

Факултет Машински

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

Веће научних области техничких наука
(Назив стручног већа коме се захтев упућује, сагласно

460/5

члану 6. и чл. 7 став 1. овог правилника)

(Број захтева)
18.05.2012. године
(Датум)

ЗАХТЕВ
за давање сагласности на реферат о урађеној докторској дисертацији

Молимо да, сходно члану 46. ст. 5 тач. 4. Статута Универзитета у Београду („Гласник Универзитета“, број 131/06)“, дате сагласност на реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата:

АЛЕКСАНДРА (МИОДРАГ) ГРБОВИЋА

(име, име једног од родитеља и презиме)

КАНДИДАТ **АЛЕКСАНДАР (МИОДРАГ) ГРБОВИЋ**

(име, име једног од родитеља и презиме)

Пријавио је докторску дисертацију под називом:

ИСТРАЖИВАЊЕ ЗАМОРНОГ ВЕКА НОСЕЋИХ СТРУКТУРАЛНИХ ЕЛЕМЕНАТА ИЗРАЂЕНИХ ОД СУПЕР ЛЕГУРА

Универзитет је дана 07.02.2011. год. својим актом под бр 06-4089/20-11 дао сагласност на предлог теме докторске дисертације која је гласила:

ИСТРАЖИВАЊЕ ЗАМОРНОГ ВЕКА НОСЕЋИХ СТРУКТУРАЛНИХ ЕЛЕМЕНАТА ИЗРАЂЕНИХ ОД СУПЕР ЛЕГУРА

Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата: **АЛЕКСАНДРА (МИОДРАГ) ГРБОВИЋА**

(име, име једног од родитеља и презиме)

Образована је на седници одржаној 15.03.2012. године, одлуком факултета под бр. 460/2, у саставу:

Име и презиме члана комисије	звање	научна област	установа у којој је запослен
1. <u>Др Бошко Рашуо</u>	Редовни професор	Ваздухопловство	Машински факултет Београд
2. <u>Др Слободан Гвозденовић</u>	Редовни професор	Ваздухопловство	Саобраћајни факултет Београд
3. <u>Др Мирко Динуловић</u>	Доцент	Ваздухопловство	Машински факултет Београд

Наставно-научно веће факултета прихватило је извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације на седници одржаној дана 12.04.2012. године.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

Проф.др Милорад Милованчевић

Прилог: 1. Извештај комисије са предлогом.
2. Акт Наставно-научног већа факултета о усвајању извештаја.
3. Примедбе дате у току стављања извештаја на увид јавности, уколико је таквих примедби било.

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ –
Број: 460/4
Датум: 12.04.2012. године
Београд, Краљице Марије 16

На основу чл. 128. Закона о високом образовању и извештаја Комисије у саставу: проф.др Бошко Рашуо, ментор, проф.др Слободан Гвозденовић, Саобраћајни факултет Београд, доц.др Мирко Динуловић о оцени докторске дисертације „Истраживање заморног века носећих структуралних елемената израђених од супер легура“ докторанта мр Александра Грбовића, дипл.инж.маш., Наставно-научно веће Машинског факултета на седници одржаној 12.04.2012. године, донело је следећу

ОДЛУКУ

Усваја се извештај за оцену и одбрану докторске дисертације **„ИСТРАЖИВАЊЕ ЗАМОРНОГ ВЕКА НОСЕЋИХ СТРУКТУРАЛНИХ ЕЛЕМЕНАТА ИЗРАЂЕНИХ ОД СУПЕР ЛЕГУРА“** докторанта **МР АЛЕКСАНДРА ГРБОВИЋА**, дипл.инж.маш.

Одобрава се одбрана докторске дисертације, пошто је докторска дисертација са извештајем Комисије за оцену и одбрану била стављена на увид јавности у трајању од 30 дана, па како је после свих разматрања на ННВ М.Ф. на крају извештај Комисије коначно усвојен, доставља се Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду да да сагласност на извештај о урађеној докторској дисертацији.

Одлуку доставити: Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду, докторанту, ментору и архиви факултета.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

Проф.др Милорад Милованчевић

**НАСТАВНО НАУЧНОМ ВЕЋУ МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА УНИВЕРЗИТЕТА У
БЕОГРАДУ**

Предмет: Извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата
мр Александра Грбовића, дипл. инж. маш.

Одлуком Наставно-научног већа Машинског факултета Универзитета у Београду бр. 460/2 од 15.03.2012. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата мр Александра Грбовића, дипл. инж. машинства, под називом: „ИСТРАЖИВАЊЕ ЗАМОРНОГ ВЕКА НОСЕЋИХ СТРУКТУРАЛНИХ ЕЛЕМЕНАТА ИЗРАЂЕНИХ ОД СУПЕР ЛЕГУРА“, о чему подносимо следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Увод

1.1. Наслов и обим докторске дисертације

Докторска дисертација кандидата мр Александра Грбовића, дипл. инж. маш., под насловом „ИСТРАЖИВАЊЕ ЗАМОРНОГ ВЕКА НОСЕЋИХ СТРУКТУРАЛНИХ ЕЛЕМЕНАТА ИЗРАЂЕНИХ ОД СУПЕР ЛЕГУРА“ изложена је на 252 стране, садржи и два прилога и списак коришћене литературе на 10 страна.

1.2. Хронологија одобравања израде дисертације

Кандидат мр Александар Грбовић, дипл. инж. маш., пријавио је израду докторске дисертације 15.11.2010. год., под бројем 1834/1 Катедри за ваздухопловство Машинског факултета у Београду. Кандидат је за ментора предложио редовног професора др Бошка Рашуо. Комисија за оцену испуњености услова кандидата и научне заснованости теме докторске дисертације је 14.12.2010. год. поднела извештај који је заведен под ред. 1834/3 Наставно-научном већу Машинског факултета у Београду. На основу пријаве кандидата и предлога Катедре, одлуком ННВ бр. 1834/4 од 23.12.2010. год., прихваћен је предлог Комисије за оцену испуњености услова кандидата и научне заснованости теме у саставу: ментор, проф. др Бошко Рашуо, проф. др Златко Петровић и проф. др Слободан Гвозденовић, са Саобраћајног факултета у Београду.

Комисија је поднела извештај у коме предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета у Београду да одобри тему докторске дисертације под радним називом „ИСТРАЖИВАЊЕ ЗАМОРНОГ ВЕКА НОСЕЋИХ СТРУКТУРАЛНИХ ЕЛЕМЕНАТА ИЗРАЂЕНИХ ОД СУПЕР ЛЕГУРА“ наводећи да кандидат испуњава све законске услове за израду докторске дисертације, и да предложена тема као актуелна, атрактивна и значајна, може бити тема докторске дисертације. У вези са захтевом докторанта Александра

Грбовића, дипл. инж. маш. да се одобри израда докторске дисертације, одлуке Наставно-научног већа Машинског факултета 23.12.2010. год. о испуњености услова кандидата за израду докторске дисертације и о именовању ментора, Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду дало је сагласност којом се одобрава рад на теми докторске дисертације „ИСТРАЖИВАЊЕ ЗАМОРНОГ ВЕКА НОСЕЋИХ СТРУКТУРАЛНИХ ЕЛЕМЕНАТА ИЗРАЂЕНИХ ОД СУПЕР ЛЕГУРА“, под менторством редовног професора др Бошка Рашуо (одлука бр. 06-4089/20-11). На основу одлуке Наставно-научног већа Машинског факултета о испуњености услова кандидата за израду докторске дисертације и именовању ментора, а на основу сагласности Већа научних области техничких наука Универзитета у Београду, декан Машинског факултета у Београду је 18.02.2011. год. донео закључак бр. 297/1 да се одобри рад на теми докторске дисертације „ИСТРАЖИВАЊЕ ЗАМОРНОГ ВЕКА НОСЕЋИХ СТРУКТУРАЛНИХ ЕЛЕМЕНАТА ИЗРАЂЕНИХ ОД СУПЕР ЛЕГУРА“ кандидату мр Александру Грбовићу, дипл. инж. маш.

О завршетку докторске дисертације „ИСТРАЖИВАЊЕ ЗАМОРНОГ ВЕКА НОСЕЋИХ СТРУКТУРАЛНИХ ЕЛЕМЕНАТА ИЗРАЂЕНИХ ОД СУПЕР ЛЕГУРА“, ментор др Бошко Рашуо, ред. проф. обавестио је Катедру за ваздухопловство, као и Наставно-научно веће Машинског факултета у Београду, дописом број 460/1 од 09.03.2012. Предложена је Комисија за оцену и одбрану рада у саставу: ментор, др Бошко Рашуо, ред. проф., проф. др Слободан Гвозденовић, са Саобраћајног факултета у Београду и доц. др Мирко Динуловић.

На основу наведеног дописа Наставно-научно веће је на седници од 15.03.2012. године једногласно усвојило обавештење о завршетку дисертације кандидата мр Александра Грбовића под називом „ИСТРАЖИВАЊЕ ЗАМОРНОГ ВЕКА НОСЕЋИХ СТРУКТУРАЛНИХ ЕЛЕМЕНАТА ИЗРАЂЕНИХ ОД СУПЕР ЛЕГУРА“ и усвојило предлог Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације (одлука бр. 460/2 од 15.03.2012. године).

1.3. Место дисертације у одговарајућој научној области

Докторска дисертација „ИСТРАЖИВАЊЕ ЗАМОРНОГ ВЕКА НОСЕЋИХ СТРУКТУРАЛНИХ ЕЛЕМЕНАТА ИЗРАЂЕНИХ ОД СУПЕР ЛЕГУРА“ припада области техничких наука, односно машинству и ужој научној области Ваздухопловство.

1.4. Биографски подаци о кандидату

Александар М. Грбовић рођен је 1970. године у Ужицу. Основну школу завршио је 1984. године са одличним успехом. Средњу школу (гимназија – математички смер) уписао је 1984. године и исту завршио 1988. године, такође са одличним успехом. Носилац је Вукове дипломе.

Машински факултет у Београду уписао је 1988. године. Дипломирао је 1994. године на Катедри за ваздухопловство са просечном оценом 9,03. Дипломски рад одбранио је са оценом 10. По дипломирању уписао је последипломске студије на Машинском факултету и то на ваздухопловном одсеку. Истовремено, на Катедри за железничко машинство ангажован је као истраживач-таленат-приправник и у том звању био је од 01.02.1995. год. до 01.02.1997. када је изабран за асистента-приправника за предмет Чврстоћа летелица на Катедри за ваздухопловство.

Војску је одслужио у периоду септембар 1997. – септембар 1998. У међувремену, положио је све испите на последипломским студијама, а дана 22.06.2000. год. одбранио је магистарску тезу под називом „Замор и процена века носеће структуре летелица“ код ментора проф. др Илије Кривошића.

Дана 01.02.2001. г. изабран је за асистента за предмет Чврстоћа летелица на Катедри за ваздухопловство. Године 2005. и године 2009. реизабран је за асистента на групи предмета Катедре за ваздухопловство.

Током рада на Машинском факултету Александар Грбовић је био ангажован у извођењу наставе на следећим предметима додипломских студија: Чврстоћа летелица, Конструкција летелица, Одржавање летелица, Теорија еластичности, Аероеластичност, Електротехника, Отпорност материјала, Отпорност конструкција, Конструкција и

технологија градње летелица, Управљање пројектом и ваздухопловни прописи, Прорачун структуре летелица, Основи аеротехнике и Биоматеријали.

Поред наставе на побројаним предметима, држао је и велики број курсева из CAD-CAM технологија, како домаћим тако и страним студентима на последипломским студијама.

Током рада на Факултету био је члан преко 150 комисија за оцењивање и одбрану дипломских радова, а од 2001.г. до 2005.г. држао је наставу и у Ваздухопловно-техничкој академији у Жаркову.

Поседује активно знање енглеског језика. Ожењен је и отац је двоје деце.

Радови објављени у целини у зборницима међународних конференција

1. Грбовић А., Мисита Г., Коришћење модела од армиране епоксидне смоле (АЕС) за одређивање напона и деформација на ваздухопловним конструкцијама, Међународни научно-стручни скуп Ваздухопловство '95, Зборник радова, стр.Б31-Б36, Београд, 1995.

2. Грбовић А., Шкатарић Д. и И. Кривошић, Напредне технике моделовања у програмском пакету CATIA V5.8, Проц. 29.ЈУПИТЕР Конференција, 2.29-2.31, Београд 2003.

3. Шкатарић Д., Кривошић И. и Грбовић А., Толеранција оштећења и ширење напрслине на примарној структури летилица, Проц. 29.ЈУПИТЕР Конференција, 2.71-2.74, Београд 2003.

4. Грбовић А., Јанковић Ф, Параметарска оптимизација ребра крила авиона „Утва Ласта“, Проц. 32.ЈУПИТЕР Конференција, Златибор 2006.

5. Rašuo, B., Dinulović, M., Bengin, A., Veg, A., Grbović, A., Development of the Direct-Drive Wind Turbine Rotor Blades from Composite Materials, The Seventeenth International Conference on COMPOSITES/NANO ENGINEERING (ICCE – 17), July 26-August 1, 2009 in Honolulu, Hawaii, USA, (pages 849-850).

6. Grbović A., Tanasković M., Vidanović N., Comparative analysis of the stress distribution on the toothless alveolar ridge at the bottom of the complete denture prosthesis and overdenture retained with mini implants, Proc. 2nd International Congress of Serbian Society of Mechanics (IConSSM 2009), Palić, Serbia, 1-5 June 2009.

7. Vidanović N., Kastratović G., Grbović A., The analysis of contact effects in wire rope strand using the finite element method, Proc. Third Serbian (28th Yu) Congress on Theoretical and Applied Mechanics, Vlasina lake, Serbia, 5-8 July 2011.

8. Grbović A., Vidanović N., Čolić K., Jevremović D., The use of finite element method (FEM) for analyzing stress distribution in adhesive inlay bridges, Proc. Third Serbian (28th Yu) Congress on Theoretical and Applied Mechanics, Vlasina lake, Serbia, 5-8 July 2011.

9. Grbović A., Vidanović N., Kastratović G., The use of finite element method (FEM) for simulating crack growth in mini dental implants (MDI), Proc. Third Serbian (28th Yu) Congress on Theoretical and Applied Mechanics, Vlasina lake, Serbia, 5-8 July 2011.

Радови објављени у целини у часописима националног значаја

1. Grbović A., Rašuo B., Vidanović N., Perić M., Simulation of Crack Propagation in Titanium Mini Dental Implants (MDI), *FME Transactions*, Volume 39, No 4, 2011, pp. 165-170, ISSN 1451-2092, UDC:621

Радови објављени у часописима са SCI листе

1. Todorovic A., Radovic K., **Grbovic A.**, Rudolf R., Maksimovic I., Stamenkovic D., STRESS ANALYSIS OF A UNILATERAL COMPLEX PARTIAL DENTURE USING THE

FINITE ELEMENT METHOD, *Materials and Technology*, ISSN 1580-2949, MTAEC9, 44(1)41(2010), page 41-47.

2. Радовић К., Чаировић А., Тодоровић А., Станчић И., **Грбовић А.**, Компаративна анализа једностране и конвенционалне скелетиране протезе применом методе коначних елемената, *Srpski Arhiv Za Celokupno Lekarstvo*, 2010 Nov-Dec; 138(11-12), DOI:10.2298/SARH1012706R.

3. Patnogić V., Todorović A., Šćepanović M., Radović K., Vesnić J., **Grbović A.**, THE FREE-END SADDLE LENGTH INFLUENCE ON STRESS LEVEL IN UNILATERAL COMPLEX PARTIAL DENTURE ABUTMENT TEETH AND RETENTION ELEMENTS, *Vojnosanitetski pregled*, Beograd YU ISSN 0042-8450

4. Popovic V., Vasic B., Lazovic T., **Grbovic A.**, "Application of New Decision Making Model Based on Modified Cost-Benefit Analysis - A Case Study: Belgrade Tram Transit", *Asia-Pacific Journal of Operational Research (APJOR)*, ISSN: 0217-5959.

Научне монографије:

1. Стаменковић Д., **Грбовић А.**, Метода коначних елемената у испитивању градивних стоматолошких материјала, IV поглавље у научној монографији *Градивни стоматолошки материјали*, стр. 83-108, Стоматолошки факултет Београд, 2007.

2. Балаћ И., **Грбовић А.**, Пример примене МКЕ у стоматологији, 16. поглавље у научној монографији *Стоматолошки материјали*, књига 2, стр. 351-370, Стоматолошки факултет Београд, 2012.

3. Стаменковић Д., **Грбовић А.**, Примери примене МКЕ у дизајнирању и испитивању стоматолошких материјала, 17. поглавље у научној монографији *Стоматолошки материјали*, књига 2, стр. 371-384, Стоматолошки факултет Београд, 2012.

2. Опис дисертације

2.1. Структура и садржај дисертације

Докторска дисертација кандидата мр Александра Грбовића, дипл. инж. маш., под насловом „ИСТРАЖИВАЊЕ ЗАМОРНОГ ВЕКА НОСЕЋИХ СТРУКТУРАЛНИХ ЕЛЕМЕНАТА ИЗРАЂЕНИХ ОД СУПЕР ЛЕГУРА“ изложена је на 252 стране, садржи и два прилога и списак коришћене литературе на 10 страна. Дисертација садржи следећих осам поглавља:

- Увод,
- Особености изучавања замора супер легура,
- Моделирање раста прслине услед замора,
- Метод коначних елемената (МКЕ) у симулацији раста прслине у супер легурама,
- Проширена метода коначних елемената (ПМКЕ) у дефинисању фактора интензитета напона,
- Примери дефинисања фактора интензитета напона на тродимензионалним моделима употребом ПМКЕ,
- Експериментална и нумеричка симулација замора рамењаче крила лаког авиона изложене оптерећењу променљиве амплитуде, и
- Закључак

Дисертација садржи 205 слика и 32 табеле.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

Докторска дисертација „ИСТРАЖИВАЊЕ ЗАМОРНОГ ВЕКА НОСЕЋИХ СТРУКТУРАЛНИХ ЕЛЕМЕНАТА ИЗРАЂЕНИХ ОД СУПЕР ЛЕГУРА“ састоји се из осам поглавља. **Прво поглавље** представља увод у коме је, поред кратког историјског осврта на проблематику замора материјала и механике лома, дат и преглед актуелних приступа пројектовању сложених конструкција отпорних на замор. У уводу је изложена и методологија предвиђања и верификације карактеристика носећих структура изложених замору које ће бити коришћене у тези.

У **другом поглављу** дефинисане су основне величине од којих се полази у проучавању замора структуралних елемената и идентификовани су најугицајнији фактори у фазама настанка и раста прслине услед замора (фактор концентрације напона, фактор интензитета напона и ломна жилавост). Истакнуто је да је у периоду до настанка прслине феномен замора везан за површину материјала, а да од тренутка када прслина почне да се шири доминантну улогу имају заморне карактеристике материјала. У овом поглављу дат је и приказ најзначајнијих карактеристика супер легура које ће бити предмет истраживања у дисертацији.

У **трећем поглављу** дате су поставке моделирања лома материјала помоћу раста прслине услед замора. Детаљно је описано напонско поље око врха прслине у изотропном, линеарно-еластичном телу и дате су основне једначине за дефинисање фактора интензитета напона (модови I, II и III) као и напона и померања у близини врха прслине. Представљени су и услови под којима се линеарна еластична механика лома може применити у пројектовању носећих конструкција изложених замору, као и резултати аналитичког одређивања фактора интензитета напона у неколико изабраних примера. У оквиру овог поглавља анализирани су и области раста заморне прслине, с тим што је области II (тзв. Парисовој) посвећена највећа пажња. Наведене су данас најчешће коришћене једначине за дефинисање брзине раста прслине у Парисовој области, од којих је – као једна од најпоузданијих – посебно истакнута NASGRO једначина. Коначно, на крају поглавља дата је комплетна методологија предвиђања раста заморне прслине и упоредни приказ раста прслине у данас најчешће коришћеним инжењерским материјалима, укључујући и супер легуре.

Четврто поглавље се бави применом методе коначних елемената (МКЕ) у симулацији раста прслине у супер легурама. Да би се што тачније предвидели брзина раста прслине и преостали век структуре под замором, неопходно је што тачније дефинисање односа између дужине растуће прслине и вредности фактора интензитета напона. У том смислу је потребно дефинисати поуздан нумерички модел који ће дати резултате блиске експерименталним и/или аналитичким вредностима. У анализи структуре применом МКЕ, избор типа коначног елемента и броја чворова (густине) мреже – као и правилно дефинисање карактеристика материјала и граничних услова – од пресудног су значаја за тачност комплетног прорачуна. У поглављу четири су кроз пример дводимензионалне симулације ширења прслине из отвора на танкој плочи (израђеној од челика високе заморне чврстоће) анализирани утицаји свих фактора који утичу на тачност решења. Вариране су димензије плоче, типови коначних елемената, густина мреже и спољашња оптерећења, а прслина је ширена на два начина – ручно и аутоматски. Вредности добијене коришћењем МКЕ у софтверу FRANC2D/L поређене су са вредностима добијеним у програму NASGRO v4 који је NASA развила за предвиђање раста прслина у својим летелицама. На основу разлика добијених вредности, доношени су закључци о томе како би требало унапредити нумерички модел да би дао решења која су што приближнија NASGRO вредностима. Када је то и остварено, на основу израчунате промене вредности фактора интензитета напона са дужином прслине, одређен је приближан заморни век прслине при дејству променљивог спољашњег оптерећења односа напона $R=1$. И заморни век је упоређен са вредношћу која је добијена у програму NASGRO, при чему је добијена максимална разлика око 6%, што је прихваћено као задовољавајуће. У четвртном поглављу су детектована и приказана и нека ограничења класичне МКЕ у симулацији ширења прслине (пре свих, потреба за креирањем

нове мреже након сваког корака ширења), што је могуће превазићи једино употребом проширене методе коначних елемената.

Пето поглавље је у целости посвећено новој методологији симулирања раста прслине, код које нема потребе за сукцесивном променом мреже елемената након сваког корака ширења. Реч је о проширеној методи коначних елемената (ПМКЕ) која је развијена у радовима Dolbow-a (1999) и Daux (2000) и која је намењена моделирању унутрашњих или спољашњих граница тела, као што су отвори, рупе, прслине, итд. ПМКЕ је заснована на стандардној Галеркиновој процедури и тзв. безмрежној методи, а дисконтинуитет прслине у мрежи коначних елемената описује се Хевисајдовом функцијом. У поглављу су представљене најбитније карактеристике ПМКЕ и дате су функције асимптотског поља померања. Истакнуте су главне предности проширене методе коначних елемената (применљивост и на нелинеарне проблеме и непроменљивост мреже елемената током ширења прслине), али и њене основне мане: недовољна верификованост у пракси и мали број софтвера у којима је ПМКЕ имплементирана.

Кључни резултати тезе дати су у **шестом и седмом поглављу**, у оквиру којих је спроведена верификација проширене методе коначних елемената помоћу шест изабраних нумеричких примера и резултата експеримената спроведених на рамењачи лаког авиона коришћењем нестационарног оптерећења променљиве амплитуде. У **шестом поглављу** дато је пет изабраних нумеричких примера чија је основна намена верификација вредности фактора интензитета напона добијених употребом ПМКЕ на тродимензионалним моделима носеће структуре. Прорачуни су спроведени у софтверском пакету Abaqus који је један од ретких са уграђеном подршком за ПМКЕ. У свим примерима коришћен је челик веома високе заморне чврстоће. У првом примеру (ширење прслине из централног отвора на плочи) коришћена су два типа коначних елемената (хексаедарски и тетраедарски) и анализирано је ширење тродимензионалне прслине кроз плочу у оба случаја. За сваки корак ширења представљене су израчунате вредности фактора интензитета напона Модова I, II и III, које су затим поређене са NASGRO v4 решењима и вредностима добијеним у FRANC2D/L софтверу на еквивалентном 2Д моделу (описаном у четвртом поглављу). У другом примеру (ширење централне прслине на плочи) коришћена је иста методологија, с том разликом што је за верификацију почетне вредности фактора интензитета напона мода I коришћено познато аналитичко решење. У овом примеру је дата и процена броја циклуса који ће прслину проширити до одређених димензија, добијена коришћењем модификованог Парисовог закона. Нумерички пример број три (ширење прслине на стандардној СТ епрувети) показује и неке недостатке ПМКЕ (одступање вредности фактора интензитета напона од очекиваних код врло оштрих дисконтинуитета), док четврти пример (плоча на два ослоња са силом на средини) показује да почетни положај прслине – између два коначна елемената или по средини једног од њих – не утиче много на тачност симулације. Коначно, у петом примеру је ширење тродимензионалне прслине симулирано на нестандартној епрувети, па је за верификацију резултата поново коришћен еквивалентан 2Д модел у софтверу FRANC2D/L. Поређењем вредности фактора интензитета напона добијених применом ПМКЕ са вредностима добијеним у другим софтверима и/или помоћу аналитичких метода, закључено је да проширена метода коначних елемената може дати мериторне резултате задовољавајуће тачности на тродимензионалним моделима, под условом да су мрежа чворова и гранични услови дефинисани на задовољавајућ начин. На крају поглавља дата је и препорука под којим условима је тродимензионални модел могуће апроксимирати дводимензионалним моделом, обзиром да прорачуни применом ПМКЕ трају прилично дуго и захтевају велику количину радне меморије компјутера.

Седмо поглавље доноси још један нумерички пример за верификацију ПМКЕ, који је због сложености геометрије самог модела верификован и експериментално. Један од циљева нумеричке симулације и експеримента био је истраживање заморног века реалне рамењаче лаког авиона која је израђена од термички обрађене и ојачане алуминијумске легуре 2024-T3. У седмом поглављу дат је детаљан опис комплетне апаратуре коришћене у самом експерименту, спектра оптерећења којем је рамењача била изложена, хемијске структуре легуре од које је рамењача направљена, као и заморних карактеристика легуре 2024-T3 које су важне за прорачун. Поред тога, да би се могло извршити што прецизније

поређење резултата експеримената и вредности добијених нумеричким симулацијама, у програму Ansys направљен је веран модел реалне рамењаче и елемената везе како би се добила релевантна процена века (тј. броја циклуса) до настанка прслине. Прорачунски број циклуса добијен у Ansys-у износио је 7944, док је у експерименту прслина уочена након 8542 циклуса. Симулирање раста прслине у тродимензионалној рамењачи је (као и у примерима у претходном поглављу) спроведено у Abaqus-у и добијене вредности брзине ширења прслине се доста добро поклапају са вредностима добијеним у експерименту. Виртуелна прслина се једно време ширила на начин скоро идентичан ширењу стварне прслине, да би затим почела да се креће различитом путањом од оне у експерименту, што је објашњено постојањем заосталих затезних напона у појасевима стварне рамењаче. Међутим, прорачунски заморни век добијен у Abaqus-у и експериментални заморни век се не разликују много (испод 10%), што се – узимајући у обзир и статистичку природу замора – може сматрати доста добрим поклапањем експерименталне и прорачунске вредности. У овом поглављу дата је и процена експлоатационог века алуминијумске рамењаче коришћењем стандардних спектра оптерећења mini-TWIST и mini-FALSTAFF. У завршном делу поглавља добијени резултати и анализе су искоришћени да се предвиди век под замором реалне рамењаче израђене од супер легура типа Inconel и Hastelloy што је био и један од циљева дисертације.

Теза завршава **закључком** у коме су наведени њени главни резултати. Указано је и на могуће правце даљег истраживања заморног понашања супер легура.

3. Оцена дисертације

3.1. Савременост, оригиналност и значај

Докторска дисертација „ИСТРАЖИВАЊЕ ЗАМОРНОГ ВЕКА НОСЕЋИХ СТРУКТУРАЛНИХ ЕЛЕМЕНАТА ИЗРАЂЕНИХ ОД СУПЕР ЛЕГУРА“ представља савремен и оригиналан приступ и допринос разматраној проблематици замора структурних елемената. Кандидат је у истраживању заморног века носећих елемената израђених од супер легура користио и нумерички и експериментални приступ, при чему је показао велику способност и зрелост да из невелике постојеће литературе о проширеној методи коначних елемената (у свету су до сада објављене само две књиге) изабере оно што је најзначајније за решавање проблема при изради дисертације. Његова жеља да тезом да допринос верификацији најсавременијих метода симулације ширења тродимензионалних прслина је подразумевала да је морао да се упозна са најсавременијим софтвером и да овлада експерименталним техникама помоћу којих је једино могуће проверити вредности које су добијене нумеричким приступом. Резултат ових напора је приказан у седмом поглављу које је и најзначајнији део дисертације, јер је у оквиру њега – поређењем нумеричких и експерименталних резултата – успешно верификована потпуно нова методологија анализе раста прслине у сложеним носећим ваздухопловним структурама. На основу експерименталних вредности добијених коришћењем најмодерније мерне и аквизиционе технике, као и сложене обраде мерних резултата, добијена су и оригинални резултати и тумачења појаве и ширења прслине услед замора у носећој ваздухопловној структури типа рамењаче, која могу бити од великог значаја за све истраживаче који се овом проблематиком баве. У научне доприносе можемо убројити и резултате оригиналних нумеричких симулација представљене у шестом поглављу, за које у отвореној литератури не постоје докази да су их и други аутори добили истом методом. Све резултате у тези су пратили зрели научни и инжењерски закључци, што доприноси томе да се дисертација може оценити веома успешном. Оригиналност потврђују резултати тезе дати у радовима који су публиковани у часописима и саопштени на научним скуповима.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У докторској дисертацији коришћена је обимна литература из области замора материјала, нумеричких метода и симулације ширења заморне прслине у носећим

структурама. Ова литература је кандидату послужила као полазна основа за формирње прегледа постојећих аналитичких и нумеричких истраживања везаних за област замора супер легура, као и за припрему експеримената за верификацију вредности добијених прорачуном. На тај начин дат је релевантан приказ постојећег стања у областима којој припадају проблеми решени у докторској дисертацији. Коришћена литература је избор савремене и актуелне литературе која осим прегледа постигнутих резултата указује на могуће правце даљег научног рада.

3.3. Анализа примењених научних метода и њихова адекватност за спроведено истраживање

У докторској дисертацији је, у циљу истраживања заморног века носећих структуралних елемената израђених од супер легура, коришћен већи број савремених научно-истраживачких метода, које су примењиване сходно типу проблема који је решаван. У њих можемо убројити следеће: методу моделирања и симулације (које су омогућиле анализу реалних проблема у виртуелном окружењу), методу коначних елемената и проширену методу коначних елемената (које су омогућиле одређивање напонско-деформационог стања и вредности фактора интензитета напона у свим тачкама фронта прслине), методу верификације (засновану на поређењу добијених експерименталних и нумеричких вредности) и методу експертског мишљења. Адекватност примењених метода оправдана је потврдом нивоа тачности добијених резултата, њиховим поређењем са експерименталним резултатима или вредностима доступним у литератури.

3.4. Оцена примењивости и верификације остварених резултата

Резултати докторске дисертације поред научне вредности имају и широку практичну примену, пре свега у прорачунима века носећих структура изложених замору. Остварени резултати омогућавају одређивање приближног места настанка прслине на носећим структурама још у фази пројектовања, као и брзину њеног ширења под дејством произвољног или стандардног спектра оптерећења. Резултати спроведених нумеричких симулација сложене носеће структуре верификовани су поређењем са експерименталним резултатима, док су резултати симулација ширења прслине на стандардним и нестандартним епруветама упоређени са резултатима доступним у литератури. При томе је остварено врло добро слагање добијених вредности.

3.5. Оцена способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат је током израде дисертације показао да је у стању да самостално решава сложене научне проблеме и да успешно влада најсавременијим научним и истраживачким методама. Поседује широко радно искуство и теоријско знање које је потребно за даљи успешан научно-истраживачки рад.

4. Остварен научни допринос

4.1. Приказ оствареног научног доприноса

Основни научни допринос дисертације јесте експериментална и нумеричка верификација проширене методе коначних елемената (ПМКЕ) која значајно побољшава укупни процес моделирања раста прслине у структури, уклањајући потребу за променом мреже коначних елемената након сваког корака прорачуна ширења прслине. Остварени научни допринос докторске дисертације „ИСТРАЖИВАЊЕ ЗАМОРНОГ ВЕКА НОСЕЋИХ СТРУКТУРАЛНИХ ЕЛЕМЕНАТА ИЗРАЂЕНИХ ОД СУПЕР ЛЕГУРА“ је вишеструк и огледа се у следећем:

- развијен је низ оригиналних тродимензионалних нумеричких модела са иницијалном прслином која је потом ширена кроз константну мрежу коначних елемената, при чему је добијено добро поклапање вредности фактора интензитета напона добијених применом ПМКЕ са вредностима из савремене литературе добијених другим методама прорачуна. При томе је добијена и велика поузданост и тачност примењене нумеричке методе;
- спроведена је детаљна анализа утицаја броја коначних елемената коришћених у анализи, типа коначног елемента, почетног положаја прслине у односу на коначни елемент, почетне дужине прслине и изабраног корака ширења прслине на тачност вредности фактора интензитета напона добијених прорачуном;
- предложена је и експериментално верификована потпуно нова методологија одређивања укупног заморног века сложене носеће структуре која се састоји у дефинисању нумеричког модела структуре, његовог „излагања“ спектру променљивог оптерећења, процене броја циклуса спектра који доводи до појаве оштећења, затим моделирања прслине и њеног ширења кроз модел и одређивања броја циклуса који ће довести до коначног лома напрсле носеће структуре;
- развијен је оригиналан и ефикасан систем за испитивање носећих конструкција на замор који је у тези детаљно описан и који ће и другим истраживачима послужити за верификацију њихових модела прорачуна;
- врло прегледно је приказана сама проблематика замора материјала, као и најновије методе одређивања заморног века носеће структуре са постојећом прслином, чиме је јасно указано на актуелност проблема који су решавани у тези.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

На основу прегледа литературе и сагледавања постојећих решења из области дисертације, констатујемо да су решења добијена у тези оригинална и значајна, те да су применљива у пракси. Такође, на основу увида у задате циљеве истраживања и резултате представљене у дисертацији можемо закључити да су пружени одговори на сва битна питања и решени проблеми са којима се кандидат сусрео у току истраживања. С обзиром на значај истраживања у областима важним за успешно пројектовање структуралних елемената отпорних на замор, као и чињеницу да је у тези дата методологија која омогућава одређивање заморних карактеристика носећих структура сложених геометријских облика, дисертација представља важан допринос у својој области. Имајући у виду експлицитност и репродуктивност добијених решења, што их донекле издваја у односу на захтевна и скупа експериментална истраживања, очекује се имплементација резултата дисертације у будућим истраживањима, као и при пројектовању структура отпорних на замор.

4.3. Очекивана примена резултата у пракси

У расположивој литератури још увек не постоји велики број решења проблема замора структуралних елемената добијених применом проширене методе коначних елемената, па се очекује значајна примена резултата и метода датих у тези. Применом нумеричке методе које су верификоване у тези знатно се поједностављује и рационализује процес пројектовања носећих ваздухопловних структура отпорних на замор и омогућава њихова провера много пре почетка серијске производње што доводи до знатних уштеда у фази пројектовања и експлоатације скупих ваздухопловних средстава. Осим тога, експериментално верификован нумерички модел рамењаче лаке летелице може послужити и за даља истраживања јер представља одличну замену за скупа и дуготрајна експериментална истраживања.

Како је у тези развијена и образложена методологија предвиђања заморног века структуралних компоненти у стварним, експлоатационим условима, очекује се њихова широка примена и у предвиђању века трајања критичних носећих елемената ваздухоплова.

4.4. Верификовани научни доприноси

Научни допринос докторске дисертације је верификован радовима објављеним у међународним часописима и саопштењима на конференцијама током вишегодишњег истраживања:

M23 Радови у међународним часописима

1. Todorovic A., Radovic K., **Grbovic A.**, Rudolf R., Maksimovic I., Stamenkovic D., STRESS ANALYSIS OF A UNILATERAL COMPLEX PARTIAL DENTURE USING THE FINITE ELEMENT METHOD, *Materials and Technology*, ISSN 1580-2949, MTAEC9, 44 (1) 41 (2010), page 41-47. **IF: 0.312**

2. Радовић К., Чаировић А., Тодоровић А., Станчић И., **Грбовић А.**, Компаративна анализа једностране и конвенционалне скелетираних протезе применом методе коначних елемената, *Srpski Arhiv Za Celokupno Lekarstvo*, 2010 Nov-Dec; 138 (11-12), DOI:10.2298/SARH1012706R. **IF: 0.194**

M51 Рад у водећем часопису националног значаја

1. **Grbović A.**, Rašuo B., Vidanović N., Perić M., Simulation of Crack Propagation in Titanium Mini Dental Implants (MDI), *FME Transactions*, Volume 39, No 4, 2011, pp. 165-170, ISSN 1451-2092, UDC:621

M33 Саопштења са међународних скупова штампана у целини

1. **Grbović A.**, Vidanović N., Kastratović G., The use of finite element method (FEM) for simulating crack growth in mini dental implants (MDI), Proc. Third Serbian (28th Yu) Congress on Theoretical and Applied Mechanics, Vlasina lake, Serbia, 5-8 July 2011.

2. Rašuo, B., Dinulović, M., Veg, A., **Grbović, A.**, Harmonization of new Wind Turbine Rotor Blades Development Process, ICCS16 - 16th International Conference on Composite Structures, June 28-30, 2011, The Faculty of Engineering of the University of Porto (FEUP), Porto, Portugal, Paper No. #459, (CD-Rom, strane 1-4), <http://paginas.fe.up.pt/~iccs16/CD/400-499.html>

5. Закључак и предлог

Докторска дисертација под називом „ИСТРАЖИВАЊЕ ЗАМОРНОГ ВЕКА НОСЕЋИХ СТРУКТУРАЛНИХ ЕЛЕМЕНАТА ИЗРАЂЕНИХ ОД СУПЕР ЛЕГУРА“ кандидата мр Александра Грбовића, дипл. инж. маш., представља савремен и оригиналан научни допринос који уз потпуну анализу разматраних проблема омогућава успешну процену заморног века сложених структура израђених од супер легура. На основу онога што је приказано у докторској дисертацији и чињенице да је анализирана сложена проблематика веома актуелна у научној јавности, са задовољством се констатује да је кандидат мр Александар Грбовић, дипл. инж. маш., успешно завршио докторску дисертацију у складу са предвиђеним предметом и постављеним циљевима. Кандидат је дошао до оригиналних резултата који су и верификовани, што им обезбеђује велику применљивост у овој атрактивној научној области.

На основу прегледа докторске дисертације од стране Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације под називом „ИСТРАЖИВАЊЕ ЗАМОРНОГ ВЕКА НОСЕЋИХ СТРУКТУРАЛНИХ ЕЛЕМЕНАТА ИЗРАЂЕНИХ ОД СУПЕР ЛЕГУРА“ кандидата мр Александра Грбовића, дипл. инж. маш., Комисија за оцену и одбрану са задовољством 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 предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета у Београду да овај Извештај прихвати, дисертацију стави на увид јавности, и упути извештај на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду, а да се након тога кандидат позове на јавну одбрану.

У Београду 03. 04. 2012.год.

Чланови Комисије за оцену и одбрану:

др Бошко Рашуо, ментор,
ред. проф. Машинског факултета у Београду

др Слободан Гвозденовић,
ред. проф. Саобраћајног факултета у
Београду

др Мирко Динуловић,
доц. Машинског факултета у Београду

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ –
Број:460/6
Датум:12.04.2012. године
Београд, Краљице Марије бр. 16

На основу члана 128. Закона о високом образовању и члана 12.2 Статута Машинског факултета, Наставно-научно веће на седници одржаној 12.04.2012. године, донело је

ОДЛУКУ

I Прихвата се извештај о позитивној оцени урађене докторске дисертације коју је поднео мр АЛЕКСАНДАР ГРБОВИЋ и одобрава јавна одбрана дисертације по добијању сагласности од Универзитета, под насловом: „ИСТРАЖИВАЊЕ ЗАМОРНОГ ВЕКА НОСЕЋИХ СТРУКТУРАЛНИХ ЕЛЕМЕНАТА ИЗРАЂЕНИХ ОД СУПЕР ЛЕГУРА“

II Универзитет је дана 07.02.2011. године, својим актом број 06-4089/20-11 дао сагласност на предлог теме докторске дисертације кандидата.

III Радови кандидата у часопису међународног значаја:

1. Todorovic A., Radovic K., Grbovic A., Rudolf R., Maksimovic I., Stamenkovic D.,
STRESS ANALYSIS OF A UNILATERAL COMPLEX PARTIAL DENTURE USING THE FINITE ELEMENT METHOD, Materials and Technology, ISSN 1580-2949, MTAEC9, 44 (1) 41(2010), page 41-47. IF: 0.312

2. Радовић К., Чаировић А., Тодоровић А., Станчић И., Грбовић А.,
Компаративна анализа једностране и конвенционалне скелетиране протезе применом методе коначних елемената, Srpski Arhiv Za Celokupno Lekarstvo, 2010 Nov-Dec; 138 (11-12), DOI:10.2298/SARH1012706R. IF: 0.194

Одлуку доставити: кандидату, ментору, Катедри за ваздухопловство и архиви факултета.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

Проф.др Милорад Милованчевић