



**УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
ГРАЂЕВИНСКИ ФАКУЛТЕТ**

Булевар краља Александра 73
Поштански фах 895, 11001 Београд
Телефон (011) 3218-501
Телефакс (011) 3370-223

**УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
ВЕЋЕ НАУЧНИХ ОБЛАСТИ
ГРАЂЕВИНСКО-УРБАНИСТИЧКИХ НАУКА**

У прилогу дописа достављамо Вам материјал за давање сагласности на реферат о урађеној докторској дисертацији **Мирослав Марјановић, дипл. грађ.инж.** под насловом:

“НЕЛИНЕАРНА АНАЛИЗА ЛАМИНАТНИХ КОМПОЗИТНИХ ПЛОЧА И ЉУСКИ СА ДЕЛАМИНАЦИЈАМА ПРИМЕНОМ МЕТОДЕ КОНАЧНИХ ЕЛЕМЕНАТА“

Прилог:

1 примерак обрасца 04

1 примерак реферата о оцени и одбрани

1 примерак одлуке о прихватању реферата о оцени и одбрани

1 примерак докторске дисертације

CD

копија Извода из матичне књиге венчаних

Сви прилози прослеђени на e-mail

ШЕФ СЛУЖБЕ ЗА СТУДЕНТСКА ПИТАЊА

Тамара Вукша, дипл.педагог

5/14
мај 2016.

Образац 4
УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
Студентски трг бр.1
ВЕЋЕ НАУЧНИХ ОБЛАСТИ
ГРАЂЕВИНСКО-УРБАНИСТИЧКИХ НАУКА

З А Х Т Е В

за давање сагласности на реферат о урађеној докторској дисертацији
Молимо да, сходно члану 47.ст.5 тач.4.Статута Универзитета у Београду („Гласник Универзитета”, број 162/11-пречишћен текст, 167/12, 172/13 и 178/14), дате сагласност на реферат о урађеној докторској дисертацији:

Кандидат **МИРОСЛАВ /Слободан/ МАРЈАНОВИЋ**, дипл. грађ.инж.
Студент докторских студија на студијском програму **грађевинарство**
Пријавио је докторску дисертацију под насловом:

**“НЕЛИНЕАРНА АНАЛИЗА ЛАМИНАТНИХ КОМПОЗИТНИХ ПЛОЧА И ЉУСКИ
СА ДЕЛАМИНАЦИЈАМА ПРИМЕНОМ МЕТОДЕ КОНАЧНИХ ЕЛЕМЕНАТА“**

Универзитет је дана **26. 12. 2014. године** својим актом под **бр.61206-5922/2-14** дао сагласност на предлог теме докторске дисертације која је гласила:

**“НЕЛИНЕАРНА АНАЛИЗА ЛАМИНАТНИХ КОМПОЗИТНИХ ПЛОЧА И ЉУСКИ
СА ДЕЛАМИНАЦИЈАМА ПРИМЕНОМ МЕТОДЕ КОНАЧНИХ ЕЛЕМЕНАТА“**

Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата образована је на седници одржаној **24.03. 2016.године** одлуком Факултета **бр. 329/9-14 у саставу:**

1. Dr.techn. Gunther Meschke, /Ruhr University Bochum/
2. Проф. др Бранислав Пујевић, дипл.грађ.инж./научна област Теорија конструкција/Грађевински факултет Београд
3. Проф. др Мира Петронијевић, дипл.грађ.инж./научна област Техничка механика и теорија конструкција/ Грађевински факултет Београд
4. Проф. др Ђорђе Лађиновић, / научна област Теорија конструкција/Факултет техничких наука Универзитета у Новом Саду/
5. Доц. др Марија Нефовска - Даниловић, дипл.грађ. инж./ научна област Техничка механика и теорија конструкција/ Грађевински факултет Београд

Наставно-научно веће Факултета прихватило је реферат Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације на седници одржаној дана **19.05.2016. године**.

ДЕКАН ГРАЂЕВИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

Проф. др Бранко Божић, дипл. геод.инж.

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Мирослава Марјановића

Одлуком Наставно-научног већа Грађевинског факултета Универзитета у Београду бр. 329/9-14 од 24.03.2016. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Мирослава Марјановића под насловом:

**НЕЛИНЕАРНА АНАЛИЗА ЛАМИНАТНИХ КОМПОЗИТНИХ ПЛОЧА И ЉУСКИ СА
ДЕЛАМИНАЦИЈАМА ПРИМЕНОМ МЕТОДЕ КОНАЧНИХ ЕЛЕМЕНАТА**

Докторска дисертација је написана на енглеском језику у складу са условима међународног пројекта SEEFORM у оквиру кога је дисертација урађена. Наслов дисертације на енглеском језику гласи:

**NONLINEAR ANALYSIS OF LAMINATED COMPOSITE PLATES AND SHELLS WITH
DELAMINATIONS USING FINITE ELEMENT METHOD**

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

- 13.12.2010. године кандидат је уписао Докторске академске студије на Грађевинском факултету у Београду, на студијском програму Грађевинарство.
- 02.09.2014. на седници Катедре за техничку механику и теорију конструкција кандидат је изложио предложену тему докторске дисертације под насловом "Нелинеарна анализа ламинатних композитних плоча и љуски са деламинацијама применом методе коначних елемената". Комисија коју је образовало Веће Катедре прихватила тему докторске дисертације и предложила кандидату да тему пријави Наставно-научном већу Грађевинског факултета.
- 03.09.2014. кандидат је пријавио тему докторске дисертације Наставно-научном већу Грађевинског факултета у Београду.
- 11.09.2014. Наставно-научно веће Грађевинског факултета у Београду именovalo је Комисију за оцену подобности теме и кандидата докторске дисертације у саставу: проф. др Ђорђе Вуксановић, проф. др Бранислав Пујевић, Prof. Dr.techn. Günther Meschke (Одлука бр. 329/4 од 12.09.2014.).
- 18.12.2014. Наставно-научно веће Грађевинског факултета у Београду прихватило је извештај Комисије за оцену подобности теме и кандидата докторске дисертације и своју одлуку доставило Већу грађевинско-урбанистичких наука Универзитета у Београду на давање сагласности (Одлука бр. 329/6 од 18.12.2014.).

- 25.12.2014. Веће грађевинско-урбанистичких наука Универзитета у Београду дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације под насловом "Нелинеарна анализа ламинатних композитних плоча и љуски са деламинацијама применом методе коначних елемената" (Одлука бр. 61206-5922/2-14 од 25.12.2014.).
- 14.03.2016. докторска дисертација је предата на преглед и оцену.
- На седници бр. 6, одржаној 24.03.2016. године (Одлука бр. 329/9 од 25.03.2016.) Наставно-научно веће Грађевинског факултета у Београду именovalo је Комисију за оцену и одбрану докторске дисертације у следећем саставу:
 - o Dr.techn. Günther Meschke, редовни професор, Ruhr Universität Bochum, Institute for Structural Mechanics,
 - o др Бранислав Пујевић, редовни професор, Грађевински факултет Универзитета у Београду,
 - o др Мира Петронијевић, редовни професор, Грађевински факултет Универзитета у Београду,
 - o др Ђорђе Лађиновић, редовни професор, Факултет техничких наука Универзитета у Новом Саду,
 - o др Марија Нефовска-Даниловић, доцент, Грађевински факултет Универзитета у Београду.

1.2. Научна област дисертације

Дисертација кандидата Мирослава Марјановића припада научној области Грађевинарство, ужа научна област Техничка механика и теорија конструкција. За ментора дисертације одређен је др Ђорђе Вуксановић, редовни професор Грађевинског факултета Универзитета у Београду. За коментора дисертације именован је Prof. Dr.techn. Günther Meschke, редовни професор Рурског универзитета у Бохуму.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Мирослав Марјановић рођен је 8. јануара 1986. године у Ужицу, где је завршио основну школу и гимназију природно-математичког смера као носилац дипломе "Вук Караџић" за ученике основних, као и за ученике средњих школа. Основне академске студије на Грађевинском факултету у Београду уписао је школске 2005/06. године, а дипломирао је 2009. године на Модулу Конструкције, са просечном оценом 9.56. Дипломске академске студије на Грађевинском факултету у Београду уписао је школске 2009/2010. године, а дипломирао је 2010. године на Модулу Конструкције, са просечном оценом 9.71. За изузетне резултате на предметима Катедре за техничку механику и теорију конструкција, 2009. године је добио Награду Грађевинског факултета у Београду, из Фонда професора Душана Крајчиновића. Добитник је Награде Регионалне привредне коморе Ужице за најбоље студенте – таленте са подручја коморе за 2008. годину. Добитник је више стипендија за постигнут успех на студијама. Више пута је похваљиван од стране Грађевинског факултета Универзитета у Београду за изузетан успех током студирања. Током Основних академских студија на Грађевинском факултету Мирослав Марјановић је био ангажован као студент-демонстратор на предметима Информатика 1 и Статика конструкција.

Докторске академске студије на Грађевинском факултету у Београду уписао је школске 2010/2011. године. Положио је све испите предвиђене наставним планом са просечном оценом 10, а 2014. године одобрена му је израда докторске дисертације под називом "Нелинеарна анализа ламинатних композитних плоча и љуски са деламинацијама применом методе коначних елемената", под менторством проф. др Ђорђа Вуксановића и Prof. Dr.techn. Günther Meschke-a, са Рурског универзитета у Бохуму.

Током редовних студија, у 2 наврата је учествовао на летњим школама "Vibrations of Structures due to Rail-Road Traffic" у организацији Грађевинског факултета Универзитета у Београду и Техничког Универзитета у Минхену. У склопу израде мастер рада током 2010. године, учествовао је на међународној летњој школи "Model Validation and Simulation" на Bauhaus Universität Weimar. У децембру 2011. године похађао је радионицу "Scientific Presentation", на Ruhr-Universität Bochum.

Од децембра 2010. године запослен је на Грађевинском факултету Универзитета у Београду у звању асистента - студента докторских студија за ужу научну област Техничка механика и теорија конструкција. Од избора у звање асистента – студента докторских студија одржава вежбања из предмета Статика конструкција, Матрична анализа конструкција и Примена рачунара у пројектовању конструкција, на модулу Конструкције. Такође је ангажован у настави и на другим предметима Катедре за техничку механику и теорију конструкција.

Од 2011. године је стипендиста у међународног програма SEEFORM (South Eastern European Graduate School for Master and Ph.D. Formation in Engineering), који финансира DAAD, Немачка. У оквиру пројекта SEEFORM је у току претходне четири године провео укупно 7 месеци на студијском усавршавању на Ruhr-Universität Bochum (Institute for Structural Mechanics), код коментора Prof. Dr.techn. Günther Meschke-a. Поред тога учествовао је на Lecture seminar-има за студенте докторских студија у земљи и иностранству и семинарима за студенте докторских студија у организацији RUB Research School на Ruhr-Universität Bochum.

Кандидат је истраживач на Пројекту Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије ТР 36048 - Истраживање стања и метода унапређења грађевинских конструкција са аспекта употребљивости, носивости, економичности и одржавања. Кандидат је 2014. године положио стручни испит за грађевинску струку – област грађевинске конструкције. Члан је Друштва грађевинских конструктера Србије, Српског друштва за механику и рецензент за: International Journal of Mechanical Sciences и Science and Engineering of Composite Materials.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација "Нелинеарна анализа ламинатних композитних плоча и љуски са деламинацијама применом методе коначних елемената" написана је на енглеском језику, на 251 страни, садржи 80 слика и 27 табела. Подељена је на дванаест поглавља: 1) Увод; 2) Преглед претходних истраживања; 3) Општа ламинатна теорија плоча; 4) Аналитичко решење у линеарној динамичкој анализи неоштећених плоча; 5) Нумерички (МКЕ) модел; 6) Контактни алгоритам; 7) Пропагација деламинације; 8) Анализа ламинатних композитних љуски; 9) Објектно-орјентисан рачунарски програм; 10) Нумерички примери; 11) Закључци; 12) Будући рад. У списку коришћене литературе налази се 157 референци које детаљно приказују тренутно стање у нумеричкој анализи ламинатних композитних плоча и љуски са деламинацијама.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У уводном поглављу, дефинисани су основни појмови теорије композитних носача и истакнута је неопходност формирања прецизног нумеричког модела за анализу ламинатних композитних и сендвич плоча са појавом деламинације, тј. међусобног одвајања појединих слојева. Дискутован је утицај деламинације на смањење крутости при статичком оптерећењу и промену фреквентних карактеристика конструктивног елемента ламинатне или сендвич плоче при динамичком оптерећењу. Негативни ефекти деламинације представљали су главни мотив за развој нумеричког

модела који ће имати способност да анализира оштећене ламинатне композитне или сендвич плоче услед динамичког оптерећења.

У наставку првог поглавља је кратко наведено да ће се нумерички модел заснивати на решењу Опште ламинатне теорије плоча коју је предложио Reddy, применом методе коначних елемената (МКЕ), са узимањем у обзир геометријске нелинеарности према von Karman-овим претпоставкама. Нумерички модел који је предложио Reddy (*J. N. Reddy. Mechanics of laminated composite plates: theory and analysis. CRC Press, 1997.*), а који је унапређен од стране Barbero-а (*E. J. Barbero, J. N. Reddy. Modeling of Delamination in Composite Laminates using a Layer-Wise Plate Theory. International Journal of Solids and Structures 1991, 28(3), 373-388.*) послужио је као основа за развој нумеричког модела приказаног у дисертацији.

Предложени нумерички модел реалистично представља кинематику плоче са деламинацијом и узима у обзир пропагацију деламинације у својој равни услед динамичког оптерећења, истовремено спречавајући међусобно преклапање суседних слојева у зони деламинације.

У другом поглављу дат је преглед претходних истраживања у области теорије композитних носача, која су релевантна за докторску дисертацију. На почетку поглавља су приказани недостаци теорија плоча које се заснивају на једном еквивалентном слоју (енг. *equivalent single layer theories*), и истакнута је потреба примене слојевите (енг. *layerwise*) теорије плоча за коректан опис кинематике слојевитих плоча са деламинацијом. Дат је хронолошки приказ развоја теорија плоча са најважнијим референцама. Приказана су одговарајућа нумеричка решења базирана на методи коначних елемената заснована на одговарајућим теоријама плоча.

Анализом литературе, кандидат је дошао до закључка да постоји велики простор за унапређење нумеричких модела ламинатних композитних љуски применом слојевитих теорија плоча. Наиме, до сада приказани нумерички модели углавном третирају неоштећене љуске, што је навело кандидата на идеју да нумерички модел ламинатне композитне плоче прошири на анализу ламинатних композитних љуски са присуством деламинације. У последњем делу другог поглавља кандидат је истакао одговарајуће предности примене објектно-орјентисаног рачунарског програма у нумеричкој анализи конструкције применом методе коначних елемената, нарочито у случају јако сложених модела који захтевају значајно време прорачуна условљено великим бројем степени слободe система. Дат је хронолошки приказ најважнијих објектно-орјентисаних софтвера и њихове структуре, који су послужили као основа за програм који је кандидат развио у склопу израде дисертације.

У трећем поглављу дат је приказ Reddy-еве Опште ламинатне теорије плоча: претпоставке и ограничења, везе између поља померања и деформације, конститутивне релације за појединачан слој и читаву ламинатну плочу. Детаљно је приказано извођење једначина кретања применом принципа виртуалних померања. Изведена је "strong" формулација нелинеарног динамичког проблема и приказана редукција општег проблема на одговарајуће проблеме теорије конструкција: геометријски нелинеарно и линеарно савијање, линеарно избочавање, слободне вибрације, геометријски нелинеарна и линеарна динамичка анализа.

У четвртном поглављу приказано је аналитичко решење Опште ламинатне теорије плоча при динамичком напрезању неоштећене, правоугаоне, слободно ослоњене ламинатне композитне плоче са влакнима укрштеним под углом од 90° (енг. *cross-ply*). Разматран је линеарни одговор конструкције, а систем парцијалних диференцијалних једначина кретања је редукован на систем обичних диференцијалних једначина по времену применом Newmark-овог поступка. Одговор конструкције (померања, брзине и убрзања) добијен је применом Navier-овог решења, а након тога срачунати су напони по дебљини ламинатне плоче и њихова промена у времену.

У петом поглављу приказано је нумеричко решење Опште ламинатне теорије плоча применом методе коначних елемената. Изведена је "weak" формулација нелинеарног проблема. Приказан је поступак добијања матрице крутости, геометријске матрице крутости, конзистентне матрице маса и вектора сила слојевитог коначног елемента са могућношћу описивања кинематике деламинације увођењем

додатних степени слободе у чворовима коначног елемента, за приказ релативног померања слојева у оштећеној зони плоче. Затим је описан поступак добијања изопараметарског четвороугаоног слојевитог коначног елемента са 4 или 9 чворова, и описан је проблем *shear locking*-а који се може јавити при моделирању веома танких плоча. Описани су нивои нумеричке интеграције који се морају применити како би се овај проблем елиминисао. Након тога укратко је описана *assembly* процедура и дате су матричне једначине којима се у МКЕ описују различити проблеми у теорији конструкција. Описан је поступак задавања граничних услова по померањима, а затим је описан поступак решавања система једначина за статичке (*time independent*) и динамичке (*time dependent*) проблеме. Нарочита пажња посвећена је описивању решавања геометријски нелинеарног динамичког проблема напрезања ламинатне композитне плоче и дата је процедура решавања.

У шестом поглављу, детаљно је илустрован итеративни контактни алгоритам који је имплементиран у нумерички модел, са циљем елиминације међусобног преклапања суседних слојева у зони деламинације. На једноставном примеру, са формализмом познатим из матричне анализе конструкција, описан је поступак елиминисања компонената померања W^I (енг. *crack opening displacement*). Ради бољег разумевања, дат је графички приказ алгоритма потпрограма који је коришћен у објектно-орјентисаном рачунарском програму за елиминацију контакта између слојева.

У седмом поглављу описана је главна тема дисертације: метод за праћење фронта деламинације који се мења под дејством статичког или динамичког оптерећења. Приказан алгоритам представља унапређење алгоритма који су предложили Xie и Biggers (*D.Xie, S.B.Biggers. Strain energy release rate calculation for a moving delamination front of arbitrary shape based on the virtual crack closure technique. Part I: Formulation and validation. Engineering Fracture Mechanics 2006, 73, 771-785.*), а који је био ограничен само на структуриране мреже коначних елемената. Алгоритам је заснован на техници виртуалног затварања прслине (енг. *virtual crack closing technique*). Приказани поступак захтева срачунавање величине отварања деламинације иза фронта деламинације, чворних сила дуж фронта деламинације и виртуалне затворене површине деламинације испред постојеће деламинације.

Изузетно важан аспект приказаног алгоритма представља срачунавање вектора правца ширења деламинације. Компоненте овог вектора срачунате су на основу статуса суседних чворова у мрежи коначних елемената, за разлику од већине модела доступних у литератури, где се правац вектора правца ширења деламинације претпоставља, што има за последицу да се модели приказани у литератури ограничавају на структуриране мреже коначних елемената. Виртуално затворена површина деламинације одређена је срачунавањем координата шест контролних тачака, за сваки чвор у мрежи коначних елемената дуж фронта деламинације. Након срачунавања свих раније наведених потребних величина, примењен је критеријум за пропагацију деламинације.

Осмо поглавље описује проширење приказаног слојевитог коначног елемента плоче на анализу ламинатних композитних љуски, са или без присуства деламинације. Приказани су изопараметарски троугаони слојевити коначни елементи са три или шест чворова. Приказана је трансформација компонената померања у чворовима коначног елемента плоче из локалног координатног система (раван појединачног коначног елемента) у глобални координатни систем (тродимензионални Декартов простор) базирана на основама векторске алгебре. Формулисане су одговарајуће матрице трансформације слојевитог троугаоног коначног елемента. Описана је нумеричка интеграција за одређивање матрице крутости и матрице маса наведених елемената. На крају су критички дискутована одговарајућа ограничења оваквог приступа и дате препоруке за превазилажење нумеричке нестабилности приказаног модела.

Девето поглавље описује објектно-орјентисан рачунарски програм у MATLAB-у, који је кандидат развио у склопу израде докторске дисертације. За унос података и визуелизацију резултата коришћен је програмски пакет GiD Pre/Post Processor који је развијен у Међународном центру за нумеричке методе у инжењерству CIMNE, Барселона. У оквиру овог поглавља описана је примена наведеног програма у моделу који је био предмет дисертације. Кандидат је описао процедуре и функције које је написао ради повезивања GiD програмског пакета са програмом у MATLAB-у. Након тога описан је

поступак креирања мреже за визуелизацију резултата, која се због специфичности нумеричког модела разликује од мреже коначних елемената примењених у нумеричким прорачунима. У другом делу овог поглавља описан је рачунарски програм у MATLAB-у. Класе које су развијене подељене су у четири групе: *modeling classes*, *finite element model classes*, *analysis classes* и *numerical classes and functions*, а на крају је дат дијаграм међусобних релација појединих класа.

Десето поглавље у дисертацији садржи нумеричке примере којима су илустроване теоретске поставке приказане у оквиру претходних поглавља. Редом су разматрани: линеарно и нелинеарно савијање плоча, слободне вибрације плоча, избочавање плоча, линеарна и геометријски нелинеарна динамичка анализа и слободне вибрације ламинатних композитних љуски. Највећа пажња у свим наведеним проблемима посвећена је утицају деламинације (њене величине и положаја у плочи) на статички или динамички одговор конструктивног елемента.

Описаним поступцима анализирани су следећи нумерички примери:

1. Слободне вибрације слободно ослоњене ламинатне плоче применом теорија вишег реда,
2. Слободне вибрације слободно ослоњене ламинатне плоче са почетном деламинацијом,
3. Одређивање критичног оптерећења извијања слободно ослоњене ламинатне плоче,
4. Одређивање критичног оптерећења извијања слободно ослоњене ламинатне плоче са деламинацијом,
5. Динамичка линеарна и геометријски нелинеарна анализа слободно ослоњене ламинатне плоче са утицајем различитих теорија и броја слојева,
6. Динамичка линеарна и геометријски нелинеарна анализа слободно ослоњене ламинатне плоче са почетном деламинацијом са различитим положајем деламинације,
7. Динамичка линеарна анализа ламинатне плоче са пропагацијом деламинације,
8. Слободне вибрације композитне слојевите цилиндричне љуске са различитим граничним условима,
9. Слободне вибрације композитне слојевите конусне љуске са различитим граничним условима,
10. Слободне вибрације композитног слојевитог цилиндричног и сферног панела са различитим граничним условима,
11. Слободне вибрације композитне слојевите цилиндричне љуске са деламинацијом.

У већини примера пажљиво је урађена параметарска анализа утицаја броја слојева, услова ослањања и величине коначних елемената на решење. Поређењем са постојећим аналитичким, нумеричким или експерименталним примерима из литературе и решењима добијеним применом комерцијалног програма ABAQUS урађена је верификација предложене методе и развијеног програма. Након сваког примера дати су кратки закључци.

На крају рада, у једанаестом поглављу, закључци који су проистекли из дисертације су детаљно дискутовани. У последњем поглављу дате су препоруке за будући рад у овој области како би се даље унапредили нумерички модели ламинатних композитних плоча и љуски са деламинацијама.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Докторска дисертација под насловом "Нелинеарна анализа ламинатних композитних плоча и љуски са деламинацијама применом методе коначних елемената" представља оригинални научни рад у области рачинске механике ламинатних композитних плоча са почетном деламинацијом. Полазећи од Reddy-еве Опште ламинатне теорије плоча и технике виртуалног затварања прслине, успешно је унапређен нумерички модел за статичку и динамичку геометријски нелинеарну анализу композитних ламинатних плоча и љуски са почетном деламинацијом заснован на методи коначних елемената,

(МКЕ), на анализу пропагације деламинације између слојева у композитној плочи. Истакнуто је да су разматрани контактни услови између додирних површи у зони деламинације, поред примене реалне кинематике плоче са деламинацијом. Такође је развијен веома ефикасан алгоритам за унос података и одличну визуелизацију нумеричких резултата. Све потребне алгоритме развио је и имплементирао Мирослав Марјановић.

Дисертација спада у веома актуелну и комплексну област рачунске механике, и садржи елегантна и робусна решења статичких и динамичких проблема.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Током израде докторске дисертације кандидат је проучио релевантну литературу. Навео је 157 референци које су релевантне за област дисертације. Преглед литературе обухвата широк опсег тема обрађених у дисертацији, и чини одличну основу за будући рад у области дисертације. Кандидат се адекватно позивао на постојећу литературу током израде рада.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

У докторској дисертацији кандидат је користио адекватне научне методе, као и савремене нумеричке методе за решавање веома захтевног проблема теорије конструкција – геометријски нелинеарне нумеричке анализе пропагације деламинације у композитним плочама и љускама. Неке од примењених научних метода су:

- метода коначних елементата (МКЕ)
- геометријски нелинеарна анализа слојевитих композитних плоча у МКЕ
- општа ламинатна теорија плоча
- векторска алгебра
- методе решавања нелинеарних једначина
 - Newton-Raphson-ов поступак,
 - Picard-ова метода,
- Newmark-ов интеграциони поступак за решавање дискретизоване динамичке једначине система
- Механика лома, техника виртуалног затварања прслине и одређивање брзине ослобађања енергије деформације
- Методе објектно оријентисаног програмирања у MATLAB програмском језику

Кандидат је успешно показао варијациону формулацију и дискретизацију плоча и љуски, узимајући у обзир кинематику вишеслојне плоче, у оквиру Опште ламинатне теорије плоча. Највећи научни допринос дисертације представља унапређење наведеног модела на плоче са деламинацијом, а нарочито описивање пропагације деламинације применом неструктурираних мрежа коначних елемената. Проблем деламинације је решаван применом линеарно еластичне Механике лома (енг. LEFM – Linear Elastic Fracture Mechanics) и методе виртуалног затварања прслине, што се показало као робусно решење за овај тип проблема. Нарочит допринос дисертације представља и одговарајуће разматрање контактних услова у статичкој и динамичкој анализи. За решавање условних једначина проблема, кандидат је користио модерне нумеричке методе и објектно-оријентисано програмирање. Кандидат је адекватно комбиновао сложене теоријске и нумеричке up-to-date методе како би остварио циљеве дисертације.

3.4. Применљивост остварених резултата

Нумерички модел применом МКЕ који је од стране кандидата развијен за статичку и динамичку анализу деламинације у ламинатним композитним плочама и љускама, веома је значајан за практичну примену. Потенцијалне примене у инжењерству могу бити код керамичких материјала ојачаних влакнима и сендвич плоча, где постојање деламинације између језгра и спољних површи плоче може довести до прогресивног лома конструкције при динамичком оптерећењу. Разматрање динамичког оптерећења је од великог значаја за анализу трајности композитних носача у грађевинарству и машинству, где оптерећење од ветра или друга динамичка оптерећења могу значајно умањити носивост конструкције.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат је стекао изузетну самосталност у научном раду кроз припрему и израду докторске дисертације, полагањем испита на факултету, активним учешћем на SEEFORM семинарима, студијским боравцима на престижним европским универзитетима, а посебно објављивањем четири рада у часописима са SCI листе и великог броја радова у домаћим часописима и на међународним конференцијама. Библиографија кандидата сматра се одличном и далеко превазилази просечан ниво студената докторских студија на осталим универзитетима истог ранга. Кандидат је такође показао способност за критичку анализу научне литературе, развој и предлагање оригиналних решења која доводе до бољих резултата у односу на оне које карактеришу до сада публикована решења. Све заједно недвосмислено потврђује научну зрелост и изузетан истраживачки потенцијал кандидата.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Основни научни доприноси у дисертацији су:

1. Развој побољшаних изопараметарских слојевитих коначних елемената плоче (са 4 или 9 чворова) базираних на дисконтинуалном пољу померања, у геометријски нелинеарној статичкој и динамичкој анализи,
2. Развој изопараметарског троугаоног слојевитог коначног елемента љуске са деламинацијом и матрица трансформације за симулацију просторне конструкције љуске помоћу дводимензионалних коначних елемената,
3. Предлог нове методе праћења пропагације фронта деламинације од чвора до чвора неструктуриране мреже четвороугаоних коначних елемената (енг. *node-to-node propagation*)
4. Предлог контактнoг алгоритма без узимања у обзир трења (енг. *frictionless node-to-node contact*) за елиминацију међусобног преклапања суседних слојева у зони деламинације,
5. Спрезање претходно наведених алгоритама у нумерички модел слојевитог коначног елемента, ради симулације тродимензионалног проблема помоћу дводимензионалних коначних елемената,
6. Развој програма за нумеричку линеарну и геометријски нелинеарну, статичку и динамичку анализу композитних слојевитих (ламинатних) плоча и љуски применом Опште теорије ламинатних плоча са или без деламинације у МКЕ,
7. Развој графичког окружења за генерисање модела и визуелизацију резултата прорачуна који су предмет дисертације.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Кандидат је развио нумерички модел за статичку и динамичку анализу ламинатних композитних плоча и љуски применом слојевитих коначних елемената, који не само да разматра деламинацију, већ има могућност праћења произвољне деламинације применом произвољне мреже коначних елемената.

Како модел такође узима у обзир и контакт при затварању прслине, овај рад представља унапређење у поређење са постојећим моделима из литературе. Резултати приказани у оквиру дисертације веома су добро прихваћени у међународној научној заједници, јер је 4 рада који садрже резултате дисертације већ објављено у врхунским међународним часописима са SCI листе. Применљивост у инжењерској пракси је такође велика, јер модел омогућава анализирање композитних плоча и љуски са произвољним распоредом анизотропних слојева, услед дејства сложених статичких и динамичких оптерећења. Главни допринос дисертације представља анализа утицаја деламинације на динамички одговор ламинатних композитних плоча. Треба нагласити да је развијени нумерички модел веома робустан, што је кључни фактор за практичну примену.

Резултати приказани у дисертацији представљају одличну полазну основу за будуће истраживање, где би се могло разматрати нелинеарно понашање материјала као и појава првог оштећења у конструкцији (*initiation of delamination*). Предмет будућег истраживања могли би да буду и термо-механичко, као и механичко-електрично спрезање (пиезоелектрични ефекат).

4.3. Верификација научних доприноса

У току истраживачког рада у ужој области теме докторске дисертације, кандидат Мирослав Марјановић објавио је следеће радове:

Категорија M21:

1. Kolarevic N, **Marjanović M**, Nefovska-Danilovic M, Petronijevic M (2016): Free vibration analysis of plate assemblies using the dynamis stiffness method based on the higher order shear deformation theory. Journal of Sound and Vibration, Vol. 364, pp.110-132. (IF=1.813, ISSN 0022-460X)
2. **Marjanović M**, Vuksanović Dj (2016): Free vibrations of laminated composite shells using the rotation-free plate elements based on Reddy's layerwise discontinuous displacement model. Composite Structures, in press. doi: 10.1016/j.compstruct.2015.07.125 (IF=3.318, ISSN 0263-8223)
3. **Marjanović M**, Vuksanović Dj, Meschke G (2015): Geometrically nonlinear transient analysis of delaminated composite and sandwich plates using a layerwise displacement model with contact conditions. Composite Structures, Vol. 122, pp.67-81. (IF=3.318, ISSN 0263-8223)
4. **Marjanović M**, Vuksanović Dj (2014): Layerwise solution of free vibrations and buckling of laminated composite and sandwich plates with embedded delaminations. Composite Structures, Vol. 108, pp.9-20. (IF=2.231, ISSN 0263-8223)

Категорија M24:

1. Vuksanović Dj, **Marjanović M** (2015): Application of layered finite elements in the numerical analysis of laminated composite and sandwich structures with delaminations. Building Materials and Structures, Vol. 58, pp.59-76. (ISSN 0543-0798)

Категорија M33:

1. Vuksanović Dj, **Marjanović M**, Kovačević D: Finite element modeling of free vibration problem of delaminated composite plates using Abaqus CAE. 6th International Conference Civil Engineering – Science and Practice, Žabljak, 2016, Montenegro
2. **Marjanović M**, Vuksanović Dj: Transient analysis of laminated composite and sandwich plates with embedded delaminations using GLPT. 9th International Conference on Structural Dynamics EURODDYN 2014. Porto, Portugal, pp. 3373-3380

3. Vuksanović Dj, Marjanović M: Free vibrations of delaminated composite and sandwich plates. 5th International Conference Civil Engineering – Science and Practice, Žabljak, 2014, Montenegro, pp. 363-370
4. Marjanović M, Vuksanović Dj: Linear Analysis of Single Delamination in Laminated Composite Plate using Layerwise Plate Theory. 4th International Congress of Serbian Society of Mechanics. Vrnjačka Banja, 2013, Serbia, pp.443-448
5. Marjanović M, Vuksanović Dj: Linear Transient Analysis of Laminated Composite Plates using GLPT. First international conference for PhD students in Civil Engineering, Cluj-Napoca, 2012, Romania, pp.169-176
6. Marjanović M, Vuksanović Dj: Transient Response of Cross-Ply Laminated Composite Plates. International Symposium for Students of Doctoral Studies in the fields of Civil Engineering, Architecture and Environmental Protection, Niš, 2012, Serbia, pp.345-352

Категорија M52:

1. **Marjanović M**, Vuksanović Dj (2014): Geometrically nonlinear transient analysis of delaminated composite plates. Зборник радова Грађевинског факултета Суботица, Vol. 25 (Конференција "Савремена достигнућа у грађевинарству"), pp. 465-471

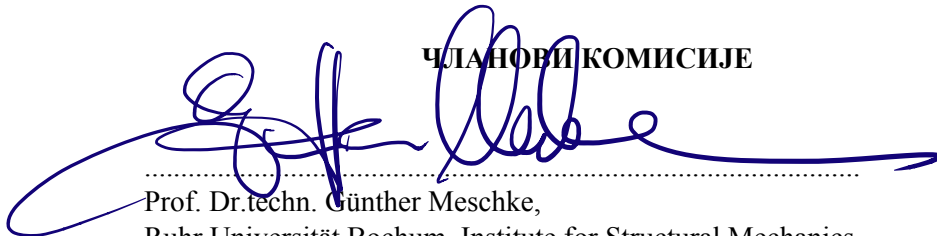
Међународни часописи који немају IF

1. **Marjanović M**, Vuksanović Dj (2013): Linear Transient Analysis of Laminated Composite Plates using GLPT. Acta Technica Napocensis: Civil Engineering & Architecture, Vol. 56, No. 2, pp.58-71

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу претходне анализе приложене докторске дисертације, испуњености задатака и циљева истраживања, примењене методологије, научног доприноса и добијених резултата, може се констатовати да докторска дисертација под насловом **Нелинеарна анализа ламинатних композитних плоча и љуски са деламинацијама применом методе коначних елемената** представља оригинални научни допринос и потврду да је кандидат Мирослав Марјановић способан за самостални научно-истраживачки рад. Изузетан квалитет рада потврђен је чињеницом да су резултати дисертације изузетно добро прихваћени у међународној научној јавности. Са четири рада у врхунским међународним часописима са SCI листе, као и са девет радова у међународним и домаћим часописима и зборницима међународних научних скупова, научни допринос Мирослава Марјановића може се сматрати изузетним.

На основу напред изнетог, Комисија предлаже Наставно-научном већу Грађевинског факултета Универзитета у Београду да се прихвати докторска дисертација Мирослава Марјановића, мастер.инж.грађ., под насловом **Нелинеарна анализа ламинатних композитних плоча и љуски са деламинацијама применом методе коначних елемената** и да се одобри њена јавна одбрана.


ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ
.....
Prof. Dr.techn. Günther Meschke,
Ruhr Universität Bochum, Institute for Structural Mechanics

.....
Проф. др Бранислав Пујевић,
Универзитет у Београду, Грађевински факултет

.....
Проф. др Мира Петронијевић,
Универзитет у Београду, Грађевински факултет

.....
Проф. др Ђорђе Лађиновић,
Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука

.....
Доц. др Марија Нефовска-Даниловић,
Универзитет у Београду, Грађевински факултет



**ГРАЂЕВИНСКИ ФАКУЛТЕТ
УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ**

Булевар краља Александра 73
11001 Београд,
П. факс 39-42
Телефон (011) 321-86-06, 337-01-02
Телефакс (011) 337-02-23
Е пошта dekanat@grf.bg.ac.rs

На основу члана 58. став 2. тачка 23. Статута Грађевинског факултета Универзитета у Београду, Наставно-научно веће Грађевинског факултета Универзитета у Београду, на својој седници одржаној дана 19.05.2016. године, донело је

ОДЛУКУ

Прихвата се извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата **Мирослава Марјановића, маг.инж.грађ.**, под насловом:

„ НЕЛИНЕАРНА АНАЛИЗА ЛАМИНАТНИХ КОМПОЗИТНИХ ПЛОЧА И ЉУСКИ СА ДЕЛАМИНАЦИЈАМА ПРИМЕНОМ МЕТОДЕ КОНАЧНИХ ЕЛЕМЕНАТА“

"NONLINEAR ANALYSIS OF LAMINATED COMPOSITE PLATES AND SHELLS WITH DELAMINATIONS USING FINITE ELEMENT METHOD"

Процедура стицања научног степена доктора наука спровешће се у складу са Законом о високом образовању ("Сл.гласник РС", бр.76/05,100/07-аутентично тумачење, 97/08 и 44/10 и 93/12), општим актом Универзитета и Правилником о докторским студијама Грађевинског факултета у Београду.

Веће научних области грађевинско - урбанистичких наука Универзитета у Београду, на седници одржаној 25.12.2014. године, дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације.

У току израде докторске дисертације објављено је пет радова у научним часописима са листе која је утврђена као релевантна за вредновање научне компетенције у одређеном научном пољу:

1. Marjanović M, Meschke G, Vuksanović Dj. A finite element model for propagating delamination in laminated composite plates based on the Virtual Crack Closure method. Composite Structures 2016; 150: 8-19.
(ISSN 0263-8223) doi:10.1016/j.compstruct.2016.04.044 (M21, IF2014=3.318)
2. Kolarevic N, Marjanović M, Nefovska-Danilovic M, Petronijevic M. Free vibration analysis of plate assemblies using the dynamis stiffness method based on the higher order shear deformation theory. Journal of Sound and Vibration 2016; 364: 110-132.
(ISSN 0022-460X) doi:10.1016/j.jsv.2015.11.016 (M21, IF2014=1.813)
3. Marjanović M, Vuksanović Dj. Free vibrations of laminated composite shells using the rotation-free plate elements based on Reddy's layerwise discontinuous displacement model. Composite Structures, in press.
(ISSN 0263-8223) doi:10.1016/j.compstruct.2015.07.125 (M21, IF2014=3.318)
4. Marjanović M, Vuksanović Dj, Meschke G. Geometrically nonlinear transient analysis of delaminated composite and sandwich plates using a layerwise displacement model with contact conditions. Composite Structures 2015; 122: 67-81.
(ISSN 0263-8223) doi:10.1016/j.compstruct.2014.11.028 (M21, IF2013=3.120)

5. Marjanović M, Vuksanović Dj. Layerwise solution of free vibrations and buckling of laminated composite and sandwich plates with embedded delaminations. Composite Structures 2014; 108: 9-20.

(ISSN 0263-8223) doi:10.1016/j.compstruct.2013.09.006 (M21, IF2012=2.231)

Одлука је донета једногласно.

ДЕКАН ГРАЂЕВИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

Проф. др Бранко Божић, дипл.инж.геод.

Доставити:

- Универзитету
- Студентској служби
- архиви
- именованом

ACADEMIC-SCIENTIFIC COMMITTEE

Subject: Report of the doctoral thesis of candidate Miroslav Marjanovic

According to the Decision of the Academic-Scientific Council of the Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade No. 329/9-14 from March 24th 2016, we have been nominated as Committee members for review, evaluation and defense of the doctoral dissertation of candidate Miroslav Marjanovic, titled:

**НЕЛИНЕАРНА АНАЛИЗА ЛАМИНАТНИХ КОМПОЗИТНИХ ПЛОЧА И ЉУСКИ
СА ДЕЛАМИНАЦИЈАМА ПРИМЕНОМ МЕТОДЕ КОНАЧНИХ ЕЛЕМЕНАТА**

Doctoral dissertation is written in English according to the conditions of the international project SEEFORM under which the dissertation has been written. The title of the dissertation in English is:

**NONLINEAR ANALYSIS OF LAMINATED COMPOSITE PLATES AND SHELLS
WITH DELAMINATIONS USING FINITE ELEMENT METHOD**

After the review of the submitted dissertation and other supplementary materials, as well as the interview with the candidate, Committee made the following

R E P O R T

1. INTRODUCTION

1.1 Chronology of approval and working on the thesis

- December 13th 2010 – the candidate enrolled the Doctoral studies at the Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade, Study Program Civil Engineering.
- September 2nd 2014 – during the meeting of Chair of Engineering Mechanics and Theory of Structures the candidate presented the topic of the doctoral dissertation titled "Nonlinear Analysis of Laminated Composite Plates and Shells with Delaminations using Finite Element Method". The Committee nominated by the Chair Council accepted the proposed topic of the dissertation and suggested the candidate to submit the thesis proposal to the Academic-Scientific Council of the Faculty of Civil Engineering.
- September 3rd 2014 – the candidate submitted the proposal of the doctoral dissertation to the Academic-Scientific Council of the Faculty of Civil Engineering in Belgrade.

- September 11th 2014 - Academic-Scientific Council of the Faculty of Civil Engineering in Belgrade nominated the following Committee to validate the candidate and the application of doctoral dissertation: Prof. Dr. Ing. Djordje Vuksanovic, Prof. Dr. Ing. Branislav Pujevic, Prof. Dr.techn. Günther Meschke (Decision No. 329/4 from September 12th 2014).
- December 18th 2014 - Academic-Scientific Council of the Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade, accepted the Report of the Committee for evaluation of the candidate and the doctoral dissertation and sent its decision to the Council of the Civil Engineering and Urbanism of the University of Belgrade for the approval (Decision No. 329/6 from December 18th 2014).
- December 25th 2014 - Council of the Civil Engineering and Urbanism of the University of Belgrade approved the suggested proposal of the doctoral dissertation titled "Nonlinear Analysis of Laminated Composite Plates and Shells with Delaminations using Finite Element Method" (Decision No. 61206-5922/2-14 from December 25th 2014).
- March 14th 2016 – the candidate submitted the final version of the dissertation for the revision and evaluation.
- During the session No. 6 from March 24th 2016 (Decision No. 329/9 from March 25th 2016) Academic-Scientific Council of the Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade, nominated the following Committee for review, evaluation and defense of the doctoral dissertation:
 - o Dr.techn. Günther Meschke, full professor, Ruhr Universität Bochum, Institute for Structural Mechanics,
 - o Dr. Ing. Branislav Pujevic, full professor, Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade,
 - o Dr. Ing. Mira Petronijevic, full professor, Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade,
 - o Dr. Ing. Djordje Ladjinovic, full professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad,
 - o Dr. Ing. Marija Nefovska-Danilovic, assistant professor, Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade.

1.2. Scientific field of the thesis

The dissertation of the candidate Miroslav Marjanovic belongs to the scientific fields of Civil Engineering and Engineering Mechanics and Theory of Structures. Prof. Dr. Djordje Vuksanovic of the Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade, has been nominated as advisor. Prof. Dr.techn. Günther Meschke, full professor at the Ruhr Universität Bochum, has been nominated as co-advisor.

1.3. Biography of the candidate

Miroslav Marjanovic was born on January 8th 1986 in Uzice, where he finished elementary school and Gymnasium, receiving the “Vuk Karadzic” award for the best student, in both elementary and high school. He enrolled the B.Sc. Study program Civil Engineering at the Faculty of Civil Engineering in Belgrade in 2005, and graduated in 2009 within the Module Structures, with average grade 9.56/10. The candidate enrolled the M.Sc. Study program Civil Engineering, Module Structures, at the Faculty of Civil Engineering in Belgrade in 2009, and graduated in 2010, with an average grade 9.71/10. For his excellent results he won the Award of the Chair of Engineering Mechanics and Theory of Structures (Professor Dusan Krajcinovic Foundation) in 2008. He received the Prize of the Regional Chamber of Commerce Uzice for the best student in 2008. The candidate received several scholarships for his outstanding achievements during regular studies, and was continuously praised by the Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade, for his extraordinary success. During the B.Sc. studies Miroslav Marjanovic was working as a student-demonstrator in the subjects Informatics 1 and Theory of Structures.

The candidate enrolled in the PhD Study program at the Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade, in 2010. He passed all exams from the curriculum with average grade 10/10. In 2014 the University of Belgrade accepted the proposal of his doctoral dissertation titled "Nonlinear analysis of laminated composite plates and shells with delaminations using finite element method", under the supervision of Prof. Dr. Ing. Djordje Vuksanovic and co-supervised of Prof. Dr. Ing. Günther Meschke, Ruhr-Universität Bochum.

During his undergraduate studies the candidate participated two times in summer schools "Vibrations of Structures due to Rail-Road Traffic" organized by the Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade, and the Technical University, Munich. During the completion of his M.Sc. thesis he participated in the International Summer School "Model Validation and Simulation" at Bauhaus Universität Weimar in 2010. In December 2011 he participated in the workshop "Scientific Presentation" at Ruhr-Universität Bochum.

Since December 2010 he has been employed at the Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade, as Teaching Assistant-PhD Student for the research field Engineering Mechanics and Theory of Structures. He has been taking the exercises in the subjects Theory of Structures, Matrix Structural Analysis and Application of Computer Programs in Design of Structures, at Module Structures. He has been also working tutorials with students in other subjects of this Chair.

Since 2011 the candidate has been a scholar of the international program SEEFORM (South Eastern European Graduate School for Master and Ph.D. Formation in Engineering), financed by DAAD, Germany. In the frame of the SEEFORM project, in the last four years, he spent 7 months of research stays at Ruhr-Universität Bochum (Institute for Structural Mechanics), under the supervision of Prof. Dr.techn. Günther Meschke. He also participated in Lecture seminars for PhD students in Serbia and abroad and in seminars for PhD students organized by the RUB Research School of Ruhr-Universität Bochum.

Miroslav Marjanovic has been participating as a researcher in a project of the Ministry for Education, Science and Technological Development of the Government of Serbia, No. TR 36048, since 2011. In 2014, the candidate passed the professional exam for structural engineers. He is a member of the Association of Structural Engineers of Serbia, Serbian Society of Mechanics and a reviewer for the International Journal of Mechanical Sciences and Science and Engineering of Composite Materials.

2. DESCRIPTION OF THESIS

2.1. Content of the thesis

The doctoral dissertation "Nonlinear analysis of laminated composite plates and shells with delaminations using finite element method" is written in English. It contains 251 pages and includes 80 figures and 27 tables. It is divided into 12 chapters: 1) Introduction; 2) Review of Previous Research; 3) Generalized Laminated Plate Theory; 4) Analytical Solution for Linear Transient Analysis of Intact Plates; 5) Finite Element Model; 6) Contact Algorithm; 7) Delamination Propagation; 8) Analysis of Laminated Composite Shells; 9) Object-Oriented Computer Program; 10) Numerical Examples; 11) Conclusions; 12) Future Work. The Bibliography includes 157 references which present in detail the state-of-the art in the numerical analysis of laminated composite plates and shells with delaminations.

2.2. Brief overview of the chapters

In the Introduction, the main terms of the theory of laminated composite structures have been defined and the need for the derivation of the accurate numerical model for the analysis of laminated composite and sandwich plates with delamination (debonding of the adjacent layers) has been highlighted. The influence

of delamination, the reduction of the stiffness in static loading and the change of the frequency characteristics of the structural element of the laminated composite or sandwich plate in dynamic loading is discussed. The deteriorating effects of delamination were the main motivation to develop a numerical model capable to consider damaged laminated composite or sandwich plates in dynamic loading environments.

In the second part of the first Chapter, the background of the finite element model is described, which is based upon the Generalized Laminated Plate Theory. Geometrical nonlinearity is taken into account according to the von Karman's assumptions. The numerical model proposed by Reddy (*J. N. Reddy. Mechanics of laminated composite plates: theory and analysis. CRC Press, 1997*), and further improved by Barbero (*E. J. Barbero, J. N. Reddy. Modeling of Delamination in Composite Laminates using a Layer-Wise Plate Theory. International Journal of Solids and Structures 1991, 28(3), 373-388*), served as a basis for the derivation of the numerical model presented in the dissertation.

The proposed numerical model realistically includes the kinematics of delaminated plate and considers delamination propagation in its own plane under dynamic loading, as well as the impenetrability conditions between adjacent layers in the delaminated zone.

In the second Chapter, a review of research in the field of the theory of laminated composite structures, relevant for the doctoral dissertation, is presented. At the beginning, some limitations of the equivalent single layer (ESL) plate theories are highlighted, as well as the need for the application of the layerwise plate theory for the accurate description of the kinematics of delaminated composite plates. The chronological review of plate theories is presented, followed by the most important references. The corresponding numerical solutions of the ESL plate theories, based on the finite element method, are discussed.

After the review of the literature, the candidate concludes that an improvement of the numerical models of laminated composite shells using layerwise plate theories is possible. Since the existing models generally consider undamaged shells, the candidate develops a new model to extend the developed plate model to the analysis of laminated composite shells with delamination. In the final part of the second chapter the candidate highlights some advantages of the application of the object-oriented computer programs in the numerical analysis of structures using the finite element method, especially in the case of very complex models with large number of degrees of freedom. The chronological review of the most important object-oriented softwares and their structures is presented. It served as the basis of the program developed by the candidate in the dissertation.

In the third Chapter the Generalized Laminated Plate Theory of Reddy is presented: assumptions and restrictions, kinematic relations, constitutive relations of a single layer and of a laminated plate. The derivation of the equations of motion using the principle of virtual displacements is given in detail. The "strong" formulation of the nonlinear dynamic problem is derived, as well as the specification of the general problem to certain cases, including geometrically nonlinear problems, linear bending and linear buckling problem, free vibrations analysis, geometrically nonlinear and linear transient analysis.

In the fourth Chapter the analytical solution of the Generalized Laminated Plate Theory under dynamic loading for a rectangular, simply-supported cross-ply laminated composite plate is presented. Linear response of the structure is considered. The system of partial differential equations is reduced to a set of ordinary differential equations in time using Newmark's method. The structural response (displacements, velocities and accelerations) are obtained using Navier solution. The stresses distribution through the thickness of the laminate as well as the stress time histories are calculated.

In the fifth Chapter the numerical solution of the Generalized Laminated Plate Theory using FEM is presented and the "weak" formulation of the nonlinear problem is derived. The derivation of the stiffness matrix, the geometrical stiffness matrix, the consistent mass matrix and the force vector of the layered finite element, with delamination is presented. The delamination kinematics is described using the additional nodal degrees of freedom for the relative displacements between the adjacent layers in the

delaminated zone of the plate. Using the proposed approach, the isoparametric quadrilateral layered finite element with 4 or 9 layers is described. The shear locking problem, which may occur in the analysis of very thin plates, is discussed and different types of numerical integration used to eliminate the shear locking phenomenon are described. After that, the assembly procedure used in the FE analysis, the assignment of displacement boundary conditions and the algorithm for the solution of system of equations for static (*time independent*) and dynamic (*time dependent*) problems is presented. Special attention has been devoted to the description of the solution procedure for geometrically nonlinear dynamic analyses of laminated composite plates.

In the sixth Chapter, a contact algorithm, which was implemented in the numerical model to eliminate the interlaminar penetration of adjacent layers in the delaminated zone, is described in detail. Using a very simple example and formalism known from Matrix Structural Analysis, the algorithm is applied to eliminate the displacement components W^I (*crack opening displacement*). A graphical illustration of the algorithm used in the object-oriented computer program helps in understanding the implementation of this model component.

In the seventh Chapter, a central topic of the thesis is addressed: the method for tracking the moving delamination front under static and dynamic loadings. The presented algorithm is an extension of the procedure by Xie and Biggers (*D. Xie, S. B. Biggers. Strain energy release rate calculation for a moving delamination front of arbitrary shape based on the virtual crack closure technique. Part I: Formulation and validation. Engineering Fracture Mechanics 2006, 73, 771-785*), which, however, was restricted to structural finite element meshes. The algorithm is based upon the Virtual Crack Closing Technique. The presented procedure is based on the calculation of the delamination openings behind the delamination front, the nodal forces along the delamination front and the virtually closed delamination area in front of the existing delamination.

An important aspect of the presented algorithm is the calculation of the vector of the directions of the delamination propagation. The components of this vector are calculated on the basis of the status of the adjacent nodes in the finite element mesh, which allows using arbitrary unstructured meshes, while many existing models in the literature are restricted to structured finite element meshes. The virtually closed area of the delamination is derived after the calculation of the coordinates of six control points for every node in the finite element mesh along the delamination front. After the calculation of all previously described quantities, a criterion for prediction of delamination growth is applied.

The eighth Chapter describes the extension of the presented layered plate finite element to the analysis of laminated composite shells, with and without considering delamination. Isoparametric triangular layered finite elements with 3 or 6 nodes are employed. The transformation of the nodal displacement components from the local coordinate system (single element plane) to global coordinates (3D Cartesian space), based on vector algebra, are presented, and the respective transformation matrices of the layered triangular finite element are formulated. Numerical integration used to derive element stiffness and mass matrices is described. Finally, some limitations of the presented approach are critically discussed, and recommendations are given to overcome possible numerical instabilities of the model.

Chapter nine describes the object-oriented computer program implemented in Matlab by the candidate within this dissertation. The GiD Pre/Post Processor developed at CIMNE, Barcelona, has been used for the visualization of the input data and the results. In this chapter, the application of GiD for the model is explained. The candidate describes the procedures and functions written to couple the GiD software with the Matlab solver. After that, the procedure for creating the mesh for the post-processing visualization of results is explained. The post-processing mesh differs from the pre-processing mesh due to the specifics of the proposed model. In the second part of this chapter the computer program written in Matlab is described. The developed classes have been divided in four groups: *modeling classes*, *finite element model classes*, *analysis classes* and *numerical classes and functions* with a respective chart provided in the thesis.

The tenth Chapter of the dissertation includes a number of numerical examples to demonstrate the performance of the developed model. Linear and nonlinear bending of plates, free vibrations, buckling, linear and geometrically nonlinear transient analysis of plates and free vibrations of laminated composite shells are considered. The main focus in all examples is laid on the influence of the delamination (its size and position within a plate) on the static and dynamic response of the structural component.

Using the numerical model, the following numerical examples have been analyzed:

1. Free vibrations of simply-supported laminated composite plate using higher-order plate theories,
2. Free vibrations of simply-supported laminated composite plate with initial delamination,
3. Derivation of the critical buckling loading of a simply-supported laminated composite plate,
4. Derivation of the critical buckling loading of simply-supported laminated composite plate with initial delamination,
5. Linear and geometrically nonlinear transient analysis of simply-supported laminated composite plate considering the influence of transverse shear deformation and number of layers,
6. Linear and geometrically nonlinear transient analysis of a simply-supported laminated composite plate with initial delamination considering different delamination position,
7. Linear transient analysis of a laminated composite plate considering delamination propagation,
8. Free vibrations of laminated composite cylindrical shell considering different boundary conditions,
9. Free vibrations of a laminated composite conical shell considering different boundary conditions,
10. Free vibrations of a laminated composite cylindrical and spherical panel considering different boundary conditions,
11. Free vibrations of laminated composite cylindrical shell with an initial delamination.

In the majority of examples, a careful parametric analysis of the influence of the number of layers, boundary conditions and mesh density on the solution have been performed. The proposed methodology and the developed computer program have been verified by comparing the obtained solutions with existing analytical, numerical and experimental examples from the literature, as well as with solutions obtained using the commercial software ABAQUS. Also, short conclusions have been provided after each example.

At the end of the dissertation, in the eleventh chapter, the findings and conclusions of the thesis are discussed in great detail. The last Chapter contains a number of recommendations for future work to further enhance the analysis capabilities of computational models for delaminated plates and shells.

3. ASSESMENT OF THESIS

3.1. Contemporariness and originality

The Doctoral dissertation titled "Nonlinear Analysis of Laminated Composite Plates and Shells with Delaminations using Finite Element Method" represents original scientific work in the field of computational mechanics of composite structures considering propagating delamination. Starting from the Reddy's Generalized Layerwise Plate Theory and the Virtual Crack Closing Technique, the numerical model based on the finite element method, for static and dynamic geometrically nonlinear analysis of laminated composite plates and shells with an embedded delaminated zone, has been successfully extended to the analysis of delamination propagation between (multiple) layers of composite plates. It is emphasized, that in addition to using a realistic shell kinematics of delaminated plates, also the contact conditions between interfaces of delaminated layers are considered. Also, a very effective pre- and post-processing algorithm has been developed, which allows an excellent visualization of the numerical results. All necessary algorithms have been developed and implemented by Mr. Marjanovic.

The thesis tackles a highly relevant and complex topic in structural mechanics, and provides an elegant and robust solution both for static and dynamic problems.

3.2. Review of the references and used literature

In the doctoral thesis, the candidate considered all relevant literature. He has cited 157 references which are relevant for the topic of the dissertation. The references include the complete range of topics addressed in the thesis, and create an excellent base for future work on the topic of the thesis. The candidate has referred to existing literature in his work properly.

3.3. Description and adequacy of applied scientific methods

In a frame of this dissertation the candidate applied adequate scientific methods as well as contemporary numerical techniques for solving a truly challenging problem in structural analysis – the geometrically nonlinear numerical analysis of delamination propagation in composite plates and shells. Some of the applied scientific methods are summarized below:

- Finite Element Method (FEM)
- Geometrically nonlinear analysis of laminated composite plates using FEM
- The Generalized Laminated Plate Theory
- Vector algebra
- Solution methods for nonlinear equations
 - Newton-Raphson method,
 - Picard method,
- Newmark's integration method for the solution of discretized dynamic equations of the system
- Fracture Mechanics, the Virtual Crack Closing Technique and the derivation of Energy Release Rates
- Methods of object-oriented programming in MATLAB

The candidate established properly the variational formulation and the spatial discretization of plates and shells considering the multilayer kinematics within the The Generalized Laminated Plate Theory. The major scientific contribution of the thesis is the extension of this model for the solution of delaminated structures, and, in particular, describing the delamination propagation using general (unstructured) meshed. The delamination problem has been considered using Linear Elastic Fracture Mechanics in the framework of the Virtual Crack Closing Technique, which proved to be a robust technique for this type of problems. A particular contribution of the thesis is the proper consideration of contact conditions in static as well as dynamic analyses. For the solution of the governing equations the candidate used modern numerical methods and object-oriented programming. The candidate adequately combined complex theoretical and numerical up-to-date methods to reach the goals proposed in the dissertation.

3.4. Applicability of the achieved results

The finite element model developed for the static and dynamic delamination analysis of laminated composite plates and shells by the candidate has a significant relevance for practical application. Potential engineering applications include fiber reinforced ceramics and cementations materials and composite sandwich panels, where the presence of delamination between the core and the faces of the plate can lead to the progressive collapse of the structure under dynamic loading. Consideration of dynamic loading is of substantial relevance for the analysis of the integrity of composite structures in civil as well as in mechanical engineering, where wind loading or other dynamic loadings may considerably reduce the load carrying capacity.

3.5. Evaluation of competencies of the candidate to perform independent scientific research

The candidate gained substantial independence in scientific research in the process of his Ph.D. research, and during the courses he took at the Faculty, his activities in the SEEFORM program, his study visits at prestigious European Universities, and, not least, by publishing four papers in high level, peer reviewed international scientific journals in addition to a large number of papers in national journals and international conferences. His publication record is rated as excellent and is much beyond the average level of Ph.D. students at comparable Universities. Through this work candidate also showed the ability for a critical analysis of the scientific literature, the ability to develop and propose original solutions that lead to better results as compared to existing ones. To conclude, there is no doubt, that the candidate has confirmed his scientific maturity and an exceptional research potential.

4. ACHIEVED SCIENTIFIC CONTRIBUTION

4.1. Review of achieved scientific contributions

The main scientific contributions of the dissertation are:

1. Development of enriched isoparametric layered finite plate elements (with 4 or 9 nodes) based on the discontinuous displacement field, in the geometrically nonlinear static and dynamic analysis,
2. Development of isoparametric triangular layered finite shell element with delamination, as well as the transformation matrices for the simulation of a 3D shell structure using 2D elements,
3. Proposal of a new node-to-node method for tracking a moving delamination front in unstructured meshes of quadrilateral finite elements,
4. Proposal of a frictionless node-to-node contact algorithm for the elimination of interlaminar penetration of adjacent layers in delaminated zone,
5. Coupling of the previously described algorithms in a numerical model of the layered finite element, for the simulation of a 3D problem using 2D finite elements,
6. Development of a computer program for numerical linear and geometrically nonlinear static and dynamic analysis of laminated composite plates and shells based on Generalized Laminated Plate Theory, with or without the delamination, using finite element method,
7. Development of the graphical user interface for the generation of numerical models and the visualization of the obtained results.

4.2. Critical analysis of the research results

The candidate has developed a numerical model for the static and dynamic analysis of laminated composite plates and shells using layered finite elements, which not only considers delaminated zones, but also is able to follow arbitrary delamination propagation using generalized, unstructured meshes. As the model also includes possible contact in case of crack closure, the work contains a substantial advancement as compared to the state of the art. The results obtained in the thesis have been very well received by the international community, since no less than four papers containing components of the model have been published in top ranked international scientific journals. The relevance for engineering practice is huge, as the model allows analyzing composite structures with arbitrary configurations of anisotropically oriented fiber layers under complex static and dynamic loadings. A main contribution of the thesis also is the analysis of the influence of delamination on the dynamic response of composite plates. It should be emphasized, that the developed numerical model is very robust, which is a key factor for practical applications.

The obtained results represent an excellent basis for further research, which may include nonlinear material behavior as well as criteria for delamination initiation. Also, consideration of multi-physics processes, such as thermo-mechanical or mechanical-electrical couplings may be subjects of future extensions.

4.3. Verification of contributions to the scientific literature

During his research the candidate published the following papers in the field of the PhD topic:

Category M21:

1. Kolarevic N, **Marjanović M**, Nefovska-Danilovic M, Petronijevic M (2016): Free vibration analysis of plate assemblies using the dynamis stiffness method based on the higher order shear deformation theory. Journal of Sound and Vibration, Vol. 364, pp.110-132 (IF=1.813, ISSN 0022-460X)
2. **Marjanović M**, Vuksanović Dj (2016): Free vibrations of laminated composite shells using the rotation-free plate elements based on Reddy's layerwise discontinuous displacement model. Composite Structures, in press. doi: 10.1016/j.compstruct.2015.07.125 (IF=3.318, ISSN 0263-8223)
3. **Marjanović M**, Vuksanović Dj, Meschke G (2015): Geometrically nonlinear transient analysis of delaminated composite and sandwich plates using a layerwise displacement model with contact conditions, Composite Structures, Vol. 122, pp.67-81 (IF=3.318, ISSN 0263-8223)
4. **Marjanović M**, Vuksanović Dj (2014): Layerwise solution of free vibrations and buckling of laminated composite and sandwich plates with embedded delaminations. Composite Structures, Vol. 108, pp. 9-20 (IF=2.231, ISSN 0263-8223)

Category M24:

1. Vuksanović Dj, **Marjanović M** (2015): Application of layered finite elements in the numerical analysis of laminated composite and sandwich structures with delaminations. Building Materials and Structures, Vol. 58, pp.59-76. (ISSN 0543-0798)

Category M33:

1. Vuksanović Dj, **Marjanović M**, Kovačević D: Finite element modeling of free vibration problem of delaminated composite plates using Abaqus CAE. 6th International Conference Civil Engineering – Science and Practice, Žabljak, 2016, Montenegro.
2. **Marjanović M**, Vuksanović Dj: Transient analysis of laminated composite and sandwich plates with embedded delaminations using GLPT. 9th International Conference on Structural Dynamics EURO DYN 2014. Porto, Portugal, pp.3373-3380.
3. Vuksanović Dj, **Marjanović M**: Free vibrations of delaminated composite and sandwich plates. 5th International Conference Civil Engineering – Science and Practice, Žabljak, 2014, Montenegro, pp.363-370.
4. **Marjanović M**, Vuksanović Dj: Linear Analysis of Single Delamination in Laminated Composite Plate using Layerwise Plate Theory. 4th International Congress of Serbian Society of Mechanics. Vrnjačka Banja, 2013, Serbia, pp.443-448
5. **Marjanović M**, Vuksanović Dj: Linear Transient Analysis of Laminated Composite Plates using GLPT. First international conference for PhD students in Civil Engineering, Cluj-Napoca, 2012, Romania, pp.169-176

6. **Marjanović M**, Vuksanović Dj: Transient Response of Cross-Ply Laminated Composite Plates. International Symposium for Students of Doctoral Studies in the fields of Civil Engineering, Architecture and Environmental Protection, Niš, 2012, Serbia, pp.345-352

Category M52:

1. **Marjanović M**, Vuksanović Dj (2014): Geometrically nonlinear transient analysis of delaminated composite plates. Зборник радова Грађевинског факултета Суботица, (Конференција "Савремена достигнућа у грађевинарству" 2014.), Vol. 25, pp.465-471

International Journals without IF

1. **Marjanović M**, Vuksanović Dj (2013). Linear Transient Analysis of Laminated Composite Plates using GLPT. Acta Technica Napocensis: Civil Engineering & Architecture, Vol. 56, No. 2, pp.58-71

5. CONCLUSION AND PROPOSAL

According to the previous exposed facts of the submitted doctoral dissertation, and evaluation in regards to fulfillment of the tasks and the goals of research, applied methodology, scientific contribution and obtained results, we conclude, that the doctoral dissertation titled **NONLINEAR ANALYSIS OF LAMINATED COMPOSITE PLATES AND SHELLS WITH DELAMINATIONS USING FINITE ELEMENT METHOD** represents a significant and original scientific contribution and proves that the candidate **Miroslav Marjanovic** is capable to perform independent scientific research. The excellent quality of the work is corroborated by the fact, that the results have been extremely well received by the international community. With four publications in top ranked, peer reviewed international scientific journals, and additional nine publications in international journals and conference proceedings, the scientific output of Mr. Miroslav Marjanovic is rated as extraordinary.

In conclusion, the Committee suggests to the Academic-Scientific Council of the Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade, to accept the doctoral dissertation of Miroslav Marjanovic, M.Sc., B.Sc. Civil Eng., entitled **NONLINEAR ANALYSIS OF LAMINATED COMPOSITE PLATES AND SHELLS WITH DELAMINATIONS USING FINITE ELEMENT METHOD** and approve it for public defense.

COMMITTEE MEMBERS



Dr. techn. Günther Meschke, full professor
Ruhr Universität Bochum, Institute for Structural Mechanics

Dr. Ing. Branislav Pujevic, full professor
University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering

Dr. Ing. Mira Petronijevic, full professor
University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering

Dr. Ing. Djordje Ladjinovic, full professor
University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences

Dr. Ing. Marija Nefovska-Danilovic, assistant professor
University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering