

## **ВЕЋУ ДОКТОРСКИХ СТУДИЈА**

**Предмет:** Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Ане Петровић

Одлуком бр. 1163/2 од 01.06.2017. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Ане Петровић, маг. инж. маш., под насловом

### **„Моделско испитивање чврстоће структура сложене просторне геометрије“**

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 Ана Петровић, маг. инж. маш., је на Докторске студије на Машинском факултету Универзитета у Београду уписан школске 2011/2012. године. После положених испита и стечених других услова, поднео је захтев бр. 1030/1 од 05.05.2016. године, за одобравање израде докторске дисертације под насловом „Моделско испитивање чврстоће структура сложене просторне геометрије“. Наставно-научно веће Машинског факултета Универзитета у Београду формирало је Комисију у саставу проф. др Ташко Манески, проф. др Весна Милошевић-Митић, проф. др Момчило Дуњић, проф. др Наташа Тришовић, проф. др Драган Игњатовић (Рударско-геолошки факултет Универзитета у Београду), са задатком да оцени подобност теме и кандидата за израду Докторске дисертације. Комисија је поднела позитиван Извештај бр. 1160/3 од 21.06.2016. године. Наставно-научно веће Машинског факултета у Београду је Одлуком бр. 1160/4 од 23.06.2016. године прихватило предлог Комисије о испуњености услова и о научној заснованости теме докторске дисертације „Моделско испитивање чврстоће структура сложене просторне геометрије“. Веће научних области техничких наука, Универзитета у Београду својом одлуком бр. 61206-3360/2-16 од 04.07.2016. дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације, а за ментора именовало проф. др Ташка Манеског.

На предлог ментора проф. др Ташка Манеског, Катедре за отпорност конструкција и Комисије за докторске студије, Наставно-научно веће Машинског факултета Универзитета у Београду, одлуком бр. 1163/2 од 01.06.2017. именовало је Комисију за преглед, оцену и одбрану Дисертације са задатком да поднесе Извештај о урађеној Дисертацији кандидата Ане Петровић, под насловом „Моделско испитивање чврстоће структура сложене просторне геометрије“.

## 1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација под насловом „Моделско испитивање чврстоће структура сложене просторне геометрије“ припада области техничких наука (машинство), ужа научна област Отпорност конструкција, које припадају Машинском факултету Универзитета у Београду.

Ментор, проф. др Ташко Манески, аутор је преко двадесет научних радова објављених у часописима са SCI листе, из научне области којој припада и ова дисертација.

## 1.3. Биографски подаци о кандидату

Ана Петровић рођена је 23.01.1988. године у Београду. Након завршене основне школе уписала је Четврту гимназију у Београду (природно-математички смер), коју је завршила 2006. године као Ђак генерације. Машински факултет Универзитета у Београду уписала је 2006. године. Основне академске судије (B.Sc.) завршила је 2009. године, а Дипломске академске студије (M.Sc.) 2011. године са укупном просечном оценом 10/10. Током студија добијала је Похвале за изванредан успех од стране факултета. Осим тога, била је носилац стипендије Фонда за младе таленте „Доситеја“ и Стипендије града Београда.

Докторске академске студије уписала је 2011. године на истом факултету. Положила је све испите предвиђене Програмом усавршавања. Осим обавезних предмета, положила је следеће изборне предмете: Теорија еластичности, Термоелеастичност, Метода коначних елемената, Компјутерско моделирање и прорачун структура, Мерење напона и деформације, као и четири лабораторијска предмета (Истраживање и публикавање I, II, III и IV). Такође, радила је на великом броју експеримената у оквиру Лабораторије за Отпорност конструкција Машинског факултета.

Запослена је на Машинском факултету од 15.12.2011. године као асистент на Катедри за Отпорност конструкција. Учествоје у настави из предмета Отпорност материјала ID: 0020, позиција у распореду 1.3 (ОАС) и Основи отпорности конструкција ID: 0021, позиција у распореду 2.2 (ОАС). Током школске 2016/2017. године, ангажована је у настави на Рударско-геолошком факултету Универзитета у Београду, за извођење вежби из предмета Механика 1 и Отпорност материјала.

Од школске 2014/2015. године, члан је Комисије за маркетинг студија Машинског факултета.

Служи се свим програмима из пакета Microsoft Office, као и програмима за цртање, моделирање и нумеричке прорачуне КОМПАС, Catia, Solid Works, Rhinoceros. Течно говори енглески, а служи се француским језиком.

## **2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ**

### 2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација кандидата Ане Петровић, под насловом Моделско испитивање чврстоће структура сложене просторне геометрије је документ формата А4, са текстом на српском језику на 231 нумерисаној страни. Дисертацију чине следећа поглавља:

1. Увод
2. Нумеричка метода коначних елемената
3. Експерименталне методе

4. Поставке Теорије сличности
  5. Нумерички прорачун стварне предметне конструкције
  6. Нумерички прорачун умањене структуре
  7. Израда лабораторијског умањеног модела
  8. Нумерички прорачун лабораторијског модела
  9. Поставка експерименталног испитивања
  10. Експериментални резултати и њихова анализа
  11. Нумерички прорачун целовите конструкције
  12. Закључак
- Литература  
Биографија аутора  
Прилози

Текст садржи 149 слика и 36 табела. У попису коришћене литературе наведено је 107 библиографских јединица.

## 2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У првом поглављу дата су почетна разматрања која обухватају садашње стање науке у области моделског испитивања и Теорије сличности. С обзиром на изабрану испитну конструкцију, дат је и преглед литературе из области сложених структура. Пошто је преглед досадашње литературе из ових области оправдао почетне хипотезе и дао даљу мотивацију за израду умањеног модела, размотрене су методе дијагностике које ће бити коришћене. Ту су неизбежне метода коначних елемената, као нумеричка, и метода мерних трака и метода за дигиталну корелацију слика, као експерименталне методе. Дат је приказ досадашње примене ових метода на основу доступне литературе. На крају првог поглавља направљен је план истраживања, установљена методологија и полазне идеје.

У другом поглављу приказане су основне поставке Методе коначних елемената.

У трећем поглављу приказане су основне поставке Методе за дигиталну корелацију слика (која се користи за бесконтактно мерење померања и деформација).

У четвртом поглављу приказане су основне поставке теорије сличности.

У петом поглављу приказан је статички прорачун модела који је назван стварна структура и она је референтна за даље истраживање. Стварном структуром је названа збирна структура доње градње, обртне платформе и доњег дела стубова (стубови су “скраћени” до зоне чворних плоча косника) роторног багера. То што су стубови елиминисани из разматрања нема утицаја на квалитет истраживања, јер се у њима не очекује лоше понашање (показано у Поглављу 11). Резултате нумеричког прорачуна представљају поља напона и деформација конструкције. Као референтне тачке за упоређивање померања (за овај и наредне прорачунске моделе), усвојене су чворне тачке лежаја, јер их садрже сви модели, далеко су од места уноса оптерећења и дефинишу начин на који се оптерећење преноси са горње градње на доњу градњу. Урађен је и динамички прорачун ове структуре.

У шестом поглављу приказан је статички прорачун умањене структуре. Умањеном структуром названа је структура која је од стварне структуре мања 10 пута по димензијама и по дебљинама конструктивних елемената. Умањена структура је у односу на стварну структуру оптерећена 100 пута мањим оптерећењем (у складу са поставкама Теорије сличности). Спроведена је анализа пресликавања напона по групама градње предметне конструкције и процењени су коефицијенти пресликавања за сваку од њих. Закључено је да

је веза напона умањене структуре и стварне структуре линеарна. Дијагностификовано је доминантно мембранско напрезање структуре које има за последицу коефицијент пресликавања близак 1, али су и идентификоване зоне концентрације напона у којима је доминантан смицајни мембрански напон, тако да је у тим зонама процењен коефицијент пресликавања 1,22. Урађен је и динамички прорачун умањене структуре. У односу на прорачун стварне структуре, сопствене фреквенце умањене редуковане структуре су 10 пута веће (што је у потпуној сагласности са Теоријом сличности).

У седмом поглављу описан је начин реализације физичког умањеног модела.

У осмом поглављу приказан је нумерички прорачун изведеног лабораторијског модела, који се од умањене структуре разликује по хоризонталној плочи која везује скраћене стубове и по селективно промењеним дебљинама појединих лимова. Овоме се прибегло због потребе за објективно што већом унификацијом и оптимизацијом примењених материјала. Прорачун је урађен са усвојеним верикалним симетричним оптерећењем. Урађен је и динамички прорачун лабораторијског модела.

У деветом поглављу приказана је поставка експеримента. Изведено је паралелно тестирање модела мерним тракама и системом за бесконтактно мерење померања и деформације на унапред дефинисаним зонама. То је обухватило са једне стране, позиционирање мерних трака и припрему система за аквизицију, а са друге, припрему стохастичких шара на местима предвиђеним за снимање, уз калибрацију камере на одређену мерну запремину.

У десетом поглављу дати су резултати експеримента и извршена је њихова анализа. Резултати мерења су обрађени, анализирани и упоређени са резултатима нумеричког прорачуна. Добијена су висока поклапања резултата на свим изабраним местима и може се закључити да је нумерички модел верификован на овај начин. Исто тако, дата су упоредна мерења методе мерних трака и система за бесконтактно мерење померања и деформације, којима су демонстриране предности и недостаци једне и друге методе.

У једанаестом поглављу дат је приказ нумеричке анализе комплетног прорачунског модела доње градње, обртне платформе, стубова и аксијалног лежаја конструкције багера SchRs 630 (целовита конструкција), укључујући све делове конструкције који утичу на крутост. Јасно су идентификоване зоне концентрација напона целе конструкције, као резултат статичког прорачуна. Исто тако, урађен је динамички прорачун целовите конструкције, који је значајан како са аспекта идентификације динамичког понашања, тако и као помоћ приликом идентификације слабих места конструкције.

У дванаестом поглављу дати су општи закључци проистекли из приказаних истраживања, као и смернице за будућа истраживања.

Након ових дванаест поглавља дат је списак референтне литературе коришћене током истраживања.

### **3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ**

#### 3.1. Савременост и оригиналност

Докторска дисертација „Моделско испитивање чврстоће структура сложене просторне геометрије“ кандидата Ане Петровић, маг. инж. маш., представља савремени и оригиналан приступ моделском испитивању структура. Развијена је сопствена методологија испитивања сложених структура. Развијени су комплетни прорачунски модели јако сложених структура, који омогућавају детаљно проучавање понашања ових структура. За експериментална испитивања коришћена је најсавременија метода за бесконачно мерење померања и деформација.

#### 3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У докторској дисертацији је коришћена литература из области теорије сличности, из које је проистекла идеја о моделском испитивању сложених конструкција. С обзиром на изабрану угледну конструкцију, дат је преглед литературе која се бави чврстоћом сложених конструкција. Дат је осврт на литературу из области методе коначних елемената и методе за дигиталну корелацију слика.

#### 3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

У оквиру ове дисертације примењене су теоријске, рачунарске, експерименталне и комбиноване научне методе.

Применом теоријских метода, као што је теорија сличности, дефинисане су полазне хипотезе.

Савремене методе дијагностике конструкција подразумевају нумеричко-експериментални приступ. Све нумеричке анализе изведене су помоћу методе коначних елемената, без које се савремено пројектовање и испитивање челичних конструкција не може замислити. У реализацији експеримента коришћене су метода мерних трака и метода за дигиталну корелацију слика (систем за бесконачно мерење померања и деформација), уз помоћ којих је експеримент успешно изведен.

#### 3.4. Применљивост остварених резултата

Резултати докторске дисертације применљиви су у научном смислу, али имају и широку практичну примену. Развијена методологија омогућава проучавање других конструкција, јер је у раду доказано да је могуће моделско испитивање сложених структура (а у сагласности са Теоријом сличности).

Закључци добијени испитивањем овог типа структура могу бити укључени у процес пројектовања нових сличних структура.

Сазнања добијена током реализације овог рада могу бити директно примењена за идентификацију понашања реалне структуре у њеним радним условима.

#### 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 показао реализацијом планираног истраживања од иницијалне идеје до завршетка докторске дисертације.

## **4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС**

### 4.1. Приказ остварених научних доприноса

Остварени научни доприноси докторске дисертације:

- формиран је поуздан нумеричко-експериментални модел просторне структуре роторног багера за потребе моделског испитивања;
- развијена је комплексна иновативна методологија моделског испитивања чврстоће структуре сложене просторне геометрије, коју је могуће применити и за испитивање других конструкција;
- детаљном нумеричко-експерименталном дијагностиком утврђене су лоше зоне понашања моделске структуре са аспекта високе вредности напона и његове концентрације;
- нумерички је утврђено и доказано да је зависност напона и деформације стварне и умањене моделске конструкције линеарна;
- процењени су коефицијенти пресликавања напонских стања између умањене и стварне конструкције по групама градње;
- дијагностификовано је доминантно мембранско напрезање структуре које има за последицу коефицијент пресликавања близак 1, али су и идентификоване зоне концентрације напона у којима је доминантан смицајни мембрански напон, тако да је у тим зонама процењен коефицијент пресликавања 1,22;
- на геометријски сложенем примеру доказана је употребљивост, поузданост и веродостојност методе за бесконтактно мерење померања и деформација;
- доказано је да се овако унапређена и побољшана методологија моделског испитивања чврстоће сложених структура може успешно реализовати, без великих ограничења и са довољном тачношћу на великом броју различитих конструкција.

### 4.2. Критичка анализа резултата истраживања

У раду је доказана могућност моделског испитивања сложених структура. Развијена је методологија моделског испитивања оваквих структура. Процењени су коефицијенти пресликавања понашања умањене структуре на понашање стварне структуре по функционалним групама градње, што може бити употребљено као квалитетан поступак у процесу пројектовања неке нове конструкције овог типа.

Закључци изведени у овом раду, применљиви су на анализирану и њој сродне конструкције. Методологија моделског испитивања, обрађена у овом раду, је применљива за испитивање других конструкција, с тим што за те конструкције треба развити њихове нумеричке и физичке моделе.

Моделско испитивање чврстоће структуре приказане у раду омогућава ефикасно праћење понашања разматране конструкције (велики број машина овакве носеће структуре ради на површинским коповима у Србији).

#### 4.3. Верификација научних dopриноса

Као верификација добијених оригиналних резултата наводе се објављени радови у међународним часописима и научни пројекти у којима је аутор учествовао, а који су везани за истраживања спроведена у оквиру докторске дисертације.

##### **Радови објављени у научним часописима**

###### Категорија M22

1. Milošević-Mitić V., Maneski T., Gaćeša B., Nestorović M., **Petrović A.**: *Influence of furnace tube shape on thermal strain of fire-tube boilers*, Thermal Science, Vol. 18, suppl.1, pp. 39-47, 2014 (**IF 1.222**) (ISSN 2334-7163 (online edition), ISSN 0354-9836 (printed edition))
2. Milošević-Mitić V., Maneski T., Anđelić N., Milović Lj., **Petrović A.**, Gaćeša B.: *Dynamic temperature field in the ferromagnetic plate induced by moving high frequency inductor*, Thermal Science, Vol. 18, suppl. 1, pp. 49-58, 2014 (**IF 1.222**) (ISSN 2334-7163 (online edition), ISSN 0354-9836 (printed edition))

###### Категорија M23

1. Petrović B., **Petrović A.**, Ignjatović D., Grozdanović I., Kozak D., Katinić M.: *Assessment of the maximum possible extension of bucket wheel SchRs740 boom based on static and dynamic calculation*, Technical Gazette, Vol. 23, No 4, pp. 1233-1238, 2016 (**IF 0.454**) (ISSN 1848-6339 (Online), ISSN 1330-3651 (Print))
2. **Petrović A.**, Maneski T., Trišović N., Ignjatović D., Dunjić M.: *Identification of crack initiation cause in pylons construction of the excavator SchRs630*, Technical Gazette, DOI Number 10.17559/TV-20160919123405 (**IF 0.454**) (ISSN 1848-6339 (Online), ISSN 1330-3651 (Print))
3. Tatić U., Čolić K., Sedmak A., Mišković Ž., **Petrović A.**: *Evaluation of the Locking Compression Plates stress-strain fields*, Technical Gazette, DOI Number 10.17559/TV-20170420121538 (**IF 0.454**) (ISSN 1848-6339 (Online), ISSN 1330-3651 (Print))

###### Категорија M24

1. Anđelić N., Milošević-Mitić V., **Petrović A.**: *Stress Constraints Applied to the Optimization of a Thin-Walled Z-Beam*, FME Transactions, Vol. 42, No. 3, 2014, pp. 237-242.
2. Jovanović M., Simonović A., Zorić N., Lukić N., Stupar S., **Petrović A.**, Wei Li: *Experimental Investigation of Spillover Effect in System of Active Vibration Control*, FME Transactions, Vol. 42, No. 4, 2014, pp. 329-334.

###### Категорија M33

1. Maneski T., **Petrović A.**, Milošević M., Mitrović N., Momčilović N.: *Classical and Modern Measuring Methods in Experimental Analysis of G – Beam Structure*, - 29th Danubia Adria – Symposium on Advances in Experimental Mechanics, Belgrade 2012, pp. 234-238.
2. Anđelić N., Milošević-Mitić V., Maneski T., **Petrović A.**: *Stress analysis of thin-walled structural elements of turbine blade shape*, Proceedings of the 4-th Serbian Congress On

Theoretical And Applied Mechanics, Vrnjačka Banja, Serbia, 4th-7th of June, 2013, pp. 571-576.

3. Sedmak A. S., **Petrović A.**, Tatić U., Maneski T., Sedmak A.: *Determining of elasticity modulus of fiberglass reinforced plastic grating using finite element method*, 31st Danubia-Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics, Kempten, Germany, September 2014.
4. Maneski T., Ignjatović D., Daničić D., Milošević-Mitić V., Jovančić P., **Petrović A.**: *Diagnosis the cause of the crack on the bucket wheel boom on the excavator ERs 1250 Gacko*, The 14th International Conference New Trends in Fatigue and Fracture NT2F14 „Fatigue and fracture at all scales“, Belgrade, Serbia, September 2014.
5. **Petrović A.**, Trišović N., Maneski T., Golubović Z., Milošević-Mitić V., Grozdanović I., Wei Li: *Structural dynamic modification of a tubular collector*, Proceedings of the 5th International Congress of Serbian Society of Mechanics, Arandjelovac, Serbia, June 15-17, 2015, S3d.
6. Petrović B., Ignjatović D., **Petrović A.**, Maneski T, Milošević-Mitić V., Trišović N.: *Dynamic modification of bucketwheel SchRs740 extended boom construction*, Proceedings of the 7th International Conference COAL 2015, Zlatibor, October 14-17, 2015, pp. 299-307.
7. Petrović B., **Petrović A.**, Ignjatović D., Grozdanović I.: *Dynamic behavior and stress field of excavator SchRs740 extended boom*, Proceedings of TEAM 2015, 7th International Scientific and Expert Conference of the International TEAM Society, Belgrade, Serbia, 14–16th October 2015, pp. 345-348.
8. Maneski T., Bajić D., Momčilović N., Mitrović N., Milošević M., **Petrović A.**, Balać M.: *Analysis of the stress field in a model of pipe branches*, Proceedings of TEAM 2015, 7th International Scientific and Expert Conference of the International TEAM Society, Belgrade, Serbia, 14–16th October 2015, pp. 402-405.
9. Tatić U., Čolić K., Sedmak A., Mišković Ž., **Petrović A.**: *Procedures and evaluation of the stress strain fields on the Locking Compression Plates*, Proceedings of TEAM 2016, 8th International Scientific and Expert Conference of the International TEAM Society, pp. 171-179, Trnava, Slovakia, 19th-21st October 2016.

#### Категорија M34

1. Trišović N., **Petrović A.**: *The application of reanalysis method (modification of dynamic characteristics) to solve practical problems of structural strength*, Mini-Symposium “Fracture Mechanics and Numerical Methods” Mathematical Institute of SASA and Project OI 174001, Belgrade, Serbia, November 16, 2016, pp. 29-30.

#### **Учешће у пројектима Министарства науке**

1. Пројекат технолошког развоја TP35040, „Развој савремених метода дијагностике и испитивања машинских структура“ од 01.04.2012. године.
2. Пројекат научне и технолошке сарадње Републике Србије и Народне Републике Кине за период 2013-2015. године, број 2-14 (Ministry of Science and Technological Development, Republic of Serbia (within the Serbian - Chinese Science - Technology Bilateral Cooperation for the years 2013-2015 (No.2-14)))



## 5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу детаљног прегледа докторске дисертације под називом „Моделско испитивање чврстоће структура сложене просторне геометрије“, кандидата Ане Петровић, маг. инж. маш., Комисија за оцену и одбрану сматра да дисертација представља оригиналан и веома успешан научно-истраживачки рад из области Отпорност конструкција. Комисија такође сматра да је кандидат кроз дисертацију показао веома висок ниво стручног и теоријског знања, што му, уз интелектуални потенцијал, омогућава даље успешно бављење научно-истраживачким радом. Такође, Комисија констатује да су испуњени и обавезни акредитациони услови: кандидат има пет, а ментор више од пет радова објављених у међународним часописима са ISI-JCR-SCI листе.

Комисија за оцену и одбрану зато констатује да је кандидат Ана Петровић, маг. инж. маш., успешно завршио докторску дисертацију „МОДЕЛСКО ИСПИТИВАЊЕ ЧВРСТОЋЕ СТРУКТУРА СЛОЖЕНЕ ПРОСТОРНЕ ГЕОМЕТРИЈЕ“ и са задовољством предлаже Научно-наставном већу Машинског факултета у Београду да овај Извештај прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

.....  
др Ташко Манески, редовни професор  
Универзитет у Београду, Машински факултет

.....  
др Момчило Дуњић, редовни професор  
Универзитет у Београду, Машински факултет

.....  
др Весна Милошевић-Митић, редовни професор  
Универзитет у Београду, Машински факултет

.....  
др Наташа Тришовић, ванредни професор  
Универзитет у Београду, Машински факултет

.....  
др Драган Игњатовић, редовни професор  
Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет