

ВЕЋУ ДОКТОРСКИХ СТУДИЈА

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата **Абдусалама Јусефа Солоба** (Abdussalam Youssef Solob), маг. инж. маш.

Одлуком Научно-наставног већа Машинског факултета Универзитета у Београду бр. 1545/2 од 22.10.2020. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата **Абдусалама Јусефа Солоба (Abdussalam Youssef Solob)**, маг. инж. маш., под насловом „**Анализа века под замором оштећеног окова везе крило-груп лаке летелице**“ (*FATIGUE LIFE ANALYSIS OF DAMAGED LIGHT AIRCRAFT WING-FUSELAGE FITTING*).

На основу увида у завршену дисертацију, Комисија подноси следећи

РЕФЕРАТ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Кандидат Абдусалам Јусеф Солоб (Abdussalam Youssef Solob) маг. инж. маш. уписао је прву годину Докторских студија на Машинском факултету Универзитета у Београду школске 2015/16 године, да би већ наредне школске године уписао другу годину студија. По положеним испитима докторских студија кандидат је поднео захтев за одобрење теме докторске дисертације број 716/1 дана 01.06.2020. на Катедри за ваздухопловство Машинског факултета Универзитета у Београду. Кандидат је за ментора предложио проф. др Александра Грбовића, редовног професора Машинског факултета у Београду.

Одлуком Наставно-научног већа број 716/4 од 09.07.2020. године прихваћена је тема докторске дисертације под насловом „Анализа века под замором оштећеног окова везе крило-груп лаке летелице“ (*FATIGUE LIFE ANALYSIS OF DAMAGED LIGHT AIRCRAFT WING-FUSELAGE FITTING*) кандидата Абдусалама Јусефа Солоба (Abdussalam Youssef

Solob) и за ментора је именован др Александар Грбовић, редовни професор Машинског факултета у Београду.

На основу обавештења проф. др Александра Грбовића да је кандидат Абдусалам Јусеф Солоб (Abdussalam Youssef Solob) завршио докторску дисертацију под насловом „Анализа века под замором оштећеног окова везе крило-труп лаке летелице“ (*FATIGUE LIFE ANALYSIS OF DAMAGED LIGHT AIRCRAFT WING-FUSELAGE FITTING*), Наставно-научно веће Машинског факултета у Београду донело је 22.10.2020. године Одлуку број 1545/2 о именовану Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације у саставу:

- др Александар Грбовић, редовни професор Машинског факултета у Београду,
- др Александар Седмак, редовни професор Машинског факултета у Београду у пензији,
- др Горадна Кастратовић, редовни професор Саобраћајног факултета у Београду.

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација под насловом „Анализа века под замором оштећеног окова везе крило-труп лаке летелице“ (*FATIGUE LIFE ANALYSIS OF DAMAGED LIGHT AIRCRAFT WING-FUSELAGE FITTING*) припада области техничких наука – машинство, тј. ужој научној области – ваздухопловство, за коју је Машински факултет Универзитета у Београду матичан. Ментор др Александар Грбовић је редовни професор на Машинском факултету Универзитета у Београду. Као аутор или коаутор до сада је публикувао 25 радова на SCI листи.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Абдусалам Јусеф Солоб (Abdussalam Youssef Solob) је рођен 08.02.1965. у Триполију, Либија, где је завршио основну и средњу школу у периоду 1971-1982. Школске 1982/83 уписао је, а 1989. године завршио студије на Техничком факултету у Триполију, Либија (Faculty of Engineering, Tripoli, Libya), да би магистарске студије уписао 1997. и исте завршио 2000. на Машинском факултету Универзитета у Београду.

Абдусалам Јусеф Солоб поседује вишегодишње радно искуство. У периоду од 1990. године до 2014. године био је запослен као машински инжењер у Истраживачком центру Министарства одбране са седиштем у Триполију (Ministry of defense, Research Centre, Tripoli), а од 2014. запослен је у Либијским ваздушним снагама при Министарству одбране (Libyan Air Force - Air Cargo, Tripoli).

Докторске студије на Машинском факултету Универзитета у Београду уписује школске 2015. године.

Ожењен је и отац је четворо деце.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација кандидата Абдусалама Јусефа Солоба (Abdussalam Youssef Solob), маг. инж. маш. под насловом „Анализа века под замором оштећеног окова везе крило-труп лаке летелице“ (FATIGUE LIFE ANALYSIS OF DAMAGED LIGHT AIRCRAFT WING-FUSELAGE FITTING) је формата А4, има укупно 202 стране штампаних двострано, од којих се 32 стране односе на додатке (appendix A, B and C) и написана је на енглеском језику. Илустрована је са 130 слика, садржи 270 нумерисаних израза и 44 табеле и литературу са 91 референцом.

Докторска дисертација се састоји од следећих поглавља:

1. Увод и преглед литературе;
2. Теоријске основе линеарно-еластичне механике лома;
3. Аналитичко и нумеричко одређивање оптерећења крила лаке летелице;
4. Одређивање оптерећења окова везе крило-труп лаке летелице;
5. Анализа ширења заморне прслине у окуву коришћењем нумеричких метода;
6. Експериментална верификација нумерички добијених вредности;
7. Редизајн ушке окова везе крило-труп;
8. Закључна разматрања;

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

У складу са предметом рада, а ради стицања општег увида у проблематику понашања заморних прслина на оштећеном окуву везе крило-труп применом нумеричких метода, у **првом поглављу** представљен је циљ и предмет истраживања докторске дисертације. У складу с тим, кроз навођења одговарајућих референци указано је на чињеницу да – без обзира на то што се носећи елементи ваздухопловних структура чији се губитак носивости не може надоместити другим елементима структуре пројектују тако да се на њима не појави оштећење услед замора током предвиђеног експлоатационог века – до појаве заморних прслина ипак долази у пракси, због чега институције међународних ваздухопловних власти надлежне за безбедност сада увелико разматрају увођење обавезних тестова на замор окова са иницијалним оштећењем у сврху процене њиховог преосталог века. Такође, указано је да се утврђивање заморног понашања реалног оштећеног окова везе крило-труп лаке летелице може постићи коришћењем нумеричких метода – пре свих методе коначних елемената (МКЕ)

и проширене методе коначних елемената (ПМКЕ) – које представљају алтернативу дуготрајним и скупим експериментима. У овом поглављу је дат и кратак преглед садржаја дисертације по поглављима.

Поглавље број два даје теоријске основе линеарно еластичне механике лома (ЛЕМЛ), од концентрације напона до фактора интензитета напона (ФИН) као једног од основних параметра ЛЕМЛ којим се описује напонско стање у непосредној близини врха прслине. Дата је веза између J-интеграла и ФИН-а, као и теоријски осврти на замор и појаву заморних прслина (са њиховим утицајем на експлоатациони век структуре), као и утицај концентрације напона на појаву и потоњи раст заморних прслина. Представљен је детаљно и Парисов закон који показује утицај ФИН-а на брзину раста заморних прслина и дужину радног века оштећених структура.

У **трећем поглављу** пажња је посвећена одређивању оптерећења крила лаке летелице (чији је оков предмет ове дисертације) током критичних случајева лета коришћењем аналитичких метода, јер се оптерећења са крила директно преносе на оков везе крило-труп и временом могу изазвати заморно оштећење на њему. Сходно томе, у обзир су – приликом одређивања летних оптерећења – узети сви неопходни аеродинамички параметри за све случајеве лета које дефинише стандард EASA CS 23 за лаке летелице. При дефинисању расподеле оптерећења крила по размаху коришћена је Шренкова метода, па су на основу дефинисаних аеродинамичких параметара процењене силе и моменти који се са крила преносе на оков у случајевима лета дефинисаним прописима. У обзир су узете и одговарајуће инерцијалне силе (од корисног терета, масе пилота и горива) да би се што реалније проценило оптерећење окова током лета. У оквиру овог поглавља је дефинисан и нумерички модел крила лаке летелице, па су применом методе коначних елемената, а за претпостављена оптерећења летелице у лету, одређене вредности померања краја крила и напонско стање његових носећих елемената. Касније ће ове вредности (у поглављу шест) бити упоређене са експерименталним вредностима добијеним испитивањем реалног крила.

На основу вредности добијених у поглављу три, у **четвртном поглављу** су детаљно анализирана оптерећења којим је изложен најкритичнији део окова - *ушка окова везе крило-труп* и то за све случајеве оптерећења у складу са EASA CS 23 стандардима, да би се проценили максимални напони којима су ушке током лете изложене. Циклично понављање ових оптерећења током времена изазива оштећења на ушкама (прслине) које угрожавају интегритет лаке летелице. Најнеповољнији случајеви оптерећења су идентификовани да би послужили као улазни подаци за анализе представљене у следећим поглављима.

Тако су, за максимална оптерећења процењена у претходном поглављу, у **поглављу пет** спроведене нумеричке анализе оштећене ушке окова везе крило-труп. Ове анализе извршене су коришћењем методе коначних елемената у оквиру програмског пакета Ansys као и проширеном методом коначних елемената у оквиру програмског пакета Abaqus *Morfeo*. На почетку поглавља дат је кратак преглед поменутих метода, затим начини на који се представљају прслине у нумерици и њихово ширење, као и методе израчунавања фактора интензитета напона на основу којих се – путем Парисовог закона – процењује заморни век. Геометријски модел окова везе коришћен у дисертацији креиран је у САТИА v5 програму, у оквиру рада на пројекту лаке акробатске летелице. На основу анализе напона на окову коришћењем методе коначних елемената, а за оптерећења процењена у претходним поглављима, утврђено је критично место настанка заморне прслине: ушка окова. Даље је

спроведена симулација раста прслине и то у два случаја: у случаја настанка ивичне прслине и у случају стварања пролазне („дубинске“) прслине. Симулације ширења обеју прслина изведене су методом коначних елемената у оквиру програмског пакета Ansys, као и проширеном методом коначних елемената у оквиру програмског пакета Abaqus *Morfeo*. Добијене вредности фактора интензитета напона искоришћене су да се процене бројеви циклуса до лома ушке у оба софтвера за оба типа прслине, а потом су заморни векови упоређени и коментарисани. Установљен је – као што се и очекивало – кратак заморни век окова са прслином на ушци.

Експериментална верификација нумерички добијених вредности померања носећих структура крила представљена је у **шестом поглављу**. Експеримент је вршен на реалном крилу са потпуно функционалним командним површинама и израђеном од алуминијумске легуре 2024-T3. Главни циљ експеримента је био да се упореде померања мерена на 10 карактеристичних места са нумерички добијеним померањима у критичном случају лета. Мерна места су била распоређена на горњаци и доњаци крила. За аквизицију података коришћен је QuantumX (HBM) систем аквизиције, а прикупљени сигнали обрађивани су у Catman (HBM) софтверу и претварани у вредности померања и напона (напон је на 26 места на крилу упоређиван са прорачунским). Добијене вредности померања у експерименту биле су око 10% више од оних добијених нумерички, указујући да је нумерички модел предвидео нешто вишу крутост од оне коју је показало реално крило.

Након што је у поглављу пет показано да се под дејством претпостављеног оптерећења почетна прслина на ушци шири прилично брзо, у **седмом поглављу** је пажња усмерена на редизајн (модификацију) геометрије ушке, тј. проучен је утицај главних геометријских параметара на брзину раста прслине и дат је предлог побољшане геометрије која би требало да буде значајно отпорнија на ширење прслине. Да би се избегло значајно поскупљење производње летелице одлучено је да се изврши редизајн саме ушке, а да се задржи исти материјал. У оквиру четири различита редизајнирана модела варирани су дебљина ушке, радијус заобљења ушке и радијус отвора за осовиницу. Сви остали улазни параметри (гранични услови, вредност оптерећења, материјал) били су идентични оним коришћеним у претходним поглављима, а главни критеријум тј. ограничење је била максимално дозвољена вредност фактора интензитета напона $K_{I_{max}}$ у тренутку настанка прслине. Најдужи век под заморним оптерећењем, већи скоро три пута од првобитног, показао је модел са повећаном дебљином ушке и радијусом заобљења, чија је маса увећана за 75,9% (тј. за око 264 грама). Међутим, ово повећање – када се упоређи са масом целог крила која износи близу 50 килограма – није тако значајно, а поготово ако је безбедност летелице на првом месту. Значајно већи број циклуса до лома при највишем оптерећењу омогућује да се евентуална прслина на време уочи током инспекције, изврше неопходне поправке и тиме спрече катастрофалне последице.

Осмо поглавље донело је закључке и смернице за даља истраживања, као и остварени допринос кандидата решавању предметне проблематике.

У поглављу Литература дат је списак свих извора коришћених у писању дисертације.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Докторска дисертација „Анализа века под замором оштећеног окова везе крило-труп лаке летелице“ (FATIGUE LIFE ANALYSIS OF DAMAGED LIGHT AIRCRAFT WING-FUSELAGE FITTING), кандидата Абдусалама Јусефа Солоба (Abdussalam Youssef Solob), маг. инж. маш. даје савремен и оригиналан допринос повећању поузданости окова везе крило-труп лаке летелице, кроз редизајн путем кога је могуће продужити век окова чак и код појаве заморних оштећења – прслина, које су без обзира на тзв. „safe life“ приступ пројектовању овог елемента уочене у експлоатацији ваздухоплова. Оригиналност се огледа првенствено у предложеној методологији процене заморног века елемента са оштећењем заснованој на најсавременијој нумеричкој методи (проширеној методи коначних елемената), али и класичној методи коначних елемената комбинованој са аналитичким приступом. Предложена методологија, с обзиром на захтеве савременог света који је окренут смањењу материјалних трошкова и повећењу ефикасности у свим сегментима ваздухопловне индустрије, убрзава процесе пројектовања и производње и оптимизује одржавање летелица. Вредности добијене нумерички су верификоване експериментално, а оригиналност добијених резултата у оквиру дисертације потврђују и рад објављен у часопису са SCI листе категорије M21.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У изради дисертације је коришћена литература чији је списак дат у последњем поглављу. Коришћена литература обухвата укупно 91 референце које се баве проблемима понашања и процене радног века елемената веза ваздухопловних структура. Такође је дат осврт из области примене проширене методе коначних елемената, као и методе коначних елемената, у проценама века под замором носећих структура.

Анализом списка коришћене литературе може се закључити да је кандидат располагао већином доступне референтне литературе и да је исту проучио у току израде дисертације и адекватно наводио. Она је послужила као полазна основа за формирање прегледа досадашњих истраживања и релевантан приказ тренутног стања у предметној области.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

У докторској дисертацији су примењене савремене научноистраживачке методе у теоријском и експерименталном истраживању у доменима утврђивања реалних оптерећења која доводе до ширења заморних прслина и процене животног века носећих ваздухопловних структура у које спадају и окови везе крило-труп. Током реализације циљева истраживања коришћене су следеће методе и технике истраживања:

1. Преглед литературе и анализа постојећих метода процене века под замором носећих конструкција, као и остварених резултата из предметне области дисертације.

2. Опис и поставка разматраног проблема (метод дескрипције).

3. Формирање меродавних нумеричких модела заснованих на проширеној методи коначних елемената чија се примена изводи у оквиру програмских пакета Abaqus и Morfeo for Abaqus, као и класичној методи коначних елемената чија се примена изводи у оквиру програмског пакета ANSYS (нумеричке методе).

4. Експериментална верификација нумерички добијених померања структуре под оптерећењем кроз потврђивање и поређење (метод компарације).

5. Анализа података и давање смерница за побољшање заморних карактеристика окова везе крило-труп преко предлога избора елемената геометрије чијом променом се заморни век окова може продужити.

6. Анализа алтернативних геометрија окова и давање предлога окова са измењеном геометријом која даје значајно дужи заморни век.

Изабране методе су адекватне за проблематику истраживања и правилно су коришћене за темељно представљање и анализирање проблема процене заморног века оштећеног окова везе крило-труп лаке летилице.

3.4. Применљивост остварених резултата

Резултати докторске дисертације применљиви су у научном смислу, али имају и широку практичну примену.

Резултати и спроведене анализе развијених оригиналних нумеричких модела омогућавају, на основу дефинисаних параметара механике лома, добијање реалистичне процене брзине раста прлина и заморног века на реалним ваздухопловним носећим структурама. Кандидат је на једном конкретном примеру, какав је оков везе крило-труп, у склопу дисертације демонстрирао методологију редизајна окова базирану на процени заморног века. С обзиром да су на приказаном случају постигнута значајна побољшања код новодобијене геометрије у односу на иницијалну конфигурацију, развијена методологија би се могла применити и на друге носеће структуре и у другим научно-истраживачким областима, чиме се истиче њена практична примена и могућност имплементације у процесу развоја и производње.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Чланови Комисије сматрају да је кандидат показао да има смисао и знање неопходно да самостално препозна и систематски решава инжењерске и научне проблеме примењујући савремене истраживачке методе (нумеричке, аналитичке и експерименталне), те да умешно користи расположиву литературу и неопходан теоријски приступ, све ефикасно комбинујући у сврху испуњења задатог научног циља.

Резултати докторске дисертације доказ су способности кандидата за самостални научно-истраживачки рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1 Приказ остварених научних доприноса

Отварени научни доприноси су следећи:

- Унапређење процеса пројектовања и прорачуна машинских конструкција кроз потврду успешности примене методе коначних елемената и проширене методе коначних елемената у анализи заморног понашања оштећеног окова везе крило-труп лаке летилице, што је приказано у поглављу пет на странама 97-106, а објављено у раду категорије M21 наведеном под [1] у делу 4.3 овог реферата, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104516>. Ово унапређење процеса пројектовања би се убудуће могло користити при оптимизовању и других критичних елемената носећих структура ваздухоплова.
- Предлог методологије којом ће бити могуће ефикасно и са великом тачношћу утврдити колико је нека новопроектвана (или модификована) структура резистентна на ширење оштећења, те колики је њен преостали век под дејствима различитих заморних оптерећења.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

На основу прегледа релевантне научне литературе и сагледавања постојећих решења из области докторске дисертације, може се констатовати да су резултати истраживања у тези значајни и да су примењиви у пракси. Истовремено, на основу увида у задате циљеве истраживања и резултате представљене у докторској дисертацији, може се закључити да су пружени одговори на сва релевантна питања и решени проблеми са којима се кандидат сусрео током истраживања.

Спроведеним истраживањем омогућава се унапређење пројектовања носећих ваздухопловних елемената, у смислу да је на бази добијених резултата, верификованих нумеричких модела и усвојене методологије могуће ефикасно и са великом тачношћу утврдити колико је нека новопроектвана (или модификована) структура резистентна на ширење оштећења, те колики је њен век под дејствима различитих заморних оптерећења.

У овој тези посебна пажња је била посвећена одређивању оптерећења која се са рамењаче крила преносе на оков везе крило-труп коришћењем аналитичких метода, затим експерименталној верификацији нумеричког модела крила и, коначно, нумеричкој анализи заморног понашања оштећеног окова коришћењем методе коначних елемената и проширене методе коначних елемената. На основу изведених закључака о веку под замором оштећеног окова дефинисане су смернице за побољшање његових заморних карактеристика преко предлога промене геометрије уз очување пројектоване геометрије окова. Новопредложена геометрија ушки окова омогућава значајно дужи заморни век оштећеног окова и незнатно већу масу самог носећег елемента.

4.3. Верификација научних доприноса

Верификација добијених оригиналних резултата остварена је кроз рад објављен у међународном часопису категорије M21, а који је везан за истраживања спроведена у оквиру ове докторске дисертације:

[1] **Solob A.**, Grbović A., Božić Ž, Sedmak S.A.: *XFEM based analysis of fatigue crack growth in damaged wing fuselage attachment lug*, - Engineering Failure Analysis, Vol 112, 2020. ISSN 1350-6307, IF 2.249.

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу прегледа и детаљне анализе докторске дисертације под називом „Анализа века под замором оштећеног окова везе крило-труп лаке летелице“ (Fatigue life analysis of damaged light aircraft wing-fuselage fitting) Абдусалама Јусефа Солоба (Abdussalam Youssef Solob) маг. инж. маш., Комисија за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације 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. Комисија такође сматра да дисертација представља оригиналан и веома успешан научно-истраживачки рад, са којим је научна и стручна јавност упозната кроз научни рад објављен у врхунском међународним часопису категорије M21.

Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације закључила је да дисертација представља оригинални научни рад са научним доприносом у области техничких наука, ужа научна област ваздухопловство, па сагласно томе предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета Универзитета у Београду да прихвати Реферат Комисије, да дисертацију под називом називом „Анализа века под замором оштећеног окова везе крило-труп лаке летелице“ (Fatigue life analysis of damaged light aircraft wing-fuselage fitting) Абдусалама Јусефа Солоба (Abdussalam Youssef Solob) маг. инж. маш., стави на увид јавности и да Реферат упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

У Београду, 03.06.2021. године

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

.....
Др Александар Грбовић, редовни професор,
Универзитет у Београду, Машински факултет

.....
Др Александар Седмак, редовни професор,
Универзитет у Београду, Машински факултет

.....
Др Гордана Кастратовић, редовни професор,
Универзитет у Београду, Саобраћајни факултет