

Факултет МАШИНСКИ

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

Образац 1.

2519/4  
(Број захтева)

Већу научних области техничких наука  
(Назив стручног већа коме се захтев упућује, сагласно  
Члану 6. и чл. 7 став 1. овог Правилника)

21.12.2017.  
(Датум)

**ЗАХТЕВ**  
**за давање сагласности на предлог теме докторске дисертације**

Молимо да сходно чл. 46. ст.5. тач.3. Статута Универзитета у Београду („Гласник Универзитета“, број 131/06), дате сагласност на предлог теме докторске дисертације

**МЕТОДА ЗА КАЛИБРИСАЊЕ КОНСТИТУТИВНИХ МОДЕЛА ЗА СИМУЛИРАЊЕ ПРОЦЕСА ПРЕСОВАЊА КЕРАМИЧКОГ ПРАХА КОРИШЋЕЊЕМ ИНВЕРЗНИХ АНАЛИЗА (PROCEDURE FOR CALIBRATION OF MATERIAL CONSTITUTIVE MODELS FOR POWDER COMPACTION THROUGH INVERSE ANALYSIS)**

(пун назив предложене теме докторске дисертације)

НАУЧНА ОБЛАСТ Отпорност конструкција

ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ:

1. Име, име једног родитеља и презиме кандидата: SHWETANK GVANCHANDRA PANDEY

2. Назив и седиште Факултета на коме је стекао високо образовање: VNIT, Nagpur

3. Година дипломирања: 2012.

4. Назив магистарске тезе кандидата: Expert model for Bof Process

5. Назив Факултета на коме је магистарска теза одбрањена: Indian Institute of Technology, Madras

6. Година одбране магистарске тезе: 2014.

7. Назив Факултета на коме је кандидат уписао докторске студије: Машински факултет Београд

Одсек, смер или група: /

Година уписа докторских студија: 2014.

Обавештавамо Вас да је Наставно-научно веће Факултета  
(назив надлежног тела Факултета)

на седници одржаној 21.12.2017  
размотрило предложену тему и закључило да је тема подобна за израду докторске дисертације.

ДЕКАН  
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

Проф.др Радивоје Митровић

Прилог:

1. Предлог теме докторске дисертације са образложењем.

2. Акт надлежног тела факултета о подобности теме за израду докторске дисертације.

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ  
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ -  
Број: 2519/4  
Датум: 21.12.2017. године  
Београд, Краљице Марије 16

На основу захтева студента **Shwetank Pandey**, **маст. инж. технологије и мех. мат**, бр. 2519/1 од 16.10.2017. године да му се одобри израда докторске дисертације, реферата Комисије у саставу: др Владимир Буљак, ванр. проф., др Милорад Милованчевић, ред. проф., др Игор Балаћ, ред. проф., др Нина Обрадовић, научни саветник на Институту техничких наука САНУ и dr Giuseppe Cocchetti, vanredni professor на Politecnico di Milano, број 2519/3 од 20.12.2017. године, а на основу члана 30. Закона о високом образовању („Службени гласник РС“, број 76/2005, 100/2007 – аутентично тумачење, 97/2008, 93/2012 и 89/2013), члана 63. Статута Машинског факултета (број 1876/1 од 04.10.2013. године) и члана 30. Правилника о докторским студијама Машинског факултета, Наставно-научно веће Машинског факултета на седници од 21.12.2017. године, донело је следећу

### ОДЛУКУ

Прихвата се научна заснованост теме докторске дисертације и констатује да студент **SHWETANK PANDEY**, **маст. инж. технологије и мех. мат** испуњава услове за израду докторске дисертације **«МЕТОДА ЗА КАЛИБРИСАЊЕ КОНСТИТУТИВНИХ МОДЕЛА ЗА СИМУЛИРАЊЕ ПРОЦЕСА ПРЕСОВАЊА КЕРАМИЧКОГ ПРАХА КОРИШЋЕЊЕМ ИНВЕРЗНИХ АНАЛИЗА (PROCEDURE FOR CALIBRATION OF MATERIAL CONSTITUTIVE MODELS FOR POWDER COMPACTION THROUGH INVERSE ANALYSIS)»**.

За ментора студенту **Shwetank Pandey**, именује се др Владимир Буљак, ванр.проф.

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

ДЕКАН  
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

проф. др Радивоје Митровић

## ВЕЋУ ДОКТОРСКИХ СТУДИЈА

**Предмет:** Подобност теме и кандидата **Shwetank Pandey** за израду докторске дисертације

Одлуком број 2519/2 од 09.11.2017. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата **Shwetank Pandey** за израду докторске дисертације и научне заснованости теме **“Метода за калибрисање конститутивних модела за симулирање процеса пресовања керамичког праха коришћењем инверзних анализа”** (Procedure for calibration of material constitutive models for powder compaction through inverse analysis).

НАПОМЕНА: наслов дисертације изворно предложен од стране кандидата “Развој методе за калибрисање конститутивних модела за симулирање процеса пресовања керамичког праха коришћењем инверзних анализа” (Development of procedure for calibration of material constitutive models for powder compaction through inverse analysis) комисија је, уз сагласност кандидата, кориговала као што је приказано горе, како би се избегло коришћење термина који се подразумевају код научних радова, као на пример истраживање, развој, анализа и томе слично.

Разматрањем материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

## РЕФЕРАТ

### 1. Подаци о кандидату

#### 1.1. Биографски подаци

Shwetank Pandey рођен је 4.7.1991. године у месту Нагпур у Индији. Основну и средњу школу завршио је у истом месту, у Индији. Дипломирао је као инжењер технологије и металургије на Visvesvaraya Националном институту технологије у Нагпуру 2012. године. Постдипломске студије уписао је на Индијском институту технологије Мадрас, где је дипломирао стекавши звање Мастер инжењера металургије и материјала 2014. године. У току постдипломских студија био је носилац стипендије немачке фондације DAAD у оквиру које је боравио 8 месеци на универзитету RWTH Aachen. Том приликом радио је на формулисању модела који се користе за симулирање пластичног деформисања метала.

Докторске студије на Машинском факултету Универзитета у Београду уписао је у новембру 2014. године, где је и запослен као сарадник на Европском пројекту FP7-CERMAT2, под руководством проф. др Владимира Буљака. Област научно-истраживачког рада којом се бавио на Докторским студијама везана је за нумеричку механику и нелинеарне симулације са пластичним деформисањем у домену великих деформација. Ово представља

наставак истраживачког рада којим се бавио на универзитету RWTH Aachen у оквиру свог мастер рада.

Shwetank Pandey користи програм ABAQUS за анализе методом коначних елемената, програмско окружење FORTRAN у циљу имплементирања сложених конститутивних модела, као и програмско окружење MATLAB. Говори енглески и хинди језик, а служи се и српским језиком.

У оквиру рада на Машинском факултету, поред предмета које предвиђа програм Докторских студија, учествовао је на три Летње школе, организоване у оквиру Европског пројекта FP7-CERMAT2 на Универзитету у Тренту – у Италији и Универзитету у Аберистуиту – у Велсу. На свакој од ових школа похађао је по два курса предвиђена програмом пројекта, у оквиру којег је запослен на Машинском факултету. Учествовао је на три међународне конференције, има један рад у часопису са импакт фактором (први аутор), и један рад у часопису FME-Transactions.

### 1.2. Стечено научноистраживачко искуство

Научно-истраживачки рад кандидата од уписа на Докторске студије, па до пријаве теме дисертације, везан је за калибрисање и нумеричку имплементацију сложених конститутивних модела у комерцијални софтвер за анализу Методом коначних елемената. Од самог почетка докторских студија, кандидат је запослен на Машинском факултету као сарадник на Европском FP7-CERMAT-2 пројекту, који се бави развојем нових керамичких материјала и иновативних процедура за производњу, нумеричку симулацију, испитивање и карактеризацију. Пројекат финансира Maria Curie фондација, а укључује сарадњу индустријских партнера са једне стране и универзитета са друге. У пројекту учествује 8 партнера из 5 европских земаља. Пројекат предвиђа детаљан план усавршавања за сваког од укупно 8 студената докторских студија, који се баве међусобно повезаним и компатибилним истраживањима.

У оквиру дефинисаног истраживачког рада у "CERMAT-2" пројекту, кандидат Shwetank Pandey се бавио нумеричко-експерименталним приступом калибрисању сложених конститутивних модела који се користе при симулирању процеса пресовања керамичког праха. Током прве године студија, Кандидат се упознавао са методологијум инверзних анализа, као централном научном методом у оквиру предложене дисертације. У оквиру тог рада, он је развијао методу за стохастичко карактерисање еласто-пластичног понашања материјала применом експерименталних резултата добијених пробом инструменталног утискивања. Основни резултати овог истраживања приказани су у раду објављеном у FME transactions, чији библиографски детаљи су дати на крају овог документа.

Даље научно-истраживачке активности кандидата везане су за конститутивне моделе који се користе у симулацијама процеса пресовања керамичког праха. У ту сврху разматрана су два алтернативна приступа нумеричког моделирања: коришћење класичне теорије пластичности и дефинисање конститутивног модела за континуум са једне стране, као и коришћење дискретних модела са директним моделирањем интеракције честица праха, са друге стране. У оквиру овог сегмента истраживања, кандидат је у току своје друге године докторских студија боравио на Универзитету у Тренту у Италији као и у компанији Везувиус у Монсу у Белгији. Резултати овог упоредног истраживања саопштени су на међународном скупу одржаном у Пољској 2017. године (библиографски подаци наведени су на крају овог документа).

Из ових активности проистекла је формулација предложене докторске дисертације, која се заснива на синергичкој комбинацији нумеричких симулација са експериментима и теоријом оптимизације у циљу формирања аутоматске процедуре за калибрисање сложених конститутивних модела. Нумеричке симулације процеса сабијања кандидат је обављао у софтверском пакету ABAQUS, уз коришћење програмског окружења FORTRAN у циљу

имплементирања нових конститутивних модела. Проблеме нумеричке минимизације у оквиру инверзних анализа кандидат је решавао писањем сопствених рутина у MATLAB програмском окружењу.

Методу за калибрисање конститутивних модела потребно је применити на реалним експерименталним подацима добијеним сабијањем керамичког праха који се користи у производњи ватросталних облога у ливничкој индустрији. Производњом ових компоненти бави се један од индустријских партнера у оквиру "CERMAT-2" пројекта - Везувиус компанија из Белгије. У циљу добијања детаљних експерименталних података за потребе верификације развијене методе, кандидат је у више наврата, а у укупном трајању од 5 месеци, боравио у овој компанији где је самостално спроводио експерименте.

Током Докторских студија кандидат је редовно похађао наставу на Машинском факултету. Поред курсева предвиђених интерним програмом у оквиру "CERMAT-2" пројекта, кандидат је положио и следеће предмете на Машинском факултету:

| Предмет                                           | Професор                      | Оцена |
|---------------------------------------------------|-------------------------------|-------|
| 1. Advanced numerical methods                     | Проф. др Златко Петровић      | 10    |
| 2. Finite element method in applications          | Проф. др Александар Грбовић   | 9     |
| 3. Nano-mechanical characterization of materials  | Проф. др Игор Балаћ           | 10    |
| 4. Basics of composite materials mechanics        | Проф. др Игор Балаћ           | 9     |
| 5. Research and publications I                    | Проф. др Игор Балаћ           | 10    |
| 6. Research and publications II                   | Проф. др М. Ристановић        | 10    |
| 7. Stress and strain measuremenets                | Проф. др Милорад Милованчевић | 10    |
| 8. Research and publication III                   | Проф. др Марко Милош          | 10    |
| 9. Modeling of composite material micromechanics  | Проф. др Игор Балаћ           | 10    |
| 10. Inverse analysis in material characterization | Проф. др Владимир Буљак       | 10    |
| 11. Non liear finite element methods              | Проф. др Владимир Буљак       | 10    |
| 12. Structural integritz                          | Проф. др Александар Седмак    | 10    |
| 13. Research and publication IV                   | Проф. др Владимир Буљак       | 10    |
| 14. Proposal of PhD thesis                        | Проф. др Владимир Буљак       | 10    |

Пројекат идеје докторске дисертације, коју је кандидат успешно одбранио, сажет је у следећем:

"Процес производње керамичких компоненти најчешће се састоји из првобитне фазе сабијања праха на собној температури, коју прати завршна фаза синтеровања на високој температури. У оквиру овакве производње, круцијално је формирање хомогених отпресака са одсуством било каквих унутрашњих оштећења. Индустријска пракса, међутим, сведочи о томе да је ово често тешко изводљиво јер су карактеристике отпреска осетљиве на велики број параметара (нпр. сила пресовања, гранулација праха, варирање масеног удела везивног материјала итд.). Сходно томе, сам процес производње неопходно је подешавати кориговањем примећених грешака, али такав приступ неминовно доводи до стварања шкарта и губитака у енергији и материјалу.

У циљу повећања ефикасности овакве производње пожељно је располагати са математичким моделом процеса пресовања керамичког праха, како би се оптимизација производње вршила на основу нумеричких резултата. Један од најзначајнијих чинилаца неопходан за нумеричку симулацију процеса сабијања представља дефинисање конститутивног модела понашања праха. Имајући у виду комплексност овог проблема, у данашњој линтератури не постоји један, општеприхваћен конститутивни модел. Разни модели који се користе поседују различити ниво сложености, али су практично сви

карактерисани релативно великим бројем параметара који их описују, те је тако калибрисање ових модела изазован и сложен задатак.

Иницијална истраживања у овој дисертацији обухватају развој и примену методе засноване на инверзним анализама на калибрисање, најпре једноставнијих конститутивних модела. У првој приближности третирају се модели који се користе у механици тла, и који се у одређеном домену могу сматрати довољно тачним за описивање понашања праха у току процеса сабијања. Главна предност коју нуде ови модели је њихова доступност у већини софтверских пакета који се баве прорачунима Методом коначних елемената. Циљ овог сегмента истраживања је утврђивање могућности калибрисања оваквих модела коришћењем редукованог броја експерименталних података ограниченог на оне који се могу прикупити у току процеса сабијања.

У наредној фази усложњавања проблема извршиће се модификација постојећих конститутивних модела превасходно са циљем имплементирања еласто-пластичног "coupling-a", односно увођења зависности еластичних карактеристика од пластичне деформације. Овакав конститутивни модел послужиће као основа за спровођење нумеричких анализа осетљивости у циљу адекватног избора експериментално мерених вредности. Овако развијена метода у крајњем исходу биће примењена на нови конститутивни модел, развијен на Универзитету у Тренту а који се заснива на Bigoni-Piccolroaz функцији течења. За успешно коришћење методе калибрисања која се развија у овој дисертацији, неопходно је извршити и нумеричку имплементацију овог новог конститутивног модела у ABAQUS софтверски пакет. Квантитативна верификација добијених карактеристика биће извршена поређењем са вредностима које се добијају коришћењем значајно сложеније процедуре засноване на серији деструктивних тестова на отпресцима. У ту сврху, кандидат је у току треће године Докторских студија боравио у три наврата, у укупном трајању од три месеца, у компанији Везувиус где је спровео експерименталну кампању, праћењем процедуре која се тренутно користи као стандард у овој компанији у циљу механичке карактеризације отпресака.

Успешност методе предложене овом дисертацијом резултирала би прецизнијом и значајно бржом калибрацијом сложених конститутивних модела који се користе у нумеричким симулацијама процеса сабијања керамичког праха, у односу на тренутну индустријску праксу. Сам процес калибрације могуће би било вршити само на бази експерименталних података добијених у оквиру теста сабијања, чиме се потпуно губи потреба за допунским испитивањима отпреска."

У току трајања Докторских студија, кандидат је објавио два рада, од којих је један у часопису са импакт фактором, а учествовао је и на три међународне конференције. Списак ових радова са одговарајућим библиографским подацима дат је у наставку.

1. Buljak, V., Pandey, S. and Balac, I.: "Material model calibration through indentation test and stochastic inverse analysis", FME transactions, 45, pp. 109-116, 2017.
2. Pandey S. Buljak V. and Balac I.: "Reduced Order Numerical Modeling for Calibration of Complex Constitutive Models in Powder Pressing Simulations" Science of sintering 49, pp. 331-345, 2017.
3. Buljak, V., Balac, I. and Pandey, S.: "Simultaneous assessment of material properties and residual stresses in ceramic materials by double indentation through inverse analysis". ECERS 2015: 14<sup>th</sup> International Conference of European Ceramic Society, June 21-25, 2015, Toledo, Spain.
4. Buljak, V., Balac, I. and Pandey, S.: "Stochastic calibration of material mechanical models based on indentation test and inverse analysis". CERMODEL 2015: Modeling and simulation meet innovation in ceramics technology, July 1-3, 2015, Trento, Italy

5. Pandey S., Buljak V., Kallel A., and Baivier S.R., "Parameter identification for Drucker-Prager Cap model through inverse analysis using only compaction curves". Manufacturing technologies, properties and applications of advanced structural ceramic materials, April 07, 2017, Rzeszów, Poland.

### 1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

Shwetank Pandey, студент Докторских студија на Машинском факултету Универзитета у Београду, завршио је Мастер академске студије на Индијском институту технологије Мадрас, стекавши звање Мастер инжењера металургије и материјала. Током Докторских студија положио је 10 предмета и стекао 50 ESPB бода, док је кроз лабораторијски истраживачки рад стекао 75 ESPB бода. Са укупно скупљених 125 ESPB бода и одбрањеним Пројктом идеје дисертације, стекао је услов за пријаву докторске дисертације.

Кандидат је поред испита предвиђених планом и програмом Докторских академских студија на Машинском факултету, похађао и обуку у оквиру Европског FP7-CERMAT2 пројекта, а боравио је у више наврата на Универзитету у Тренту и компанији Везувиус, који су учесници на истом пројекту. Учествовао је на три међународна конгреса, објавио је два рада од којих је један у часопису са импакт фактором, а још један рад је у процесу рецензије, такође у часопису са импакт фактором.

Истраживачким радом којим се бавио у току претходне три године на Докторским студијама, као и претходним радом у оквиру Мастер студија, кандидат је у потпуности ушао у проблематику предложене докторске дисертације. Овиме су стечени формални и објективни услови за наставак рада на докторској дисертацији под предложеним насловом.

## **2. Предмет и циљ истраживања**

Керамичка индустрија укључује производњу великог броја разноврсних компоненти са применом у различитим инжењерским секторима. У керамичке производе спадају, како једноставне и јефтине компоненте, као што су керамичке плочице или цигле, тако и значајно сложеније и софистицираније компоненте са применом у аеро-космонаутици, ватросталне облоге са применом у ливничкој индустрији, различити уређаји са био-медицинском применом итд. Упркос евидентном индустријском интересу, сви процеси производње керамичких компоненти још увек нису добро разјашњени и описани адекватним математичким моделима. Ово има за последицу да се у производњи керамичких компоненти јавља велики проценат шкарта, реализацијом делова који не задовољавају прописане механичке или димензионе критеријуме. Сходно томе, развојем иновативних процедура у овом сектору постижу се значајни економски и еколошки бенефити.

Значајан фактор за стабилну и ефикасну производњу керамичких производа представља могућност извођења реалистичних и поузданих нумеричких симулација различитих фаза производње. Производња керамичких компоненти најчешће се састоји из две фазе: фазе механичког сабијања керамичког праха на собној температури и фазе синтеровања на повишеној температури. У оквиру прве фазе, коришћењем механичке силе повећава се густина праха, а добијено тело постаје конзистентно и задржава облик и по избацивању из калупа. Механичке особине овако добијеног отпреска, који се у страној литератури назива *green body*, у великој мери утичу на карактеристике финалног керамичког производа. Сам отпресак мора бити без макро дефеката, са одговарајућом чврстоћом, како би се њиме могло манипулисати у оквиру наредне фазе синтеровања. Евентуално присуство шупљина у отпреску изазива интензивније локално скупљање материјала у току синтеровања, што за последицу има нехомогеност финалног производа, као и могућност значајног одступања од захтеваних димензија или облика, појаву заосталих напона, па чак и прскотина значајних димензија [20]. Сходно томе евидентно је да значајан аспект производње

керамичких компоненти представља прецизно нумеричко моделирање фазе сабијања керамичког праха. Нумеричко моделирање ове фазе, са посебним фокусом на калибрацију одговарајућих конститутивних модела, представља централну тему истраживања у овој дисертацији.

Конститутивно моделирање процеса сабијања керамичког праха, неопходно за нумеричку симулацију, комплексан је и изазован задатак. Највећа потешкоћа огледа се у чињеници да полазни прашкасти материјал има значајно различито понашање у односу на финални отпресак. Допунску отежавајућу околност представља промена еластичних карактеристика отпрескаса повећавањем притиска пресовања. Ове и друге карактеристике од значаја за конститутивно моделирање процеса сабијања, описане су у релевантној научној литератури (видети нпр. [26], [27]). Имајући у виду наведена својства, јасно је да примена класичних метода описивања конститутивног понашања материјала, са линеарно еластичним доменом и накнадном еласто-пластичном деформацијом, доводи до значајне грешке, јер је немогуће узети у обзир зависност еластичних карактеристика од пластичне деформације (еласто-пластични *coupling*).

Упркос наведеним потешкоћама многи аутори ипак примењују за моделирање процеса сабијања прашкастих материјала конститутивне моделе који се користе у механици тла, као на пример Drucker-Prager CAP (DPC) модел. Предност овог приступа огледа се у томе што су ти модели већ имплементирани у оквиру комерцијалних пакета за прорачун Методом коначних елемената. Као начин за делимично отклањање поменутих недостатака које имају ови конститутивни модели у изворном облику, неки аутори предложили су дефинисање зависности конститутивних параметара од пластичне деформације [26] - [35]. Овакав приступ чини могућим успостављање везе између еластичних карактеристика и пластичне деформације, која се може довести у линеарну везу са релативном густином отпреска, али захтева допунску нумеричку имплементацију. Исти приступ биће коришћен и у овом истраживању, а за циљ је постављено формулисање конститутивног модела са могућношћу еласто-пластичног *coupling*-а. Конститутивни модел ће бити развијен и оптимизован за моделирање процеса сабијања керамичког праха и биће даље коришћен за развој нумеричко-експерименталне методе за калибрацију конститутивних параметара применом инверзне анализе.

Коришћење модела пластичне деформације дефинисаног за континуум, у циљу моделирања процеса сабијања керамичког праха, има одређене недостатке. Највећа грешка прави се у почетној фази пресовања, када се кохезивна сила још није формирала, и материјал је у прашкастом стању. Експериментално је утврђено да се у оквиру процеса сабијања керамичког праха издвајају три фазе: (1) клизање и реорганизација честица; (2) деформација честица и (3) згушњавање и спајање појединих честица (видети [20] - [21]). Стварање кохезивне силе у отпреску почиње тек у касној другој фази, док се већ у току прве фазе примећује пораст релативне густине. Сходно томе, модели као што је DPC који повезују еквивалентну пластичну деформацију са релативном густином, немају могућност моделирања саме транзиције у циљу квантификације релативне густине при којој крећу да се формирају кохезивне силе. Релативна густина транзиције варира за различите керамичке прашове, а што је њена вредност већа, то је и грешка моделирања прве фазе сабијања коришћењем DPC модела израженија. У циљу елиминисања ове грешке, као и ради узимања у обзир неких других механичких карактеристика изражених код сабијања керамичких прашова, неопходно је развити нови конститутивни модел за описивање процеса сабијања. Овај задатак представља тему истраживања тима на Универзитету у Тренту, у оквиру пројекта "CERMAT2", а као циљ постављена је теоријска формулација новог еласто-пластичног конститутивног модела. Нумеричка имплементација овог конститутивног модела у комерцијални софтвер који користи Методу коначних елемената део је овог истраживања, и биће решаван у сарадњи са партнерима на " CERMAT2" пројекту са Универзитета у Тренту.

Узимање у обзир еласто-пластичног *coupling*-а има за последицу промену вредности конститутивних параметара са притиском пресовања. Ова специфичност значајно компликује процес калибрације, јер се број параметара које је потребно квантификовати значајно увећава. У тренутној пракси користи се процедура калибрисања ових конститутивних модела која се састоји од извођења низа деструктивних тестова на отпреску. Потреба за идентификацијом параметара у функцији релативне густине значајно усложњава ову процедуру јер се тиме повећава број отпресака потребних за калибрацију. Одговарајући тестови и процедуре за квантификацију параметара описани су у литератури - видети [26] - [35]. Све ово чини рутинску индустријску примену значајно сложеном и прилично скупом, па је још увек у великој мери заступљен емпиријски приступ при утврђивању параметара производње, без детаљног коришћења математичких модела у циљу моделирања различитих процеса производње.

Алтернативна стратегија која потенцијално доноси низ предности при решавању описаног проблема калибрације параметара, заснива се на примени инверзних анализа. То је и приступ који ће се користити у оквиру овог истраживања. Методологија инверзних анализа систематски комбинује експерименте са нумеричком симулацијом и теоријом оптимизације у циљу минимизирања дискрепанце између експериментално измерених, и одговарајућих нумерички добијених вредности. Овај приступ недавно је примењиван са успехом у другим областима, о чему сведоче бројне научне публикације [8], [12], [15], [36] - [42], а његова имплементација у овом контексту захтева допунско истраживање и биће предмет ове дисертације. Као циљ овог истраживања постављен је развој калибрационе процедуре која ће се заснивати на методологији инверзне анализе, а која ће бити у могућности да аутоматски квантификује одговарајуће конститутивне параметре, као и закон њихове промене у широком дијапазону релативне густине, коришћењем само експерименталних података добијених приликом процеса сабијања. Овиме би се у потпуности избегло извођење бројих експеримената на отпресцима, а самим тим цео процес калибрације неопходан за прецизну нумеричку симулацију учинио значајно јефтинијим, те сходно томе прихватљивијим за свакодневну индустријску примену.

Ради постизања наведеног циља неопходно је извршити модификацију геометрије калупа која се користи за пресовање праха. У тренутној пракси калупи су цилиндричног облика, с обзиром да се деструктивни тестови неопходни за даљу калибрацију изводе на узорцима облика ваљка. Предложене нове геометрије биће оптимизоване у циљу повећања зависности експериментално мерљивих података од тражених конститутивних параметара. Оптимизација ће се извршити спровођењем анализе осетљивости, а коришћењем развијеног нумеричког модела за симулацију процеса пресовања. Све ово треба да резултира дефинисањем протокола тестирања којиме би се прецизно дефинисала геометрија коришћених калупа, и начин мерења експерименталних вредности, које ће затим бити коришћене као улазни подаци за добијање конститутивних параметара путем развијене процедуре на бази инверзне анализе.

С обзиром на комплексност конститутивних модела који су предмет калибрације, очекује се да ће нумерички модели развијени за симулацију одабраних експеримената бити компликовани, са различитим изворима нелинеарности. Поред потребе за симулирањем контакта, допунска нелинеарност огледа се у еласто-пластичној деформацији, а посебну сложеност изазива и чињеница да се материјал налази у режиму великих деформација, што проблем чини геометријски нелинеарним. Поред тога, итеративна природа алгоритама за нумеричку оптимизацију захтева понављање извођења ових симулација. Све ово чини саму процедуру калибрације релативно дуготрајном. У циљу драстичног смањења компјутерског времена биће развијен модел смањене димензионалности коришћењем неке од техника за редуковање базе модела. Овакви модели, који су у страној литератури познати под назвом *Reduced Order Models* - ROM, формирају се полазећи од корелације нумеричких података, а проналажењем најоптималније ортогоналне базе, значајно смањених димензија,

задржавајући висок ниво тачности као и полазни модел велике димензионалности. Тиме се постиже да се нелинеарни проблем решава у вишеструко смањеном простору, па је и компјутерско време потребно за његово решење редуковано. Употреба ових техника у претходних десетак година доживела је значајну експанзију у области нелинеарних нумеричких симулација. Примери убрзања нумеричких симулација на овај начин могу се наћи у литератури, са применом у различитим инжењерским контекстима [43]-[49]. Коришћење истог приступа у циљу убрзавања нумеричке симулације процеса сабијања керамичког праха биће предмет овог истраживања.

Имајући у виду изложени научни контекст, у оквиру истраживања у предложеној дисертацији могу се идентификовати следећи циљеви:

- Нумеричка имплементација конститутивног модела са могућношћу еласто-пластичног *coupling*-а, као и узимања у обзир других извора нелинеарне зависности између напона и деформације. Имплементирани модел биће оптимизован за керамички прах;
- Дефинисање експерименталног протокола у виду оптимизације геометрије калупа за прављење отпресака, као и одговарајућег избора експериментално мерљивих величина у циљу максимизације утицаја тражених конститутивних параметара на експериментално измерене вредности;
- Развој софтверске апликације за аутоматску калибрацију конститутивног модела за симулацију пресовања керамичког праха, коришћењем методологије инверзних анализа;
- Развој редукованог модела (ROM) за убрзавање нумеричких симулација усвојеног експеримента пресовања керамичког праха. Овиме се постиже рутинска употреба процедуре калибрације у реалном времену, јер се очекује да се нумеричке симулације убрзају неколико хиљада пута;
- Експериментална верификација развијене методологије калибрације конститутивних модела у оквиру ригорозне експерименталне кампање, као и верификација резултата симулације сабијања керамичких компоненти комплексних геометрија. Сва експериментална испитивања биће спроведена у компанији Весувиус у Белгији, која је један од учесника на "CERMAT-2" пројекту.

У наставку је дат списак неких од скорашње објављених радова који се баве научним методама од значаја за овај истраживачки пројекат.

- [1] Buljak, V. Inverse analysis with model reduction: proper orthogonal decomposition in structural mechanics, Springer Verlag, Berlin. 2012.
- [2] Oliver, W.C. and Pharr, G. M. An improved technique for determining hardness elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments, Journal of Materials Research, Vol. 7, pp. 176-181. 1992.
- [3] Buljak, V. Proper Orthogonal Decomposition and Radial Basis Functions algorithm for diagnostic procedure based on inverse analysis, FME Transactions, Vol. 38, pp. 129-136. 2010.
- [4] The Math Works Inc. MATLAB user's guide and optimization toolbox, release 6.13, USA. 2002.
- [5] Gu, Y., Nakamura, T., Prchlik, L., Sampath, S. and Wallace J. Micro-indentation and inverse analysis to characterize elastic-plastic graded materials, Materials Science and Engineering, Vol. 345, pp. 223-233. 2003.

- [6] Mulford, R., Asaro, R.J. and Sebring R.J. Spherical indentation of ductile power law materials, *Journal of Material Research*. Vol. 19, pp. 2641–2649. 2003.
- [7] HKS Inc. ABAQUS/Standard: Theory and user's manuals, release 6.5-1, Pawtucket. 2005.
- [8] Bolzon, G., Buljak, V., Maier, G. and Miller B. Assessment of elastic-plastic material parameters comparatively by three procedures based on indentation test and inverse analysis, *Inverse Problems in Science and Engineering*, Vol. 19, pp. 815-837. 2011.
- [9] Bolzon, G and Buljak, V. An effective computational tool for parametric studies and identification problems in materials mechanics. *Computational Mechanics*, Vol. 48, pp 675-687. 2011.
- [10] Bolzon, G., Chiarullo, E.J., Egizabal, P. and Estournes, C. Constitutive modeling and mechanical characterization of aluminium based metal matrix composites produced by spark plasma sintering, *Mechanics of Materials*, Vol. 3. 2010.
- [11] Chen X., Ogasawara N., Zhao M. and Chiba, N. On the uniqueness of measuring elastoplastic properties from indentation: The indistinguishable mystical materials, *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 55, pp. 1618–1660. 2007.
- [12] Bolzon, G., Maier, G. and Panico, M. Material model calibration by indentation imprint mapping and inverse analysis. *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 41, pp. 2957-2975. 2004.
- [13] Haykin S. Kalman filtering and neural networks, John Wiley and Sons, New York 2001.
- [14] Gibbs, B.P. Advanced Kalman Filtering, least-squares and modeling, John Wiley and Sons, New York 2011.
- [15] Fedele, R. and Maier, G. Flat-jack tests and inverse analysis for the identification of stress states and elastic properties in concrete dams, *Meccanica*, Vol. 42, pp. 387-402. 2007.
- [16] Fedele, R., Maier, G. and Whelan, M. Stochastic calibration of local constitutive models through measurements at the macroscale in heterogeneous media, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 195, pp. 4971-4990. 2006.
- [17] Julier, S. and Uhlman, J. A general method for approximating nonlinear transformations of probability distributions, Robotics Research Group, Department of Engineering Science, University of Oxford, Available from: <[www.robots.ox.ac.uk/siju/index.html](http://www.robots.ox.ac.uk/siju/index.html)>.
- [18] Bruhns, O. and Anding, D. On the simultaneous estimation of model parameters used in constitutive laws for inelastic material behavior, *International Journal of Plasticity*, Vol. 15, pp. 1311-1340. 1999.
- [19] Buljak, V. and Maier G. Proper Orthogonal Decomposition and Radial Basis Functions in material characterization based on instrumented indentation, *Engineering Structures*, Vol. 33, pp. 492-501. 2011.
- [20] Piccolroaz, A., Bigoni, D. and Gajo, A. An elastoplastic framework for granular materials becoming cohesive through mechanical densification, Part I – small strain formulation, *European Journal of Mechanics A/Solids*, Vol. 25, pp. 334-357. 2006.
- [21] Piccolroaz, A., Bigoni, D. and Gajo, A. An elastoplastic framework for granular materials becoming cohesive through mechanical densification, Part II – small strain formulation, *European Journal of Mechanics A/Solids*, Vol. 25, pp. 358-369. 2006.
- [22] Swan, S., Bigoni, D., Gajo, A. and Piccolroaz, A. Cold forming of ceramic powders: constitutive and numerical modelling vs experimental results. (Article Under Preparation).
- [23] Maitre, O.P. and Knio, O.M. Spectral methods for uncertainty quantification, Springer Verlag, Berlin. 2010.

- [24] Xiu, D. and Karniadakis, G.E Modeling uncertainty in flow simulations via generalized polynomial chaos, *Journal of Computational Physics*, Vol. 187, pp. 137–167. 2003.
- [25] Nouy A. A priori model reduction through proper general decomposition, *Journal of Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 199, pp. 1603-1626. 2010.
- [26] Han, L.H., Elliot, J.A., Bentham A.C., Mills, A., Amidon, G.E. and Hancock, B.C. A modified Drucker-Prager Cap model for die compaction simulation of pharmaceutical powders, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 45, pp. 3088-3106. 2008.
- [27] Cunningham, J.C., Sinka, I.C. and Zavaliangos, A. Analysis of Tablet Compaction. I. Characterization of Mechanical Behavior of Powder and Powder/Tooling Friction, *Journal of Pharmaceutical Sciences*, Vol. 93, pp. 2022-2039. 2004.
- [28] Sinha, T., Curtis, J.S., Hancock, B.C. and Wassgren, C. A study on the sensitivity of Drucker–Prager Cap model parameters during the decompression phase of powder compaction simulations, *Journal of Powder Technology*, Vol. 198, pp. 315-324. 2010.
- [29] Shang, C., Sinka, I.C. and Pan, J. Constitutive Model Calibration for Powder Compaction Using Instrumented Die Testing, *Journal of Experimental Mechanics*, Vol. 52, pp. 903-916. 2012.
- [30] LaMarche, K., Buckley, D., Hartley, R., Qian, F. and Badawy, S. Assessing materials' tablet compaction properties using the Drucker–Prager Cap model, *Journal of Powder Technology*, Vol. 267, pp. 208-220. 2014.
- [31] Garner, S., Strong, J. and Zavaliangos, A. The extrapolation of the Drucker–Prager/Cap material parameters to low and high relative densities, *Journal of Powder Technology*, Vol. 283, pp. 210-226. 2015.
- [32] Almanstotter, J. A modified Drucker–Prager Cap model for finite element simulation of doped tungsten powder compaction, *International Journal of Refractory metals and Hard Materials*, Vol. 50, 290-297. 2015.
- [33] Diarra, H., Mazel, V., Boillon, A., Rehault, L., Busignies, V., Bureau, S. and Tchoreloff, P. Finite Element Method (FEM) modeling of the powder compaction of cosmetic products: Comparison between simulated and experimental results, *Journal of Powder Technology*, Vol. 224, pp. 233-240. 2012.
- [34] Kadiri, M.S. and Michrafy, A. The effect of punch's shape on die compaction of pharmaceutical powders, *Journal of Powder Technology*, Vol. 239, pp. 467-477. 2013.
- [35] Mazel, V., Diarra, H., Busignies, V. and Tchoreloff, P. Comparison of different failure tests for pharmaceutical tablets: Applicability of the Drucker–Prager failure criterion, *International Journal of Pharmaceutics*, Vol. 470, 63-69. 2014.
- [36] Ostrowski, Z., Bialecki, R. A. and Kassab, A. J. Estimation of constant thermal conductivity by use of proper orthogonal decomposition, *Journal of Computational Mechanics*, Vol. 37(1), pp. 52–59. 2005.
- [37] Yu, G., Wen, P. A. and Wang, H. An inverse method to determine boundary temperature and heat flux for a 2D steady state heat conduction problem. *Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Informational in Engineering Conference (IDETC/CIE 2008)*, New York. Paper number DETC2008-49811, pp. 1087–1093. 2008.
- [38] Li, W., Krist, S. A. and Compabell, R. Transonic airfoil shape optimization in preliminary design environment. *Proceedings of 10th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference*, Albany. Paper number AIAA 2004-4629, pp. 3650–3671. 2004.

- [39] Sobieczky, H. Knowledge based aerodynamic optimization. Proceedings of 4th SST CFD Workshop, Tokyo, pp. 1–6. 2006.
- [40] Wang, B.T. and Chiu, C.H. : Determination of unknown impact force acting on a simply supported beam, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 17(3), pp. 683–704. 2003.
- [41] Borsic, A., Comina, C., Foti, S., Lancellotta, R. and Musso, G. Imaging heterogeneities with electrical impedance tomography: laboratory results, Geotechnique, Vol. 55(7), pp. 539–547. 2005.
- [42] Damasceno, V. and Fratta, D. Monitoring chemical diffusion in a porous media using electrical resistivity tomography. ASCE Geotechnical Special Publication, GSP 149, pp. 174–181. 2006.
- [43] Bialecki, R.A., Kassab, A.J. and Fic, A. Proper orthogonal decomposition and modal analysis for acceleration of transient FEM thermal analysis, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 62, pp. 774–797. 2005.
- [44] Holmes, P., Lumley, J.L. and Berkooz, G. The proper orthogonal decomposition in the analysis of turbulent flows, Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 25, pp. 539–575. 1993.
- [45] Kerschen, G., Poncelet, F. and Golinval, J.C. Physical interpretation of independent component analysis in structural dynamics, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 21, pp. 1561–1575. 2007.
- [46] Ly, H.V. and Tran, H.T. Modeling and control of physical processes using proper orthogonal decomposition, Journal of Mathematical and Computer Modelling, Vol. 33, pp. 223–236. 2001.
- [47] Ruotolo, R. and Surace, C. Using SVD to detect damage in structures with different operational conditions, Journal of Sound and Vibration, Vol. 226(3), pp. 425–439. 1999.
- [48] Sirovich, L. and Kirby, M. Low-dimensional procedure for the characterization of human faces, Journal of the Optical Society of America, Vol. 4, pp. 519–524. 1987.
- [49] Tang, D., Kholodar, D., Juang, J.N. and Dowell, E.H. System identification and proper orthogonal decomposition method applied to unsteady aerodynamics, Journal of The American Institute of Aeronautics and Astronautics, Vol. 39(8), pp. 1569–1575. 2001.

### 3. Основне хипотезе

Презентовани истраживачки програм има за основни циљ побољшавање методологије за нумеричко симулирање процеса механичког сабијања керамичког праха, са посебним акцентом на решавању проблема калибрисања конститутивних модела који се користе у овим симулацијама. Истраживање ће обухватити различите конститутивне моделе, као што је наведено на претходним странама, али развијена процедура калибрације мора бити општег типа са могућношћу примене за произвољне конститутивне моделе. Планирано истраживање заснива се на следећим полазним хипотезама:

- **Хипотеза 1:** керамички прах моделира се као континуум од самог почетка процеса сабијања. Ово је изабрано као нумерички ефикаснија алтернатива у односу на приступ у коме би се појединачне честице засебно моделирале у циљу прецизнијег симулирања међучестичне интеракције. Овиме се избегава потреба за формулисањем конститутивног модела на различитим димензионим скалама, па је тиме постигнута већа ефикасност при нумеричком решавању проблема. Сходно томе, у развијеном конститутивном моделу релативна густина је корелирана са еквивалентном пластичном деформацијом;

- **Хипотеза 2:** полази се од претпоставке да је квантификација релевантних параметара унутар одабраних конститутивних модела могућа применом методологије инверзних анализа а полазећи од експерименталних података добијених извођењем хладног пресовања, без потребе за даљим тестовима на отпреску;
- **Хипотеза 3:** циљна функција у оквиру постављене инверзне анализе је дефинисана тако да има јасно изражен један глобални минимум, те да је сходно томе решива итеративним процедурама нумеричке оптимизације. Ова функција може у одређеним областима параметарског простора бити неконвексна, па чак и имати релативно велики број локалних минимума. Уколико се ово испостави, за минимизацију циљне функције биће коришћене неке од *soft computing* техника;
- **Хипотеза 4:** постоји изражена корелација између нумеричких резултата тестова сабијања који одговарају различитим вредностима тражених параметара. У овом случају математичка метода правилне ортогоналне декомпозиције доприноси значајном смањењу димензионалности проблема, чиме се може развити редуковани модел за убрзавање нумеричких симулација усвојеног теста.

#### 4. Научне методе истраживања

Из презентованог научног и техничког контекста планираног истраживања јасно се може закључити да представљена тематска област има изражен мултидисциплинарни карактер. Сходно томе, ради постизања наведених циљева неопходна је примена различитих научних метода, од којих су најбитније наведене у наставку.

- Методологија инверзних анализа представља централну научну методу која ће бити примењена у овом истраживању. Инверзне анализе засноване су на нумеричкој минимизацији дискрепанце између експериментално измерених и нумерички срачунатих вредности;
- Нумеричке методе решавања оптимизационих проблема, превасходно методе засноване на алгоритмима типа *Trust Region*, који се базирају на итеративном математичком програмирању у дводимензионалном суб-простору који чине вектор градијента циљне функције, и вектор Њутновог правца;
- У циљу превазилажења решавања проблема оптимизације са великим бројем локалних минимума, биће коришћене методе које припадају тзв. *soft computing* методологији. Из ове групе оптимизационих техника, првенствено ће бити коришћени генетички алгоритми;
- Стохастичке методе биће примењиване где год је то могуће у циљу оцено интервала поверења добијених вредности конститутивних параметара. Ове методе пружају могућност процењивања пропагације грешака различитог порекла у оквиру развијене процедуре за карактеризацију. У циљу решавања ових проблема биће коришћени Калманови филтери, који омогућавају генерисање матрице коваријанце тражених параметара, полазећи од експерименталних података са одговарајућим статистичким описом;
- Нумеричке методе за имплементирање конститутивних модела у софтвер за прорачун Методом коначних елемената. Посебна пажња биће посвећена третирању проблема великих деформација, јер се одабрани експерименти искључиво реализују у овом режиму;
- Методологија за развој редукованих нумеричких модела заснована на примени правилне ортогоналне декомпозиције. Ова методологија користи корелираност података у циљу проналажења најоптималнијих апроксимација са значајним

смањењем димензионалности проблема. Примењена у овом контексту, треба да обезбеди значајно убрзавање нелинеарних нумеричких симулација;

- Експерименталне методе које ће обухватити извођење тестова механичког сабијања, као и традиционално коришћене деструктивне тестове за карактеризацију отпреска (нпр. *Brasilian test*, *crush test* итд.).

## 5. Очекивани научни допринос

Планирани истраживачки рад у предложеној дисертацији има за циљ генерисање напретка у оквиру нумеричког симуирања процеса хладног механичког сабијања керамичког праха. Овај процес представља стандардно коришћену процедуру у производњи керамичких компоненти различите намене. Одговарајући научни доприноси, као очекивани исходи овог истраживачког програма набројани су у наставку:

- Могућност извођења тачнијих нумеричких симулација процеса сабијања керамичког праха као резултат употребе новоразвијених конститутивних модела, са могућношћу моделирања најважнијих физичких процеса који се том приликом дешавају;
- Методологија карактеризације параметара који улазе у одговарајуће конститутивне моделе заснована на инверзним анализама. Развијена метода ће проблем карактеризације параметара решавати на прецизнији и значајно бржи начин, ослањајући се на експерименталне податке добијене једино извођењем тестова сабијања. Овиме се у потпуности губи потреба за спровођењем деструктивних тестова на отпреску што значајно поједностављује процедуру карактеризације;
- Развијен редуковани модел којим се постиже значајно убрзање нелинеарних нумеричких симулација везаних за експеримент механичког сабијања праха. Коришћење овог модела превазилази употребу искључиво у оквиру инверзних анализа и може представљати значајну помоћ у процесу производње керамичких компоненти, јер ће бити у стању да обезбеди резултате симулације практично у реалном времену.

## 6. План истраживања и структура рада

Рад на предложеној дисертацији требало би да прати следећи редослед и концепт:

- Уводна разматрања;
- Преглед литературе и разматрање различитих приступа коришћених у нумеричким симулацијама процеса пресеовања керамичког праха;
- Анализа експерименталних метода које су данас у индустријској употреби са циљем калибрације конститутивних модела који се користе у симулацијама процеса пресеовања праха;
- Модификовање постојећих и имплементирање новог конститутивног модела са циљем постизања симулираних резултата повећане тачности;
- Спровођење детаљне анализе осетљивости експериментално мерљивих величина на промене у вредностима конститутивних параметара а у циљу оптималног дефинисања процеса тестирања;
- Формирање експериментално-нумеричког протокола за калибрисање сложених конститутивних модела, заснованог на инверзним анализама;

- Експериментална верификација резултата добијених новоразвијеном процедуром и њихово поређење са вредностима које се добијају, применом значајно сложенијих и скупљих техника, које се користе у тренутној индустријској пракси;
- Формирање закључака и предлога будућих истраживања у овој области;
- Списак коришћене литературе.

## 7. Закључак и предлог

На основу изложеног приказа предложене теме и досадашњих активности кандидата, Комисија закључује да је кандидат испунио све законом предвиђене услове и истраживачке квалификације за израду докторске дисертације. Сходно томе, Комисија предлаже Већу докторских студија да кандидату

**Shwetank Pandey**

одобри израду докторске дисертације под називом:

**Метода за калибрисање конститутивних модела за симулирање процеса пресовања керамичког праха коришћењем инверзних анализа”**

**(Procedure for calibration of material constitutive models for powder compaction through inverse analysis)**

из уже научне области отпорности конструкција. За ментора рада на дисертацији предлаже се др Владимир Буљак, ванредни професор на Катедри за отпорност конструкција Машинског факултета Универзитета у Београду.

Београд, 12.12.2017. године

## ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ:

\_\_\_\_\_  
др Владимир Буљак,  
ванредни професор Универзитета у Београду, Машински факултет

\_\_\_\_\_  
др Милорад Милованчевић,  
редовни професор Универзитета у Београду, Машински факултет

\_\_\_\_\_  
др Игор Балаћ,  
редовни професор Универзитета у Београду, Машински факултет

\_\_\_\_\_  
др Нина Обрадовић,  
научни саветник на Институту техничких наука САНУ

\_\_\_\_\_  
dr Giuseppe Cocchetti,  
vanredni professor na Politecnico di Milano

Додатак уз образац 1.

## ПОДАЦИ О МЕНТОРУ

Име и презиме: Владимир Буљак

Звање: ванредни професор на Катедри за отпорност конструкција

Списак радова објављених у научним часописима са Science Citation Index (SCI) листе који квалификују ментора за вођење докторске дисертације:

1. **V.Buljak**, G. Cocchetti, A. Cornaggia and G. Maier: Estimation of residual stresses by inverse analysis based on experimental data from sample removal for “small punch” tests. *Engineering structures* (**IF=2.637**), ISSN=0141-0296, 136, pp:77-86, 2017.
2. S. Pandey, **V.Buljak** and I. Balac: Reduced Order Numerical Modeling for Calibration of Complex Constitutive Models in Powder Pressing Simulations. *Science of sintering* (**IF=0.834**), ISSN=0350-820X, 49, pp: 331-345, 2017.
3. **V. Buljak**, G. Cocchetti, A. Cornaggia and G. Maier: Assessment of residual stresses and mechanical characterization of materials by hole drilling and indentation tests combined and by inverse analysis. *Mechanics research communications* (**IF=1.549**), ISSN=0093-6413, 68 (21), pp: 18-24, 2015.
4. **V. Buljak**, M. Bocciarelli and G. Maier: Mechanical characterization of anisotropic elasto-plastic materials by indentation curves only. *Meccanica* (**IF=1.949**), ISSN=0025-6455, 49 (7), pp: 1587-1599, 2014.
5. M. Bocciarelli, **V. Buljak**, V. Moy, C.K.S. Ringer, G. Ranzi: An inverse analysis approach based on a POD direct model for the mechanical characterization of metallic materials. *Computational material science* (**IF=2.188**), ISSN=0927-0256 95, pp: 302-308, 2014
6. **V. Buljak** and G. Maier: Identification of residual stresses by instrumented elliptical indentation and inverse analysis. *Mechanics research communications* (**IF=1.324**), ISSN=0093-6413, 41, pp: 21-29, 2012.
7. G. Bolzon and **V. Buljak**: An effective computational tool for parametric studies and identification problems in materials mechanics. *Computational mechanics* (**IF=2.294**), ISSN=0178-7675, 48(6), pp: 675-687, 2011.

8. V. Buljak and G. Maier: Proper Orthogonal Decomposition and Radial Basis Functions in material characterization based on instrumented indentation. *Engineering structures* (**IF=1.754**), ISSN=0141-0296, 33(2), pp:492-501, 2011.

*(навести најмање један рад у случају менторства дисертације која се пријављује до 31.12.2008. године, односно најмање три рада у случају менторства дисертације која се пријављује у периоду од 1.01.2009. до 31.12.2009. године, односно најмање пет радова у случају менторства дисертације која се пријављује почев од 1.01.2010. године)*

ДЕКАН ФАКУЛТЕТА

---