поред комплетне еластопластичне анализе МКЕ коришћен је и *Neuber*-ов приступ који користи линеарну анализу помоћу МКЕ и цикличну криву понашања материјала. За процену века, до појаве иницијалног оштећења, коришћена је релација *SWT (Swith-Watson-Topper)* која узима у обзир утицаје средњих напона. Метода густина енергије деформације (*ГЕД*) коришћена је за анализу ширења прслине. Аналитички израз за фактор интензитета напона (*ФИН*) изведен је на основу резултата добијених методом коначних елемената. Разматране су различите дужине прслина. Значи у овом поглављу је приказана комплетна методологија за процену укупног века дела структуре крила авиона (на месту везе крило-труп авиона) под дејством спектра оптерећења који одговара времену лета авиона у трајању од 50 сати и дефинисан је као један блок оптерећења. У циљу верификације прорачунске процене укупног века извршена су и експериментална истраживања. За испитивање су коришћене “комплексне” епрувете које представљају реални део везе крило-труп авиона. Испитивање дела везе крило-труп авиона је извршено на мерном серво-хидрауличном систему *МТС* у ВТИ, Београд. Оптерећење је уведено у виду “степенастог” спектра оптерећења који одговара лету авиона у трајању од 50 сати. Показано је добро слагање резултата. Значи у овом поглављу је презентована комплетна методологија за процену укупног века сложене конструкције попут дела везе крило авиона где се за анализу ширења прслине користе исте цикличне карактеристике материјала које се користе и за процену века до појаве иницијалног оштећења. Приказани комплетни резултати у облику слика, дијаграма и табела, представљају *изузетан допринос* у овој области и кандидат је тиме показао зрелост за самостална истраживања и доношење закључака *значајних за даљи развој научне мисли у овој области*.

У **глави 8** приказана је комплетна прорачунска методологија за анализу ширења прслине и одређивање трајектороје ширења прслине при мешовитим модовима механике лома. Прорачунска процедура за одређивање трајекторије ширења прслине се односи на танкозидне структуре где се јављају параметри механике лома као што су фактори интензитета напона, K_I и K_{II} . За анализу ширења прслине при мешовитим модовима механике лома коришћени су *специјални сингуларни коначни елементи*. Одређивање иницијалног правца ширења прслине, после сваког инкремента дужине прслине, разматрани/коришћени су различити критеријуми као нпр. критеријум *МТС* (максималног тангентног напона). Користећи прорачунску процедуру приказану у овом поглављу извршена је нумеричка симулација трајекторије ширења прслине на равној правоугаоној плочи са три отвора и иницијалној прскотини на једној страни плоче. Извршена су поређења резултата код плоче са три отвора, нумерички симулиране трајекторије ширења прслине, са

расположивим експерименталним резултатима. Разматран је и утицај дужине инкремента претпостављене дужине прслине на тачност одређивања трајекторије ширења прслине.

У глави 9 приказани су резултати *сопствених експерименталних истраживања* у домену ширења прслине при мешовитим модовима механике лома. За ту сврху су испитивана два типа епрувета. Први се односи на ширење прслине при мешовитим модовима механике лома кога чини поље оплате са два отвора и прслином на оба отвора под одређеним углом у односу на заједничку осу на којима се налазе ова два отвора. Тачније, оплата са два отвора на хоризонталној оси и прслинама на оба отвора које заклапају углове од по 45° са хоризонталном осом, обезбеђује појаву мешовитих модова механике лома. При томе, се "уводи" једноосно циклично оптерећење нормално на хоризонталну осу. Експериментално одређена трајекторија ширења прслине, код овог примера плоче, упоређена је са резултатима нумеричке симулације. За нумеричку симулацију трајекторије ширења прслине у овом примеру је коришћена методологија приказана у поглављу 8. Други пример, на коме је извршено експериментално испитивање ширења прслине са мешовитим модовима механике лома, је танка *плоча са кружним отвором и са иницијалном прслином* на ивици отвора. Ово је репрезентативан проблем који се јавља код оплата структуре авиона као и код многих других конструкција. Поређењем експерименталних и нумеричких резултата добијена су добра сагласност. *Поново се потврђује да је развијена методологија истраживања поуздана и да се може препоручити а коришћење у научним и стручним подухватима.*

У **Закључку** су изнета основна опажања и закључци до којих се дошло у овој докторској дисертацији. Кандидат истиче да је у оквиру дисертације *успостављена комплетна методологија* за анализу ширења прслине, односно процене преосталог века елемената конструкција, користећи цикличне карактеристике материјала. За разлику од конвенционалног приступа где се до појаве иницијалних оштећења користе цикличне карактеристике понашања материјала а за ширење прслине динамичке карактеристике, у овом раду је успостављена *побољшана/нова методологија* где се у оба случаја користе само цикличне карактеристике материјала. Ваљаност овог приступа је верификована поређењима презентованог прорачунског приступа са сопственим експерименталним резултатима; посебно у поглављима 6 и 7. Резултати ширења прслине на бази презентованог метода ГЕД, дати у поглављу 2, могу послужити и као верификациони "patch test" примери. Кандидат истиче да је презентовану методологију за процену укупног века на бази цикличних карактеристика материјала како до појаве иницијалног оштећења тако и за анализу ширења прслине проверио и на реалном делу структуре авиона, односно на вези крило-груп авиона, оптерећеној спектром оптерећења.

Литература ове докторске дисертације обухвата 111 наслова који репрезентују стање науке у области чврстоћа и процена века елемената машинских конструкција при општем спектру оптерећења, затим у области механике лома, методе коначних елемената и експерименталних метода. Наведена литература је представљала основу за приказ резултата остварених до сада у области из које је докторска дисертација. Презентована литература садржи и референце на основу којих су постављене хипотезе истраживања и на чије резултате су се надовезала истраживања у овој докторској дисертацији.

4.0 Оцена о испуњености обима и квалитета у односу на пријављену тему

Докторска дисертација кандидата мр Катарине Максимовић, дипл. маш. инж. под насловом "Чврстоћа и процена века елемената машинских конструкција при општем спектру оптерећења":

- Одговара по обиму и садржају прихваћеној теми од стране Наставно - научног већа Машинског факултета у Крагујевцу (Одлука бр. 01-277/2 од 09. 09. 2004.) и Универзитета у Крагујевцу (Одлука бр.1074/61 од 9. 11. 2004.).
- Докторска дисертација је написана је према Упутству о реализацији докторских дисертација у области техничких наука Универзитета у Крагујевцу.
- По квалитету, обиму и резултатима истраживања у потпуности задовољава све научне, стручне и законске услове за израду докторских дисертација.

5.0 Научни резултати докторске дисертације

Резимирајући остварене резултата и поређењем добијених резултата са расположивим резултатима истраживања у овој области у свету, закључује се:

Урађена докторска дисертација представља резултат оригиналног научног рада кандидата у подручју процене века машинских конструкција оптерећених цикличним оптерећењима константне и променљивих амплитуда као и спектра оптерећења.

Посебан значај докторске дисертације огледа се у томе што је у оквиру исте успостављен целовит приступ прорачунске процене укупног века елемената машинских конструкција (до појаве иницијалних оштећења у виду прслина + ширење прслине) при општем спектру оптерећења.

Презентовани прорачунски приступ процене века сложених конструкција редукује веома скупа и дуготрајна испитивања конструкција на замор.

У раду се користе у основи нумеричке методе и то: метода коначних елемената (МКЕ) се користи за анализу напонских стања; сингуларни коначни елементи се користе за одређивање параметара механике лома (ФИН); *нове методе развијене у овом раду на бази густине енергије деформације (ГЕД) за процену преосталог века .*

Ваљаност развијеног приступа у истраживању је верификована поређењима презентованог прорачунског приступа са сопственим експерименталним резултатима.

Преглед остварених резултата рада кандидата у домену чврстоће и процене века елемената машинских конструкција може се исказати у следећим подручјима:

- Кандидат је *развио побољшану/нову методологију* за анализе ширења прслине на бази енергије и процену преосталог века конструкција при цикличним оптерећењима. Овај приступ базира на анализи вредности локалне еласто-пластичне деформације енергије у врху прслине. Суштина овог приступа заснива се на претпоставци да се оштећење у материјалу у врху прслине јавља када енергија у материјалу, у зони врха прслине, достигне критичну вредност. Овај приступ је познат *као метод густине*

енергије деформације (ГЕД). Кандидат је презентовао резултате документовао са комплетним табеларним и детаљним графичким илустрацијама. Треба нагласити, да је до сада ова метода само теоријски разматрана и да је кандидат њеном применом на реалне проблеме дао велики оригинални научни допринос.

- *Развијена је комплетна методологија и развијен је одговарајући софтвер за «хватање» ефеката појединачних позитивних "пикова" у оквиру спектра оптерећења који утичу на брзину ширења прслине. Кроз нумеричке примере, односно нумеричку симулацију, показано је да позитивни пикови доводе до успорења ширења прслине и обрнуто. Добијени резултати су веома инспиративни за даља истраживања у овој области.*
- *Развијена је комплетна методологија за процену укупног века равне епрувете под дејством цикличних оптерећења променљиве амплитуде где се користе исте карактеристике променљивог оптерећења, односно карактеристике малоцикличног замора (МЦЗ) и у фази појаве као и за анализу ширења прслине. Кандидат је резултате прорачунске процене укупног века на бази коришћења карактеристика МЦЗ, верификовао са сопственим експерименталним резултатима на реалним примерима сложених елемената.*
- *Кандидат је развио комплетну нумеричку процедуру за анализу ширења прслине при мешовитим модовима механике лома. Трајекторија ширења прслине код танкозидних структура, при мешовитим модовима механике лома (K_I и K_{II}), је моделирана применом сингуларних коначних елемената и одговарајућих критеријума за одређивање угла иницијалног инкремента ширења прслине. Кандидат је кроз сопствене експерименте показао ваљаност коришћене прорачунске процедуре за нумеричко моделирање трајекторије ширење прслине при мешовитим модовима механике лома.*
- *Кандидат је презентовао методологију за процену укупног заморног века (до појаве иницијалног оштећења+ширење прслине) где се користе исте цикличне карактеристике (карактеристике малоцикличног замора), верификовао кроз сопствена експериментална истраживања.*
- *Посебно је значајно што је кандидат развио комплетно нову методологију за процену укупног века (до појаве иницијалног оштећења+ ширење прслине) код сложених делова конструкција где не постоје аналитички изрази за факторе интезитета напона (ФИН). На основу сопствених резултата добијених применом сингуларних и 3-Д коначних елемената (погл. 7), кандидат је дефинисао ФИН што претставља изузетан допринос инжењерској пракси и науци.*

Кандидат има укупно **23** објављена радова, а од тога у току израде докторске дисертације кандидат је објавио **11** радова у домаћим (6) и међународним (1) часописима, као и на домаћим (2) и међународним(2) Симпозијумима и то:

1. Jovičić, G., Grabulov V., Maksimović S., Živković M., Bošković G., Maksimović K., Residual Life Estimation of a Thermal Power Plant Component - The High-pressure Turbine Housing Case, THERMAL M23= 3

- SCIENCE, (2009), ISSN 0354-9836, Vol. 13 br. 4, str. 99-106.
2. Janković M., Zeljković V., Maksimović K., LOADING SPECTRA DETERMINATION FOR COMPUTING AND LABORATORY TESTING, Scientific Technical Review, ISSN 1820-0206, Vol. LIV, No. 3-4, 2009, str. 60-64. M52= 1.5
 3. Radulović J., Maksimović, K., FILAMENTWOUND COMPOSITE TUBES: EXPERIMENTAL AND NUMERICAL SIMULATIONS RESULTS, Scientific Technical Review, ISSN 1820-0206, Vol. LIX Br. 2, 2009., str. 30-36. M52= 1.5
 4. Maksimović, K., FATIGUE CRACK GROWTH ANALYSIS OF DAMAGED STRUCTURAL COMPONENTS UNDER MODE-I AND MIXED MODES, Scientific Technical Review, ISSN 1820-0206, Vol. LIX Br. 1, 2009., str. 35-40. M52= 1.5
 5. Jovičić G. Živković M., Maksimović K., Đorđević N., The crack growth analysis on the real structure using the X-FEM and EFG methods, Scientific Technical Review, ISSN 1820-0206, No.2, 2008, str 21-26. M52=1,5
 6. Živković I., Maksimović K., Kojović A., Aleksić R., Analysis of Smart Aramid Fiber Reinforced Laminar Thermoelastic Composite Material Under Static Loading, Scientific Technical Review, ISSN 1820-0206, Vol. LVIII, No. 1, 2008, str. 25-31. M52=1.5
 7. Maksimović, K., Nikolić, V., Maksimović, S., Efficient Computation Method in Fatigue Life Estimation of Damaged Structural Components, FACTA UNIVERSITATIS, ISSN 0354-2009, Vol. 4, No. 16, 2004., 101-114. M51=2
 8. Katarina Maksimović, Vera Nikolić-Stanojević, Stevan Maksimović, MODELING OF THE SURFACE CRACKS AND FATIGUE LIFE ESTIMATION, ECF 16, 16th European Conference of Fracture, ECF 16, ISSN 1-4020-4971-4, Alexandroupolis, Grčka, 2006. M33= 1
 9. S. Maksimović, Z. Burzić, K. Maksimović, FATIGUE LIFE ESTIMATION OF NOTCHED STRUCTURAL COMPONENTS: Computation and Experimental Investigations, 16th European Conference of Fracture, ECF 16, ISSN 1-4020-4971-4, Alexandroupolis, Grčka, 2006. M33= 1
 10. Maksimović, K., Nikolić-Stanojević, V., Maksimović S., Modeling of the surface cracks and fatigue crack growth analysis, 25th Yugoslav Congress on Theoretical and Applied Mechanics, Novi Sad, June 1-3, 2005. M63= 0.5
 11. Ružić, D., Maksimović K., Nonlinear FEM applied to the postbuckling analysis of axially compressed layered composite panels, Minisymposia: Computation Methods in Structural Analysis and Optimization by FEM, First Serbian (26th YU) Congress on Theoretical and Applied Mechanics, Kopaonik 2007. M63= 0.5

6.0 Применљивост и корисност резултата у теорији и пракси

Комисија констатује да је кандидат израдом докторске дисертације доказао своју *високу компетентност* у области научно истраживачког рада у области чврстоће и процене века елемената машинских конструкција при општем спектру оптерећења. Такође, кандидат је развојем нове методологије, *остварио вредне резултате* у овој области и тиме допринео прецизнијој, генералнијој и поузданијој прорачунској процени века елемената конструкција како у случају цикличних оптерећења константне амплитуде тако и при општем спектру оптерећења. Тако развијени методологија, са своје стране доприноси ефикаснијем процесу пројектовања.

Са друге стране, развој нумеричког модела и значајне базе података о карактеристикама материјала на замор, створили су добру основу за реалну прорачунску процену века, што је уједно и предмет овог истраживања, али и да се открију критичне зоне у конструкцији и редукују на минимум веома скупа експериментална истраживања.

Кандидат мр Катарина Максимовић је израдом докторске дисертације испољила *научни степен прилаза проблематици* у области динамике понашања конструкција при цикличним оптерећењима константне и променљиве амплитуде. То је кандидату омогућило да успостави комплетну методологију за процену преосталог века конструкција

Резултати до којих је кандидат дошао су веома индикативни за даља истраживања у овој области.

7.0 Начин презентирања резултата научној јавности

Део резултата ове дисертације је публикован кроз радове у домаћим (М51- 1, М52-5) и међународним часописима (М23-1рад), као и на научним домаћим (М63- 2 рада) и међународним (М33-2 рада) скуповима чиме је и део научних резултата публикавањем верификован. Тиме је, ова актуелна тема, презентована широј јавности и учињена још популарнијом.

Кандидат је припремио и проследио у процедуру још два рада у међународним часописима и очекује се ускоро њихово објављивање.

На основу изложеног Комисија доноси следећи

ЗАКЉУЧАК

У току израде докторске дисертације кандидат мр Катарина Максимовић је самостално дошла до *оригиналних научних резултата*, посебно у домену нумеричке симулације ширења прслине и процене преосталог века конструкција оптерећених цикличним оптерећењима, који су садржани у докторској дисертацији и указују на отворене путеве за даље развијање предложених метода.

На основу свега претходно изложеног Комисија за преглед и оцену писаног дела докторске дисертације, једногласно је закључила да докторска дисертација мр Катарине Максимовић, дипл. инж. маш. под насловом

ЧВРСТОЋА И ПРОЦЕНА ВЕКА ЕЛЕМЕНАТА МАШИНСКИХ КОНСТРУКЦИЈА ПРИ ОПШТЕМ СПЕКТРУ ОПТЕРЕЋЕЊА

по квалитету, обиму и резултатима истраживања у потпуности задовољава све научне, стручне и законске услове за израду докторских дисертација. Комисија констатује да је кандидат израдом ове докторске дисертације дао значајан допринос у успостављању прорачунских метода и процедура за процену века конструкција па, са задовољством, предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета у Крагујевцу да овај извештај и докторску дисертацију прихвати као успешно урађен рад и да кандидата позове на јавну усмену одбрану исте.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

1. *Др Светислав Јовичић, редовни професор (у пензији)*
Машински факултет у Крагујевцу
Научна област: Машинске конструкције и механизација

2. *Др Драган Милосављевић, редовни професор*
Машински факултет у Крагујевцу
*Научне области: Примењена механика и
Примењена информатика и рачунарско инжењерство*

3. *Др Миодраг Јанковић, редовни професор*
Машински факултет у Београду
Научне области: Машински елементи, Основи конструкција

4. *Др Златибор Васић, редовни професор*
Факултет Техничких наука, Косовска Митровица
*Научне области: Механика лома, Отпорност материјала, Теорија
еластичности*

5. *Др Вера Николић-Станојевић, редовни професор, ментор*
Државни универзитет у Новом Пазару
Научне области: Теорија конструкција, Нумеричке методе

У Крагујевцу, Београду, Косовској Митровици