

## **НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ**

**Предмет:** Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата  
мр Иване Илић, дипл. маш. инж.

Одлуком Наставно-научног већа Машинског факултета Универзитета у Београду бр. 452/1 од 17.03.2016. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата мр Иване Илић, дипл. инж. маш., под насловом:

### **"НУМЕРИЧКО МОДЕЛИРАЊЕ ДЕЛОВА СТРУКТУРЕ ЛЕТЕЛИЦЕ ОД ВИШЕСЛОЈНИХ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРИЈАЛА У ПОДРУЧЈУ ГЕОМЕТРИЈСКЕ НЕЛИНЕАРНОСТИ"**

После прегледа достављене дисертације и других пратећих материјала и разговора са кандидатом, Комисија је сачинила следећи

## **РЕФЕРАТ**

### **1. УВОД**

#### **1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације**

Кандидат мр Ивана Илић, дипл. маш. инж., пријавила је израду докторске дисертације под називом "Нумеричко моделирање делова структуре летелице од вишеслојних композитних материјала у подручју геометријске нелинеарности", Машинском факултету Универзитета у Београду, дана 24.11.2014. године под бројем 3022/1. Кандидат је за ментора предложила професора др Златка Петровића.

На основу пријаве кандидата, предлога Катедре за ваздухопловство број 256/1 од 13.02.2015. године, и одлуке Наставно-научног већа Машинског факултета Универзитета у Београду број 256/2 од 19.02.2015. године прихваћен је предлог о испуњености услова и о научној заснованости теме докторске дисертације, а за ментора је именован проф. др Златко Петровић.

На основу захтева докторанта, одлуке Наставно-научног већа Машинског факултета о испуњености услова кандидата за израду докторске дисертације и о именовану ментора и на основу сагласности Већа научних области техничких наука Универзитета у Београду, са седнице од 09.03.2015. године одобрена је тема докторске дисертације под називом "Нумеричко моделирање делова структуре летелице од вишеслојних композитних

материјала у подручју геометријске нелинеарности" под бројем 499/1 од 24.03.2015. године.

Катедра за Ваздухопловство је 29. фебруара 2016. године упутила Декану и Наставно-научном већу Машинског факултета Универзитета у Београду допис (број 452/1) о завршетку докторске дисертације.

Наставно-научно веће је на седници одржаној 17.03.2016. године усвојило обавештење о завршетку дисертације кандидата и донело Одлуку (број 452/2) о именовану Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације у саставу:

- др Златко Петровић, ред. проф., ментор,
- др Слободан Ступар, ред. проф.,
- др Мирко Динуловић, ванр. проф.,
- др Александар Симоновић, ванр. проф.,
- др Зоран Стефановић, ред. проф. М.Ф. у пензији.

## 1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација "Нумеричко моделирање делова структуре летелице од вишеслојних композитних материјала у подручју геометријске нелинеарности" припада области техничких наука, односно Машинству, ужа научна област Ваздухопловство, за коју је матичан Машинских факултет Универзитета у Београду.

## 1.3 Биографски подаци о кандидату

Ивана Илић је рођена 19.04.1976. године у Београду где је завршила основну школу и XIII београдску гимназију. На Машински факултет Универзитета у Београду се уписала школске 1995/96. године. Дипломирала је 2002. године на Одсеку за Ваздухопловство. Последипломске студије на Одсеку за Ваздухопловство Машинског факултета у Београду је завршила 2009. године одбраном магистарске тезе "Анализа чврстоће вишеслојних композитних структура у зони механичких спојева".

Од 2003. године је запослена у Војнотехничком институту, Одсеку за прорачун чврстоће - Сектор за Ваздухопловство, где се тренутно налази на месту Водећег истраживача. До сада је била ангажована на пројектима: Авион за почетну обуку ЛАСТА, Мини беспилотна летелица "Врабац", Тактичка беспилотна летелица "Пегаз", Истраживања у области композитних материјала, Истраживања у области чврстоће и испитивања на замор лопатице репног ротора хеликоптера ХТ-40 од металкомпозитних материјала, Продужење животног века авиона Г-4 на експлоатацији у Републици Мијанмарска Унија и др.

Од 2013. до 2015. године је била ангажована као асистент на предмету Машински материјали на Војној академији у Београду.

Од осталих карактеристика се издвајају: добила похвалу „Растко Стојановић“ за рад презентован на Првом интернационалном конгресу теоријске и примењене механике, 2007. године, Златну плакету на изложби Проналазаштво 2008 и Бронзану медаљу са ликом Николе Тесле на изложби Проналазаштво 2009, члан је српског друштва за Механику, била члан организационог одбора Трећег и Четвртог интернационалног конгреса теоријске и примењене механике (2011. и 2013. године).

Завршила је курсеве: "Composite Material Structures - Continuing Professional Development course" у организацији Cranfield University, United Kingdom, и обуку за софтверски пакет "CATIA V5 - Aerospace Industry Solution", у организацији CAD-CAM Data из Београда.

Течно говори енглески језик.

## 2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

### 2.1 Садржај дисертације

Докторска дисертација кандидата мр Иване Илић, дипл. маш. инж. под насловом "Нумеричко моделирање делова структуре летелице од вишеслојних композитних материјала у подручју геометријске нелинеарности" је документ формата А4, штампан једнострано, са текстом на српском језику на 136 нумерисаних страница. Дисертација садржи укупно осам поглавља, списак литературе, кратку биографију и прилоге. Назив поглавља је следећи:

1. Уводна разматрања
2. Преглед коришћене литературе
3. Вишеслојне композитни материјали
4. Беспилотне летелице композитне структуре
5. Композитнигибањ Тактичке беспилотне летелице Пегаз
6. Прорачун композитноггибањ примене методе коначних елемената
7. Поређење нумеричких и експерименталних резултата
8. Закључак

Литература

Прилози

Биографија

Текст је илустрован са 120 слика и 35 табела. У попису коришћене литературе наведене су 32 библиографске јединице.

### 2.2 Кратак приказ појединачних поглавља

У Уводном поглављу су дате уводне напомене, које говоре о предмету и циљу истраживања у оквиру рада и описан је садржај дисертације.

Поглавље "Преглед коришћене литературе" даје осврт на литературу која је коришћена у раду као и досадашња истраживања из домена рада.

У Поглављу "Вишеслојни композитни материјали" је приказана општа ламинатна теорија вишеслојних композита са ортотропним карактеристикама слојева. Изведене су конститутивне зависности за вишеслојне композитне плоче изложене раванском напрезању и савијању. Изведене су и матрице крутости ламината. У овом поглављу је дат и приказ критеријума иницијалног отказа појединих слојева вишеслојних композитних структура под дејством статичког оптерећења, са посебним акцентом на Tsai-Wu критеријум иницијалног отказа. Дефинисан је коефицијент иницијалног отказа (F.I.).

У Поглављу "Беспилотне летелице композитне структуре" су дате основне карактеристике Тактичке беспилотне летелице „Пегаз“ и основне карактеристике опруга типагибањ, који представља главни стајни трап ове летелице.

У Поглављу "Композитни гибњак тактичке беспилотне летелице Пегаз" је детаљно приказано конструктивно решење гибња и процес његове производње. Експерименталним путем, применом стандарда ASTM D 3039, су одређене механичке карактеристике композитних материјала који су коришћени за израду гибња.

У Поглављу "Прорачун композитног гибња применом методе коначних елемената" је приказано моделирање композитног гибња методом коначних елемената у програмским пакетима FEMAP и MSC NASTRAN. Дат је кратак осврт на методу коначних елемената. Приказана су оптерећења која делују на главни стајни трап приликом слетања, добијена применом стандарда JAR/VLA. Детаљно је описан модел коначних елемената. Објашњена је специфичност геометријски нелинеарне анализе која је коришћена током прорачуна. За одређивање нивоа оптерећења при којем долази до отказа структуре је коришћен Tsai-Wu критеријум иницијалног отказа. У овом поглављу су дати сви резултати прорачуна, у виду померања и чврстоћа, за слетне случајеве оптерећења и случајеве оптерећења изведених из слетних случајеве које је предвиђено експериментално испитати.

У Поглављу "Поређење нумеричких и експерименталних резултата" су дати резултати експерименталног испитивања гибња у виду крутости (померања). Приказани су и резултати испитивања гибња до отказа ради верификације статичке чврстоће гибња. Сви резултати добијени експерименталним путем су упоређени са нумерички добијеним резултатима и добијено је добро слагање, чиме је потврђена оправданост коришћења приказане нумеричке процедуре за одређивање чврстоће и крутости гибња.

У Поглављу "Закључак" су дате напомене о резултатима постигнутим у раду. Истакнуте су могућности и предности процедуре за нумеричко моделирање композитних структура које су коришћене у овом раду. Дате су смернице за наставак истраживања у области приказаној радом.

На крају је наведена литература која је коришћена током спроведених истраживања и рада на реализацији докторске дисертације. У прилогу су дати дијаграми добијени експерименталним одређивањем механичких карактеристика материјала.

### **3 ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ**

#### **3.1 Савременост и оригиналност**

Дисертација "Нумеричко моделирање делова структуре летелице од вишеслојних композитних материјала у подручју геометријске нелинеарности" кандидата мр Иване Илић, дипл. маш. инж., представља поуздан и ефикасан начин за одређивање структуралних карактеристика делова летелице израђених од композитних материјала чије понашање улази у област геометријске нелинеарности. Тренутни тренд у свету је да се највећи део структуре летелица, а нарочито беспилотних летелица, израђује од композитних материјала а прорачун чврстоће структуралних елемената је неизоставни део процеса пројектовања летелица. Приликом прорачуна структуралних елемената израђених од композита коришћење методе коначних елемената узима примат над применом класичних инжењерских метода, те је неопходно успоставити поуздану процедуру за прорачун оваквих елемената. У оквиру рада, резултати коришћене методе су потврђени и експерименталним путем. Резултати остварени у оквиру свих спроведених истраживања потврђују актуелност и значај докторске дисертације за научно-стручну јавност.

### 3.2 Осврт на референтну и коришћену литературу

У предметној докторској дисертацији коришћена је обимна литература која разматра област пројектовања и нумеричког моделирања композитних структуралних елемената, нарочито композитног гибња у авио и аутомобилској индустрији, као и основе прорачуна вишеслојних композитних структура. Велики број литературних извора говори о актуелности истраживања у области беспилотних летелица, структуралних елемената израђених од вишеслојних композитних материјала, поступка испитивања стандардних и комплексних епрувета као и структуралних елемената, класичних инжењерских метода за прорачун елемената израђених од композита. Анализом списка коришћене литературе може се закључити да је кандидат располагала већином доступне референтне литературе коју је проучила у току израде дисертације, као што су стручни уџбеници, радови у међународним часописима, релевантни стандарди за пројектовање, прорачун и испитивање ваздухоплова. Кандидат је кроз објављивање резултата свог рада, самостално и као коаутор, имала прилике да упозна стручну и научну јавност са резултатима својих истраживања и да се током израде дисертације позиционира према актуелним истраживачким резултатима у свету.

### 3.3 Опис и адекватност примењених научних метода

У докторској дисертацији су примењене савремене научноистраживачке методе у теоријском и експерименталном истраживању у домену прорачуна композитних структуралних елемената беспилотних летелица. Током реализације циљева истраживања коришћене су следеће методе и технике истраживања:

- Метода теоријске анализе је коришћена како би се сумирала досадашња теоријска знања у области пројектовања структуралних делова израђених од композитних материјала. У овом сегменту истраживања коришћена је и метода систематизације и класификације помоћу којих су, на основу прегледа литературе и анализе резултата приказаних у њој, утврђени правци истраживања у докторској дисертацији.
- Као основна метода истраживања се користи нумеричка метода, метода коначних елемената (МКЕ). Помоћу ове методе је генерисана мрежа коначних елемената којом се мења стварни елемент, тако да је било могуће резултате добијене на овај начин пренети са модела на реални елемент или конструкцију. Ова метода је послужила за одређивање свих неопходних података о чврстоћи и крутости главног стајног трапа беспилотне летелице.
- За одређивање механичких карактеристика материјала коришћена је експериментална метода.
- За верификацију резултата добијених применом МКЕ изведено је експериментално одређивање чврстоће и крутости гибња тактичке беспилотне летелице.
- За обраду података добијених експерименталним путем коришћене су статистичке методе.

Истраживање је засновано на репрезентативном узорку тако да се резултати истраживања могу генерализовати. Изабране методе су адекватне за проблематику истраживања и правилно су коришћене у фази развијања модела, анализи резултата и при извођењу закључака.

### 3.4 Применљивост остварених резултата

Резултати докторске дисертације, поред евидентне научне вредности, имају и широку практичну примену. Успостављена процедура за прорачун делова структуре композитних летелица може да се примени у процесу пројектовања и тиме се значајно смањују трошкови пројектовања. Смањује се број неопходних експерименталних испитивања, који су прилично скупи, као и број елемената које је неопходно произвести у процесу пројектовања, за потребе испитивања.

Процедуру прорачуна је могуће применити и на друге структуралне елементе израђене од вишеслојних композитних материјала а код којих се јављају велике деформације током експлоатације. Један од примера могуће примене приказаног метода прорачуна у области ваздухопловства би било крило велике виткости.

### 3.5 Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат је током израде докторске дисертације показао да је у стању да самостално решава научне проблеме и да влада научним и истраживачким методама те да поседује потребна стручна, теоријска и практична знања потребна за самостални научни рад што је показано реализацијом планираног истраживања од иницијалне идеје до завршетка докторске дисертације.

## 4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

### 4.1 Приказ остварених научних доприноса

Докторска дисертација, по мишљењу Комисије, представља савремен и оригиналан рад, који даје веома значајан допринос у области ваздухопловства. Остварени научни допринос докторске дисертације "Нумеричко моделирање делова структуре летелице од вишеслојних композитних материјала у подручју геометријске нелинеарности" огледа се у следећем:

- приказан је прегледан и детаљан приказ научних и емпиријских сазнања релевантних за област истраживања,
- успешно је успостављена процедура прорачуна чврстоће и крутости структуралних елемената тактичке беспилотне летелице израђене од вишеслојних композитних материјала, чије деформације улазе у подручје геометријске нелинеарности,
- структурални елемент је апроксимиран дводимензионим, па је примењена ламинатна теорија и критеријуми лома. Апроксимација је верификована испитивањем елемента. Тиме је значајно скраћено време потребно за формирање прорачунског модела а да није изгубљено на тачности добијених резултата,
- за моделирање структуре, без обзира на изузетно малу дебљину појединачног слоја ламината као и велики број слојева, могу се корисити стандардни компјутерски ресурси,
- процедура за одређивање иницијалног лома/отказа базира се на методологији која је развијена за потребе авио индустрије а подједнако се може применити и на друге конструкције изложене статичким оптерећењима,

- приказани поступак моделирања је могуће користити у свакодневној инжењерској пракси.

Приказана процедура прорачуна је потврдила своја очекивања, што је у дисертацији јасно приказано.

#### 4.2 Критичка анализа резултата истраживања

На основу прегледа релевантне научне литературе и сагледавања постојећих решења из области докторске дисертације, констатујемо да су резултати истраживања у тези значајни и да су применљиви у пракси. На основу увида у задате циљеве истраживања и резултате представљене у докторској дисертацији, можемо да закључимо да су пружени сви одговори на сва релевантна питања и решени проблеми са којима се кандидат сусрео у току истраживања.

Развијена метода прорачуна чврстоће и крутости композитних структуралних елемената у области геометријске нелинеарности представља значајан корак у процесу пројектовања ваздухоплова.

Добијени резултати истраживања у знатној мери смањују трошкове пројектовања беспилотних летелица, јер се применом приказаног начина прорачуна смањује неопходан број скувих експерименталних испитивања структуралних елемената.

Изложени резултати су експериментално верификовани и тиме је обезбеђена могућност применљивости на остале структуралне елементе израђене од вишеслојних композита, првенствено у области ваздухопловства.

#### 4.3 Верификација научних доприноса

Докторанд мр Ивана Илић се дуги низ година бави проблематиком прорачуна ваздухопловних структура израђених од композитних материјала и метала. Свој научни допринос је верификовала радовима који су објављени у референтним међународним и домаћим часописима и саопштени на међународним конференцијама, и патентом:

##### Категорија М22

1. **Илић И.**, Петровић З., Максимовић М., Ступар С., Стаменковић Д., *Computation Method in Failure Analysis of Mechanically Fastened Joints at Layered Composites*, Journal of Mechanical Engineering Vol 58, No 9, 2012. (9) DOI:10.5545/sv-jme.2011.157, ISSN 0039-2480, pp. 553-559, IP=0.883.

##### Категорија М33

2. **Илић И.**, *Failure Analysis of Composites Containing Pin-Loaded Holes Considering as FE Contact Problem*. First Serbian (26<sup>th</sup> YU) Congress on Theoretical and Applied Mechanics, Kopaonik, Serbia, April 10-13, 2007, ISBN 978-86-909973-0-5, pp. 775-783,
3. **Илић И.**, *Прорачун чврстоће структуре у зони механичких спојева код конструкција од композитних материјала*, 2. Научно-стручни скуп из области одбрамбених технологија, ОТЕХ 2007, Војнотехнички институт, Београд, Србија, 03-05. октобар 2007. ISBN 978-86-81123-48-5, pp. II-133 – II-137,
4. Максимовић С., **Илић И.**, Блажић М., Васовић И., Зрилић М., *Fatigue Life Analysis of Aircraft Wing-Fuselage Joints Under Variable Amplitude Loading*, 3. научно-стручни скуп са међународним учешћем из области одбрамбених технологија,

- ОТЕХ 2009, Војнотехнички институт, Београд, 08-09. октобар 2009. ISBN 978-86-81123-40-9
5. **Илић И.**, Ђурић М., *Numerical Simulation of Mechanically Fastened Joints by Finite Elements*, Third Serbian (28th Yu) Congress on Theoretical and Applied Mechanics, Vlasina lake, 5-8 July 2011, ISBN 978-86-909973-4-3, pp. 897-908
  6. **Илић И.**, Перковић С., Илић Д., Бојанић М., *Strength Analysis of Main Landing Gear Type Layered Composite Leaf Spring for Unmanned Aerial Vehicle*, ОТЕХ 2012, Војнотехнички институт, Београд, 18-19. септембар 2012., ISBN 978-86-8123-58-4,
  7. **Илић И.**, Илић Љ., Перковић С., Блажић М., *Strength Analysis Of Composite Structural Elements For Unmanned Aerial Vehicle*, Fourth Serbian (29th Yu) Congress on Theoretical and Applied Mechanics, Vrnjačka banja, 4-7 Jun 2013, ISBN 978-86-909973-5-0, pp. 431-436,
  8. Блажић М., **Илић И.**, Assoul Y., *Fatigue Life Analysis for Three-dimensional Cracked Lugs*, Fourth Serbian (29th Yu) Congress on Theoretical and Applied Mechanics, Vrnjačka banja, 4-7 Jun 2013, ISBN 978-86-909973-5-0, pp. 395-400,
  9. Стефановић В., Рашуо Б., **Илић И.**, Антонић В., Васић З., *Tailplane Modification of the Training Aircraft*, ОТЕХ 2014, Vojnотехнички институт, Beograd, 09-10 October 2014, стр 157-163

#### Категорија М52

10. Ђорђевић З., Максимовић С., **Илић И.**, *Dynamic Analysis of Hibrid Aluminium/Composite Shafts*, Scientific Technical Review, Vol. LVIII, No.2, Belgrade, 2008. ISSN 1820-0206, pp. 3-7
11. **Илић И.**, *Numerical Simulation of Composite Structure Failure in the Areas of Geometric Discontinuities*, Scientific Technical Review, Vol. LVIII, No. 2, Belgrade, 2008. ISSN 1820-0206, pp. 32-37
12. Максимовић С., **Илић И.**, Георгијевић Д., Васић З., Бојанић М., Стефановић В., *Structural Analysis and Static Testing of a Tactical Unmanned Aerial Vehicle*, Scientific Technical Review, 2013, Vol. 63, No. 2, pp. 58-62, UDK: 623.466.3:621.7:620.192.30.3, COSATI: 11-04, 20-12, ISSN 1820-0206, UDC: 355/359:62

#### Категорија М92

13. Илић Д., **Илић И.**, *Угломер за мерење отклона командних површина авиона*, Војнотехнички институт, Београд пријава број П-2009/0325, решење број 52609.

### **5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ**

На основу прегледа и детаљне анализе докторске дисертације под називом "Нумеричко моделирање делова структуре летелице од вишеслојних композитних материјала у подручју геометријске нелинеарности" кандидата мр Иване Илић, дипл. маш. инж., Комисија за 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 Универзитета у Београду. Дисертација садржи савремен приступ актуалној проблематици прорачуна ваздухоплова од композитних материјала, и резултати су успешно верификовани, што обезбеђује могућност широке примене. Такође, Комисија констатује да су испуњени и обавезни акредитациони услови: кандидат има један, а ментор више од пет радова објављених у међународним часописима са ISI-JCR-SCI листе.



Комисија је закључила да је кандидат мр Ивана Илић, дипл. маш. инж., успешно завршила докторску дисертацију "Нумеричко моделирање делова структуре летелице од вишеслојних композитних материјала у подручју геометријске нелинеарности", која представља оригинални научни рад са научним доприносом у области техничких наука, ужа научна област Ваздухопловство, и предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета Универзитета у Београду да овај Реферат прихвати, стави дисертацију на увид јавности и да, у складу са Законом и Статутом Машинског факултета, закаже њену јавну одбрану.

У Београду, 19. априла 2016. године

Чланови Комисије за оцену и одбрану:

---

др Златко Петровић, ред. проф., ментор  
Универзитет у Београду, Машински факултет

---

др Слободан Ступар, ред. проф.  
Универзитет у Београду, Машински факултет

---

др Мирко Динуловић, ванр. проф.  
Универзитет у Београду, Машински факултет

---

др Александар Симоновић, ванр. проф.  
Универзитет у Београду, Машински факултет

---

др Зоран Стефановић  
ред. проф. Машинског факултета у пензији