



УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ
Број 01-1/2560
18. 07. 2011. године
Крагујевац

На основу чланова 94 и 178 Статута Машинског факултета у Крагујевцу, Декан Машинског факултета у Крагујевцу, донело је

ОДЛУКУ

I Ставља се на увид јавности извештај Комисије за оцену писаног дела докторске дисертације кандидата мр **Гордане Богдановић**, дипл. маш. инж.

II Извештај се ставља на увид јавности на сајту Универзитета у Крагујевцу на интернет адреси: <http://www.kg.ac.yu/>

III Ову одлуку и извештај комисије бр. 01-1/2559 од 18.07.2011. године доставити Универзитету у Крагујевцу

Достављено:

- Универзитету у Крагујевцу
- Архиви Факултета

ДЕКАН МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА



Др Мирослав Бабић, редовни професор

М.С.



НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Извештај комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата мр Гордане Богдановић, дипл. маш. инж.

Одлуком Наставно-научног већа Машинског факултета у Крагујевцу бр. 01-1/2396-9 од 7.07.2011. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата мр Гордане Богдановић, дипл. маш. инж. под насловом

„ДИНАМИЧКО ПОНАШАЊЕ КОМПОЗИТНИХ ЛАМИНАТА“

На основу увида у приложену докторску дисертацију и Извештаја о подобности кандидата и теме докторске дисертације која је одобрена за израду Одлуком Машинског факултета у Крагујевцу 01-1/2051 од 28.08.2008. године, а на основу Правилника о пријави, изради и одбрани докторске дисертације Универзитета у Крагујевцу, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Значај и допринос докторске дисертације са становишта актуелног стања у одређеној научној области

Докторска дисертација кандидата мр Гордане Богдановић „Динамичко понашање композитних ламината“ представља резултат научно истраживачког рада кандидата у области која се односи на проучавање таласа у анизотропним срединама, чији је један од представника композитни материјал – влакнима ојачани материјал, код кога се комбинују особине два или више материјала ради добијања материјала са новим карактеристикама, при чему се задржавају индивидуалне карактеристике конституената. Анизотропија значи да материјал има различите механичке особине у различитим правцима. Зато се најчешће велика пажња посвећује изучавању механичког понашања ових материјала. Мале промене привилегованих праваца имају битан утицај на напонско и деформационо поље влакнима ојачаних слојева.

Кандидат је извршио критичку анализу и систематизацију научних резултата презентираним у релевантним часописима, а који се односе на област истраживања ове докторске дисертације. При томе кандидат је дошао до оригиналних резултата везаних за простирање таласа у бесконачној средини, која је репрезентована моделима материјала ојачаних једном или двама фамилијама влакана.

Да би до тих резултата дошао кандидат је направио свеобухватну анализу кристалних симетрија која представља много ширу класу материјала од оне чије је динамичко понашање требало проучити. Такође је приказано како се третирају ламинатне структуре било у статичкој или динамичкој анализи.

У овој дисертацији је сваки влакнима ојачани слој представљен као хомогени, трансверзално изотропни медијум. Пошто је механички одговор јако зависан од праваца влакана, формулисане су конститутивне једначине код којих су привилеговани правци експлицитно показани у свакој тачки композита. Дакле у оваквој формулацији конститутивна једначина је независна од избора координатних оса.

Овако формулисане конститутивне једначине су биле употребљене за постављање динамичких једначина, из којих је произашла дефиниција компонената акустичког тензора као услова пропагације раванских таласа у таквој средини. Када су уведени контурни услови за пропагацију таласа у танком слоју добијене су дисперзионе релације које представљају зависност фазне брзине од таласног броја, што је, са друге стране, дало могућност потпуног описивања поља померања као и напонског поља по дебљини слоја. Проучавање једног слоја је послужило као подлога за динамичко проучавање ламинатне плоче, чије механичко понашање зависи како од оријентације привилегованих праваца у појединим слојевима, тако и од међусобних интеракција између слојева.

Допринос кандидата у горњој анализи је третирање анизотропије, која у математичком изражавању није зависна од изабраног координатног система, што је омогућило лако повезивање тако добијених конститутивних релација са кристалним класама у различитим областима физике, које имају сличан карактер.

2. Оцена да је урађена докторска дисертација резултат оригиналног научног рада кандидата у одговарајућој области

Комисија сматра да је докторска дисертација кандидата мр Гордане Богдановић „Динамичко понашање композитних ламината“ резултат оригиналног научног рада, при чему посебно треба истаћи следеће

- Са макроскопског становишта је у потпуности изанализиран материјал који има трансверзално изотропну симетрију. Уведена је претпоставка да је степен анизотропије веома велики, што је у сагласности са циљевима који су постављени у овој дисертацији, што је најбољи опис композитног материјала ојачаног једном фамилијом влакана. Ови композити се технолошки израђују са влакнима веома великих модула што у граничном случају води до модела идеалног влакнима ојачаног материјала код кога су влакна неекстензибилна.
- Размера влакнима ојачаног слоја има одговарајући баланс између микро детаља и макро понашања материјала у динамичким условима. Пропагација еластичних таласа је проучена са аспекта макроскопских разматрања механике континуума. Начин на који је материјал описан је омогућио да се променом одређених материјалних константи повећава или смањује степен анизотропије материјала, што је довело до оригиналних закључака о утицају степена анизотропије на свеобухватно понашање материјала.
- Описани модел је омогућио проучавање ламината, који се технолошки добијају спајањем слојева ојачаних једном фамилијом влакана за различите секвенце

слагања. Када се слагање изврши тако да постоје два привилегована правца долази се до материјала ојачаног двама фамилијама влакана. У дисертацији је узето да две фамилије влакана буду механички еквивалентне да се не препознају ни по чему другом сем по правцима влакана. То је довело до модела ортотропног материјала, поново описаног без математичке зависности од координатног система. Дакле, кандидат је разматрао динамичко понашање ортотропног материјала, при чему су све време правци влакана били препознатљиви.

- Кандидат је дао свеобухватну анализу квазилонгитудиналних и квазитрансверзалних запреминских таласа помоћу површи спорости за различите правце пропагације таласа и различите правце ојачања. За правце у којима није могло да се напише аналитичко решење у затвореном облику, кандидат је извршио нумеричку анализу и извео опште закључке о пропагацији таласа у таквим срединама.

3. Преглед остварених резултата кандидата у одређеној научној области

Кандидат, мр Гордана Богдановић, дипл. инж. је уписала Машински факултет у Крагујевцу школске 1981/82 године и дипломирала маја 1986. године са просечном оценом 9,53. У току студија је сваке године била награђивана као најбољи студент генерације и била стипендиста САНУ и Универзитета.

Последипломске студије уписала је на Машинском факултету у Крагујевцу и положила испите са просечном оценом 9.70, а 21. 04. 1995. год. одбранила магистарску тезу под насловом "Истраживање динамичких понашања зупчастог преносника" под менторством проф. др Вере Николић.

У звање асистента приправника изабрана је 2. 02. 1987. године. У звање асистента изабрана је 15.02. 1996. године за исте предмете.

У току свог рада на Факултету изводила је вежбе из предмета за које је бирања и учествовала у свим другим облицима наставе: колоквијуми, испити и др.

Појављује се као аутор и коаутор већег броја радова из области Механике композитних материјала, од којих је за овај извештај релевантан:

1. Milosavljević, D., Bogdanović G., Veljović, LJ., Radaković, A., Lazić, M., *Failure criteria of fibre reinforced composites in homogenous temperature field*, International Journal Thermal Science, Vol. 14 suppl. pp. 285-297, ISSN 0354-9836, UDC: 621, 2010 (M23)

при чему треба издвојити и друге радове који се директно односе на тему дисертације

2. Bogdanović G., Milosavljević D., Živković M.: *On procedure for determination of isotropic tensor function of fourth order*, 25th Yugoslav Congress on Theoretical and Applied Mechanics, Novi sad, 2005. (M63)
3. Milosavljević D., Bogdanović G.: *Applications of Fourth-order Tensors in Computational Mechanics*, First Serbian (26th YU) Congress on Theoretical and Applied Mechanics Kopaonik, Serbia, April 10-13, 2007., pp.527-533, (M63)
4. Bogdanović, G., Milosavljević, D., Bogdanović, Z.: *Isotropic tensor functions of fourth order*, Mobility & Vehicle Mechanics, International Journal for Mechanics, Engines and Transportation Systems, Volume 34, Numbers 1&2, pp. 20-25, ISSN 1450-5304, 2008. (M52)

5. Милосављевић, Д., Богдановић, Г., Вељовић, Љ., Радуловић, Ј., *Ортотропни композит моделиран помоћу две фамилије влакана*, Први национални симпозијум са међународним учешћем – Теоријска и експериментална истраживања конструкција и њихова примена у грађевинарству, Књига 2, стр. 235-243, ISBN 978-86-80295-87-9, Ниш, 2010. (M64)
6. Lazić, V., Milosavljevic, D., Aleksandrović, S., Marinković, P., Bogdanović, G., Nedeljković, B., Mutavdžić, M., *Tribological Investigations of Hard-Faced Layers and Base Materials of Forging Dies with Different Kinds of Lubricants Applied*, Tribology in industry, Volume 32, No. 4, pp. 36-44., ISSN 0351-1642, 2010. (M51)
7. Lazić, V., Milosavljevic, D., Aleksandrović, S., Marinković, P., Bogdanović, G., Nedeljković, B., *Carbide Type Influence on Tribological Properties of Hard Faced Steel Layers-Part I-Theoretical Considerations*, Tribology in industry, Volume 32, No. 2, pp. 11-20., ISSN 0351-1642, 2010. (M51)
8. Lazić, V., Milosavljevic, D., Aleksandrović, S., Marinković, P., Bogdanović, G., Nedeljković, B., *Carbide Type Influence on Tribological Properties of Hard Faced Steel Layers-Part II – Experimental Results*, Tribology in industry, Volume 32, No. 3, pp. 1-12., ISSN 0351-1642, 2010. (M51)

4. Оцена о испуњености обима и квалитета у односу на пријављену тему

Докторска дисертација кандидата мр Гордане Богдановић под насловом „Динамичко понашање композитних ламината“ одговара по обиму и садржају прихваћеној теми од стране Наставно-научног већа Машинског факултета у Крагујевцу. По квалитету, обиму и резултатима истраживања у потпуности задовољава све научне, стручне и законске услове који су прописани за израду докторске дисертације.

Обрађена материја и резултати, у оквиру ове докторске дисертације, изложени су у укупно седам поглавља

1. Уводна разматрања
2. Примена операција са тензорима другог и четвртог реда на конститутивне релације анизотропних материјала
3. Извођење тангентног модула анизотропних материјала са посебним освртом на влакнима ојачане материјале
4. Анализа ламинатних структура
5. Акустички тензор и пропација еластичних таласа у анизотропним материјалима
6. Динамика ламинатних структура
7. Закључна разматрања

Дисертација је изложена на 140 страна и садржи 52 слике. Кандидат је користио референтну како домаћу, тако и страну литературу и укупно је цитирано 58 библиографских јединица.

У првом поглављу је дат преглед литературе која је проучена и била релевантна за област ове докторске дисертације. Такође су дата уводна разматрања, са предметом и циљем истраживања и структуром рада.

У другом поглављу су дате основне операције са тензорима као математичким представама физичких величина. Приказане су основне операције са тензорима првог, другог и четвртог

реда. Тако су створени предуслови за формирање конститутивних једначина које следи у наредним поглављима.

У трећем поглављу су дате основе о влакнима ојачаним материјалима. Такође је у циљу постављања једначина кретања дефинисан тензор градијента деформације као и тензор деформације. Даље је дефинисана функција енергије деформације за анизотропни материјал у циљу постављања конститутивних релација у нелинеарној еластичности. Постављене су и линеаризоване једначине кретања и равнотеже еластичног материјала подвргнутог малим релативним деформацијама. Као и код нелинеарне еластичности и овде је проучен композитни материјал који има један или два привилегована правца. Усвојена је најопштија квадратна функција енергије деформације и успостављена је зависност компонената тензора еластичности од жељеног правца. Дате су компоненте тензора еластичности за различите правце влакана, што је касније послужило за формирање акустичког тензора.

У четвртом поглављу посматран је ламинат као скуп ламина наслаганих да се постигне жељена крутост и чврстоћа. Овај приступ подразумева одређивање вредности компоненти тензора напона и деформације у слојевима, на основу којих се одређују вредности сила и момената за читав ламинат. Проучена је класична теорија ламинатних плоча, као и теорија првог реда код које се померања претпостављају у облику полинома првог реда у функцији дебљине плоче.

У петом поглављу је анализирано простирање таласа у анизотропним еластичним материјалима. Показано је да, ако се проучавају мале деформације, систем парцијалних диференцијалних једначина другог реда може да се сведе на систем обичних линеарних диференцијалних једначина. Како се механичко понашање анизотропне средине најбоље види кроз понашање средине при простирању запреминских таласа, овде су проучени таласи који постоје у бесконачним хомогеним телима и простиру се без ограничења. Постављен је акустички тензор, који представља суштински услов пропагације и показано је да овај тензор представља стварно стање деформације, за прописани правац пропагације. Израчунати су елементи овог тензора у општем случају, а затим и његове компоненте за конкретни случај ојачања једном и двама фамилијама влакана, на основу компонената тензора еластичности који је проучен у трећем поглављу. За једноставније случајеве је изведено решење у затвореном аналитичком облику. Како би се успешно приказале тродимензионалне површи спорости, спроведена је нумеричка анализа која садржи све правце пропагације као и фазне брзине и поларизационе векторе који њима одговарају.

У оквиру шестог поглавља је показано да претходно развијена методологија може да се примени, уз одговарајућа ограничења, на композитне плоче које могу да се посматрају као танак слој, код кога су две димензије бесконачне, а једна коначна. Познато је да пропагација еластичних таласа у слојевитим композитима има велику примену нарочито у геофизици при проучавању сеизмичких таласа кроз слојевиту земљину кору, али и у условима недеструктивног испитивања, или када се ламинати технолошки конструишу за специфичне намене. Техника која је највише заступљена у проучавању динамичког понашања ламината је позната као метод трансфер матрице или метод пропагатор матрице, па је то разлог што је и у овом раду употребљен да се илуструје могућност примене развијене методологије на проучавање динамичког понашања ламинатних структура. У овом поглављу је показано да метод пропагатор матрице, може ефикасно да се користи за добијање тачног решења проблема пропагације еластичних таласа у вишеслојним срединама, у којима су слојеви хомогени еластични материјали. Анализа која је овде спроведена је показала на који начин запремински таласи, проучени у претходном поглављу, могу да се успешно примене на проучавање дисперзионих релација плоче направљене од композитног материјала са јасно дефинисаним привилегованим правцима, а такође и на проучавање дисперзионих релација вишеслојних композита – ламината.

Коначно, у седмом поглављу су дата систематизована закључна разматрања и дефинисани су правци даљих истраживања.

5. Научни резултати докторске дисертације

Кандидат мр Гордана Богдановић је, кроз ову докторску дисертацију, извршила систематизацију постојећих теоријских знања и искустава и проучавајући простирање таласа кроз анизотропни медијум применила их успешно на област динамичког понашања композитних материјала.

Реализацијом истраживачког рада на овој дисертацији кандидат долази и до одређених резултата и закључака који имају своје место и значај како у научно теоријском тако и практичном смислу. У најважније научне резултате докторске дисертације спадају:

- Постављање конститутивних релација, које директно зависе од поља вектора који дефинишу привилеговани правац, што даје могућност проучавања понашања материјала независно од координатног система. Ово је омогућило доношења много општијих закључака, који се односе на широку класу проблема.
- Размера проучаваног влакнима ојачаног слоја има одговарајући баланс између микро детаља и макро понашања материјала у динамичким условима. Пропагација еластичних таласа је истраживана макроскопским разматрањем механике континуума.
- Детаљно су проучене компоненте тензора еластичности за ојачања једном или двама фамилијама влакана. Дакле, проучени су тангентни модули, као тензори четвртог реда, који у конститутивној релацији линеарне еластичности повезују тензор напона са тензором деформације.
- У дисертацији су приказани резултати истраживања пропагације запреминских таласа преко дијаграма који представљају криве спорости у сагиталној равни за различите материјале. Приказани су дијаграми који се односе на композитне материјале са једном или двама фамилијама влакана. Такође је проучен и утицај коефицијента, који директно репрезентује јачину влакана, на облик кривих спорости, посебно на квазилонгитудинални талас. Ови резултати су посебно значајни, обзиром да су отворили могућност да се проучавање запреминских таласа, спроведено у овој дисертацији, примени на таласе који се простиру у композитним плочама, што је такође било предмет проучавања у овом раду.
- У дисертацији је показано да за проучавање дисперзионих релација у једноставнијим контурним условима метод пропагатор матрице може ефикасно да се користи за добијање тачног решења проблема пропагације еластичних таласа у вишеслојним срединама, у којима су слојеви хомогени еластични материјали. Указано је на неке интересантне особине пропагатор матрице, које ефикасно могу да се искористе при проучавању динамичког понашања ламинатних структура.

- Изведене конститутивне релације су адаптиране за свеобухватну анализу динамичког понашања плоча и ламината, што је један од основних захтева савремене техничке праксе како у машинству тако и у грађевинарству.
- Проучавање динамичког понашања са конститутивним релацијама, независним од избора координатног система, је омогућило да се одређени таласни феномени директно вежу за привилеговане правце, што је омогућило даље проширење истраживања нарочито у граничном процесу у коме влакна постају неекстензибилна. То је довело до релативно једноставног математичког апарата, који може да допринесе брзом сагледавању таласних феномена, као првој апроксимацији реалних конструкција са јако анизотропним влакнима.

6. Применљивост и корисност резултата у теорији и пракси

Увођење нових материјала у инжењерску праксу, захтева јасну стратегију како у дизајнирању особина нових материјала тако и у откривању нових поља примене. Развој влакнима ојачаних композита за инжењерске апликације суочен је са недостатком релевантних информација како технолошког тако и теоријског карактера. Чак и у случајевима када се дође до информација о технолошким решењима у њима се увек осећа недостатак оних детаља који су везани за технолошка искуства. Ипак, прављење математичког модела понашања материјала и његова анализа може да укаже на правце у којима би технолошке иновације могле да нађу своје место.

Познавање динамичког понашања нових материјала указује на путеве којима треба дизајнирати материјал, да би се оптимално понашао у задатим условима. Према томе, диктирање жељених особина материјала није могуће без претходне анализе њиховог механичког понашања када су подвргнути различитим условима у експлоатацији.

Резултати ове докторске дисертације могу дати посебан допринос при планирању лабораторијских испитивања усмерених на одређивање материјалних константи, које су врло значајне за комплетан опис материјала.

Методе динамичког проучавања материјала имају великог значаја у техникама недеструктивног испитивања како активног тако и пасивног типа. Ове методе омогућавају да се предвиди понашање материјала и обезбеди механички одговор сагласан очекивању. Познато је да кроз недисперзивне материјале може да се уочи пропација пулса без промене. Како је мало чисто недисперзивних материјала, степен расипања може да се уочи проучавањем разлике између фазне брзине и групне брзине. Постављене дисперзионе релације у овој дисертацији могу лако бити искоришћене, нарочито при ултразвучном испитивању дефеката дизајнираног влакнима ојачаног композита.

Правећи ламинат од слојева правилно изабраних једнодирекционих композита, одговарајуће оријентисаних и спојених у слојне групе, конструктор може да моделира анизотропију и да диктира правце са којима се остварује оптимално постизање циља. Техника ламинирања омогућује израду композита различитих геометријских облика али се најчешће користи за израду плоча и љуски. Знати оптималне правце, дуж којих треба поставити влакна, најчешће није и коначно решење проблема. Потребно је познавање и технологије и технике производње композитних материјала. Да би се то успешно остварило неопходно је вршити претходне прорачуне, као што је то демонстрирано у овој дисертацији, у циљу постизања оптималног дизајна ламинатне структуре. Ефикасност при избору ламинатних параметара је неопходна будући да модули ламината представљају улазне параметре у прорачун напонско деформационог стања и стабилности ламинатне конфигурације.

Може се закључити да је рад на изради ове докторске дисертације донео читав низ корисних закључака везано за динамичко понашање простијих геометријских структура, направљених од материјала са израженим анизотропним карактеристикама. Широка и директна могућност практичне примене резултата ове докторске дисертације представља њену посебно значајну карактеристику.

7. Начин презентирања резултата у научној јавности

Део резултата ове дисертације је већ публикован и верификован кроз радове у међународним и домаћим научним часописима као и на научним скуповима.

Практични аспекти рада и резултати проучавања материјала са јако израженом анизотропијом представљени су домаћој научној јавности и кроз презентацију резултата пројекта технолошког развоја ТР 23042, као и кроз верификовано техничко решење http://www.mfkg.rs/sajt/Downloads/tehnicka_rezenja/TR-54.pdf, везано за примену ламинатних структура у грађевинарству.

Комисија сматра да истраживања и резултати докторске дисертације пружају обиман и користан материјал за даљу презентацију на научним скуповима и објављивање радова у угледним међународним и домаћим часописима, који се тематски баве проблематиком проучавања динамичког понашања композитних ламината.

На основу изложеног Комисија доноси следећи

ЗАКЉУЧАК

Урађена докторска дисертација одговара прихваћеној теми од стране Наставно-научног већа Машинског факултета и Универзитета у Крагујевцу.

Кандидат је у приказу истраживања користила уобичајену и стандардизовану стручну терминологију, а структура докторске дисертације и методологија излагања су у складу са универзитетским нормама.

У току израде дисертације кандидат мр Гордана Богдановић је самостално дошла до оригиналних научних резултата, који су садржани у докторској дисертацији, а представљају значајан допринос области динамичког понашања јако изотропних материјала.

Кандидат влада методологијом научно-истраживачког рада, исказала је способност системског приступа и коришћења литературе, при чему је, користећи своје професионално образовање и лично искуство, показала способност да сложеној проблематици приступи свеобухватно у циљу дефинисања интегративних закључака и добијања конкретних и апликативних резултата.

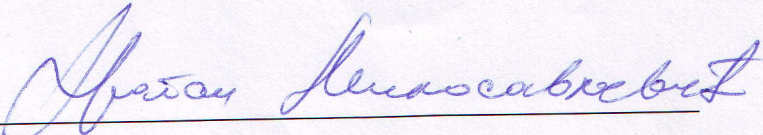
На основу свега претходно наведеног Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата мр Гордане Богдановић, дипл. маш. инж. једногласно је закључила да докторска дисертација под насловом:

„ДИНАМИЧКО ПОНАШАЊЕ КОМПОЗИТНИХ ЛАМИНАТА“

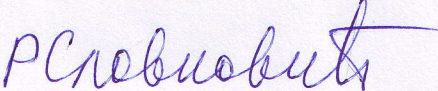
по квалитету, обиму и резултатима истраживања у потпуности задовољава све научне, стручне и законске услове за израду докторских дисертација.

Комисија констатује да је кандидат израдом ове докторске дисертације дала значајан допринос области динамичког понашања материјала са јако израженом анизотропијом, тако да са задовољством предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета у Крагујевцу да докторску дисертацију прихвати као успешно урађен рад и да кандидата позове на усмену јавну одбрану.

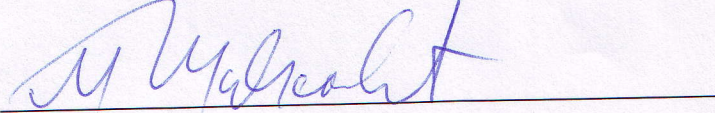
ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



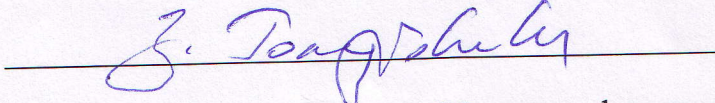
1. **Др Драган Милосављевић, ред. проф.**, Машински факултет у Крагујевцу
Научне области: Примењена механика и
 Примењена информатика и рачунарско инжењерство,



2. **Др Радован Славковић, ред. проф.**, Машински факултет у Крагујевцу
Научне области: Примењена механика и
 Примењена информатика и рачунарско инжењерство,



3. **Др Мирослав Живковић, ред. проф.**, Машински факултет у Крагујевцу
Научне области: Примењена механика и
 Примењена информатика и рачунарско инжењерство,



4. **Др Зоран Голубовић, ред. проф.**, Машински факултет у Београду
Научна област: Механика,