

ВЕЋУ ДОКТОРСКИХ СТУДИЈА

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата **Shwetank Pandeya**

Одлуком бр.613/2 од 15.03.2018. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата **Shwetank Pandeya**, маг.инж. технологије и механике материјала, под насловом:

„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“

Након детаљног прегледа достављене дисертације и других пратећих материјала и разговора са Кандидатом, Комисија је сачинила следећи

РЕФЕРАТ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Кандидат Shwetank Pandey, маг. инж. технологије и механике материјала, је на Докторске студије на Машинском факултету Универзитета у Београду уписан школске 2014/2015. године. После положених испита и стечених других услова, поднео је захтев бр.2519/1 од 16.10.2017. године, за одобравање израде докторске дисертације под насловом **„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“).**

Наставно-научно веће Машинског факултета Универзитета у Београду формирало је Комисију одлуком број 2519/2 од 09.11.2017. године у саставу: ван. проф. др Владимир Буљак, проф. др Милорад Милованчевић, проф. др Игор Балаћ, др Нина Обрадовић, научни саветник на Институту техничких наука САНУ, Dr. Giuseppe Cocchetti, vanredni professor na univerzitetu Politecnico di Milano, са задатком да оцени подобност теме и кандидата за израду докторске дисертације. Комисија је поднела позитиван Извештај бр.2519/3, 20.12.2017. године. Наставно-научно веће Машинског факултета у Београду је Одлуком бр.2519/4 од 21.12.2017. године прихватило предлог Комисије о испуњености услова и о научној заснованости теме докторске дисертације. Веће научних области техничких наука, Универзитета у Београду својом одлуком бр.61206-38/2-18 од 29.01.2018. дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације, а за ментора именовало ван. проф. др Владимира Буљака.

На предлог ментора ван. проф. др Владимира Буљака и Комисије за докторске студије, Наставно-научно веће Машинског факултета Универзитета у Београду, одлуком бр. 613/2 од 15.03.2018. године, именовало је Комисију за преглед, оцену и одбрану дисертације са задатком да поднесе Извештај о урађеној дисертацији кандидата ShwetankPandeya, маг. инж. технологије и механике материјала, под насловом

„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“)

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација под насловом **„Метода за калибрисање конститутивних модела за симулирање процеса пресовања керамичког праха коришћењем инверзних анализа“**) припада области техничких наука (машинство), ужа научна област Отпорност конструкција, које припадају Машинском факултету Универзитета у Београду.

Ментор, ван.проф. др Владимир Буљак је наставник на Катедри за отпорност конструкција, и објавио је преко тридесет научних радова из ове области, од којих је 13 на SCI-листи.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Shwetank Pandey је индијски држављанин, рођен је у месту Нагпур (у Индији) 04.07.1991. године. Основну и средњу школу завршио је у истом месту у Индији. Дипломирао је као инжењер технологије и материјала 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 био и запослен као сарадник на Европском пројекту FP7-CERMAT2, под руководством ван. проф. др Владимира Буљака до новембра 2017. године, у току трајања пројекта. 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, које је успешно положио, 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 овог пројекта. Учествовао је на три међународне конференције, има један рад у часопису са импакт фактором (први аутор), и један рад у часопису FME-Transactions, као и још један рад у часопису са импакт фактором који је тренутно у процесу рецензије.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација кандидата Shwetank Pandeya, под насловом „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“) урађена је на 155 страна и садржи 109 слика, 16 табела, 70 једначина и 70 референци литературе.

Дисертацију чине следећа поглавља:

1. Увод
 2. Преглед метода које се користе у пракси за калибрацију модела за пресовање праха
 3. О инверзним анализама, симулацији пресовања праха и развијеним новинама
 4. Приказ развијеног протокола за калибрацију
 5. Нумеричко-експериментални резултати
 6. Калибрација новоразвијеног комплексног модела за пресовање праха коришћењем инверзне анализе
 7. Закључак и будућа истраживања
- Литература
Прилози

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У оквиру уводног поглавља приказан је ток производње керамичких компоненти и показан значај прве фазе пресовања праха, као и њеног нумеричког моделирања. Кратко су описани тренутно коришћени приступи за нумеричко симулирање овог процеса у оквиру индустријске праксе. Овај приказ резултирао је формулисањем основних циљева докторске дисертације, научне методологије која је примењена, као и неких полазних претпоставки и хипотеза.

У поглављу „Преглед метода које се користе у пракси за калибрацију модела за пресовање“ детаљно је приказан најчешће коришћен конститутивни модел за моделирање механичког понашања керамичког праха, конкретно Drucker-Prager Cap модел. Приказани су сви параметри које је неопходно квантификовати у циљу калибрације оваквог модела, а детаљно су представљене експерименталне методе које се данас користе у ту сврху у оквиру индустријске праксе. Те исте методе касније су коришћене и у овој дисертацији у циљу успостављања референтних вредности за поређење са резултатима новоразвијене процедуре калибрације.

Поглавље „О инверзним анализама, симулацији пресовања праха и развијеним новинама“ даје детаљан приказ усвојене методологије која се заснива на инверзним анализама. Разрађена је идеја развијања методе за калибрацију која би користила само мерне вредности које се могу добити у току процеса пресовања. Тиме се избегава свако накнадно испитивање отпреска, а сам процес калибрације чини значајно бржим и ефикаснијим. Детаљно су показана три основна елемента ове процедуре: усвојени експеримент са одговарајућим мерним вредностима, нумеричка симулација експеримента и процедура математичког програмирања и циљу минимизирања дискрепанце између измерених и симулираних вредности. Понуђена је модификација постојећег Drucker-Prager Cap конститутивног модела, којом се обезбеђује зависност еластичних параметара од накупљене пластичне деформације, а сви параметри су дефинисани као функције релативне густине отпреска. Ова модификација је имплементирана у комерцијални програм ABAQUS писањем потпрограма у FORTRAN-у. Развојем овакве процедуре створена је могућност за калибрацију свих параметара као непрекидних функција релативне густине отпреска, што представља значајан напредак у односу на тренутно примењену праксу, „дискретне“ калибрације, која се односи на одређен број конкретних вредности релативних густина.

Развијена метода је даље коришћена као основ за формулисање протокола за калибрацију. Резултати овог истраживања приказани су у поглављу „Приказ развијеног протокола за калибрацију“. Формирана циљна функција је анализирана са математичке стране, и циљу осигуравања њене конвексности и јасно дефинисаног једног глобалног минимума. Како би се то постигло било је неопходно користити више различитих геометрија отпреска. Спровођењем детаљне анализе осетљивости коришћењем претходно развијеног нумеричког модела пресовања праха, извршена је оптимизација геометрије отпреска, те тако понуђене три различите геометрије отпреска. За мерне вредности изабране су криве пресовања, као и вредност радијалног напона измерене на три места са спољње стране отпреска. Овиме је понуђен протокол калибрисања чији приказ укључује дефиницију геометрије три коришћена отпреска, формирање нумеричког модела са модификованим Drucker-Prager Cap конститутивним моделом и формулисање алгорита за нумеричко решавање резултујућег проблема минимизације.

У циљу тестирања развијеног протокола калибрације, извршен је низ експеримената коришћењем мешавине праха алумине и графита, која се користи за израду ватросталних облога у ливачкој индустрији. У поглављу „Нумеричко-експериментални резултати“ изведена је систематизација и анализа свих прикупљених експерименталних података. Кандидат је све експерименте изводио у компанији Vesuvius Inc. из Белгије, која је партнер на FP7-CERMAT2 пројекту. У уводном делу поглавља најпре је приказана процедура за припрему свих узорака. Затим су показани резултати добијени на бази деструктивних испитивања отпреска праћењем тренутно примењиване процедуре у индустријској пракси, коришћени као

референтне вредности. Коначно, изведени су експерименти пресовања керамичког праха коришћењем новоразвијених геометрија отпреска и инверзне анализе како би се добила зависност свих конститутивних параметара од релативне густине. Све добијене зависности упоређене су са референтним вредностима параметара на одговарајућим релативним густинама и констатовано је одлично поклапање.

Поглавље „Калибрација новоразвијеног комплексног модела за пресовање праха коришћењем инверзне анализе“ приказује добијене резултате који се односе на калибрацију значајно сложенијег новог конститутивног модела за пресовање праха. Група са Универзитета у Тренту, такође партнер на FP7-CERMAT2 пројекту, развила је нови теоријски модел посебно намењен моделирању пресовања праха, који користи Vigoni-Piccolroaz пластичну функцију. За коришћење овог модела неопходно је квантификовати 32 конститутивна параметра. Нумеричко имплементирање овог модела у комерцијални софтвер ABAQUS, са посебним освртом на калибрисање овог модела третирано је у овој дисертацији, а добијени резултати приказани су у овом поглављу. Због изражене комплексности, нумеричка имплементација овог модела резултира нестабилним симулацијама за одређене вредности параметара, те је тако коришћење класичних алгоритама за нумеричку минимизацију отежано и резултира превеликим компјутерским временом. У циљу решавања проблема калибрација оваквог модела развијена је друга метода, која се ослања на „Генетичке алгоритме“ уз драстично смањење рачунарског времена извођења нумеричке симулације применом редукованог модела. Развијени редуковани модел заснован је на правилној ортогоналној декомпозицији, који током минимизације поступно постаје све тачнији, увођењем нових нумеричких симулација које се користе за његово „тренирање“. Ова стратегија даје значајну предност у примени на комплексне конститутивне моделе, као овде коришћени. Резултати приказани у овом поглављу потврђују могућност калибрација и оваквог модела, уз евидентирано скраћење рачунарског времена за ред величине.

У завршном поглављу приказани су изведени закључци дисертације и дате су сугестије за будућа истраживања.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

У дисертацији је као основна идеја приказана стратегија за калибрацију параметара који улазе у сложене конститутивне моделе за моделирање пресовања керамичког праха коришћењем инверзних анализа. Идеја је као таква оригинална, а за њену реализацију било је неопходно модификовати постојеће конститутивне моделе, или имплементирати нове у софтверске пакете који користе Методу коначних елемената. Конкретно у овој дисертацији коришћен је програм ABAQUS. Поред тога потребно је било развити сопствене програмске кодове и циљу решавања резултујућег проблема нумеричке минимизације, који је формулисан у оквиру примењене инверзне анализе.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Коришћена је целокупна референтна литература, међу којом су и најновији радови из међународних научних часописа који се баве различитим методама које су примењене у овој дисертацији. Имајући у виду мултидисциплинарни карактер

истраживања, консултована је релевантна научна литература која се бави проблемима конститутивног моделирања, механичке карактеризације керамичких прахова, инверзних анализа, нелинеарних симулација применом Методе коначних елемената, као и редукованих модела у циљу убрзавања симулација. Остварени резултати истраживања других радова су коректно цитирани.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

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

Нумерички алгоритми за решавање инверзног проблема засновни су на теорији математичке оптимизације. Конкретно, коришћене су методе које се заснивају на региону поверења као и друге градијентне методе за нумеричко минимизирање сложених функција. Нумеричко имплементирање развијеног алгоритма за оптимизацију извршено је у програмском окружењу MATLAB.

Све нумеричке симулације обављене су коришћењем Методе коначних елемената у програмском пакету ABAQUS. Модификација Drucker-Prager конститутивног модела урађена је писањем кода у FORTRANU.

Извођењем анализе осетљивости коришћењем нумеричке симулације експеримента, извршена је оптимизација геометрије отпреска као и селекција величина које ће бити мерене у тесту у циљу калибрације конститутивног модела.

Развијени калибрациони протокол је у наставку верификован експериментима. Изведена је серија експеримената која је укључивала стандардне методе које се користе у индустријског пракси, у циљу добијања референтних вредности, као и експерименте потребне за калибрацију модела коришћењем новоразвијене методе. Добијени резултати једним и другим путем су затим упоређени.

3.4. Применљивост остварених резултата

Реализацијом циљева ове докторске дисертације, применом наведених научних метода, остварени су резултати који имају практични и индустријски значај. Применом развијене методе могуће је извршити калибрацију конститутивних модела, који се користе у симулирању пресовања керамичког праха, коришћењем значајно мањег броја експеримената. Тиме овај процес постаје рутина, те тако чини могућим примену нумеричке симулације као помоћног алата у процесу производње керамичких компоненти. Применљивост комбиноване методе која користи Генетичке алгоритме са редукованим моделима за убрзавање нелинеарних симулација није ограничена само на проблем разматран у овој дисертацији. Овакав приступ би могао да буде користан у свим ситуацијама где се механичко понашање материјала описује комплексним конститутивним моделима које карактерише велики број параметара.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат је потпуно способан за самостални научни рад, што је потврдио радом на овој дисертацији. У току тог рада имао је прилику да ради како у академској средини на матичном факултету, тако и у индустријском окружењу у компанији Vesuvius Inc, где се упознао са најсавременијим експерименталним методама које се користе у овом сектору. У оквиру научно истраживачког рада кандидат је показао значајан степен самосталности у постављању проблема и анализи научних метода које је могуће применити у циљу његовог решавања. Рад на пројекту FP7-CERMAT2 предвиђао је шестомесечне презентације пред групом професора и истраживача из

свих 8 институција учесница на овом пројекту. Кроз овај интензивни рад кандидат је оспособљен за презентацију и академску интерпретацију добијених резултата, као и за самостално писање научних радова.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

У овој дисертацији остварени су следећи научни доприноси:

- Развијена је нова метода за карактеризацију параметара одговарајућих конститутивних модела који се могу користити за симулирање процеса пресовања керамичког праха. Ова метода користи као експерименталне податке само оне вредности које се могу измерити у току самог процеса пресовања, чиме се избегава било које накнадно тестирање отпреска, а сам процес чини значајно бржим и ефикаснијим.
- Модификацијом постојећег конститутивног модела, као и имплементацијом новог, нумеричке симулације процеса сабијања керамичког праха се могу изводити тачније. Предложено увођење функционалне зависности свих параметара модела од релативне густине, модификује постојећи Drucker-Prager Cap конститутивни модел на начин да је могуће моделирати еласто-пластични “coupling”, као и дефинисати произвољну форму “hardeninga”, односно зависности пластичних параметара од релативне густине.
- Развијен је редуковани модел којим се постиже значајно убрзавање нелинеарних симулација експеримената механичког пресовања праха. Коришћење овог модела превазилази употребу искључиво у оквиру инверзних анализа и може представљати значајну помоћ у процесу производње керамичких компоненти.
- Сумарно, резултати презентовани у овој дисертацији доприносе генерисању напретка у оквиру нумеричког симулирања процеса пресовања керамичког праха по две основе: показали су могућност коришћења сложенијих и веродостојнијих конститутивних модела, док је проблем њиховог калибрисања могуће превазићи применом развијене методе засноване на инверзним анализама.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Упркос евидентном индустријском интересу, сви процеси производње керамичких компоненти још увек нису описани адекватним математичким моделима. Ово има за последицу да се у производњи керамичких компоненти јавља релативно велики проценат шкарта, реализацијом делова који не задовољавају прописане механичке или димензионе критеријуме. Сходно томе, развојем иновативних процедура у овом сектору постиже се важна економска и еколошка корист. Значајну поправку ефикасности производње може се постићи уз коришћење реалистичних и поузданих нумеричких симулација различитих фаза производње. Резултати добијени у овој дисертацији директно се тичу прве фазе ове производње, која се односи на механичко пресовање праха. Најкомплекснији део ове симулације односи се на конститутивно моделирање механичког понашања праха у току пресовања. Развијена метода та калибрисања је значајно ефикаснија у односу на тренутно коришћене поступке у индустрији.

Овај резултат могао би да стимулише коришћење комплекснијих модела, које карактерише велики број параметара, јер је у дисертацији показано да је могуће извршити њихово калибрисање применом инверзних анализа. Примери третирани у дисертацији односе се конкретно на два модела: понуђена је модификација постојећег Drucker-Prage Cap модела, чинећи га реалистичнијим, коришћењем предности да овај модел постоји имплементиран у већини софтверских пакета заснованих на Методи коначних елемената; други разматрани модел је значајно комплекснији, и развијен је на Универзитету у Тренту а директно је намењен механичком моделирању процеса пресовања. Резултати у овој дисертацији показали су како могућност нумеричке имплементације овог модела, тако и његову калибрацију уз принему инверзних анализа.

4.3 Верификација научног доприноса

Научни допринос докторске дисертације верификован је следећим радовима:

Категорија M22:

Shwetank Pandey, Vladimir Buljak, Igor Balac: "Reduced Order Numerical Modeling for Calibration of Complex Constitutive Models in Powder Pressing Simulations" *Science of Sintering*, Vol. 49, pp: 331-345, 2017. (IF=0.834)

Категорија M24:

V. Buljak, S. Pandey and I. Balac: "Material model calibration through indentation test and stochastic inverse analysis" *FME Transactions*, Vol. 45(1), pp: 109-116, 2016.

5. ЗАКЉУЧАК

Докторска дисертација 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“), кандидата Shwetank Pandeya, представља савремен научни допринос којим је дефинисан експериментални протокол за калибрацију сложених конститутивних модела који се користе у симулацијама пресовања керамичког праха. Понуђена је модификација постојећег конститутивног модела уз дефинисање свих параметара као функција релативне густине, чиме је свеобухватно начињен оквир за коришћење веродостојнијих нумеричких симулација у процесу производње керамичких производа.

Резултатима приказаним у дисертацији потврђена је хипотеза да је за симулирање пресовања праха могуће примењивати феноменолошке конститутивне моделе који корелирају релативну густину са акумулираном пластичном деформацијом. Овакав приступ моделирању представља ефикаснију алтернативу стратегији моделирања интеракције појединачних честица праха, која неминовно проблем решава на више различитих скала, те је сходно томе нумерички захтевнија.

Анализе осетљивости спроведене у дисертацији резултирале су формулисањем три различите геометрије отпреска које су се испоставиле довољним за успешно калибрисање чак и сложених модела са бројем параметара значајно

већим од 20. Експериментална испитивања потврдила су применљивост ове методе, а добијене вредности параметара су проверене на два начина. Коришћењем ових вредности извршене су симулације пресовања произвољних сложених геометрија, и добијена су одлична подударана, чиме је потврђено да се ти параметри заиста могу третирати као репрезентативне карактеристике коришћеног праха. Други тип провере тицао се поређења са вредностима добијеним применом процедуре која се користи у данашњој индустријској пракси, а која укључује значајно сложеније експерименте. И по овом критеријуму поређења добијени су одлични резултати.

На основу прегледа докторске дисертације, Комисија за оцену и одбрану дисертације констатује да је урађена докторска дисертација написана према свим стандардима о научноистраживачком раду, као и да испуњава све услове предвиђене Законом о високом образовању и Статутом Машинског факултета Универзитета у Београду. Комисија сходно томе предлаже Научно наставном већу Машинског факултета у Београду да се докторска дисертација Shwetank Pandeya 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“) прихвати, дисертација стави на увид јавности и упути Извештај на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду, а да се након тога кандидат позове на јавну одбрану.

Београд, 16.4.2018. године

Чланови Комисије за оцену и одбрану дисертације

ван. проф. др Владимир Буљак, ментор
Машински факултет Београд

проф. др Милорад Милованчевић,
Машински факултет Београд

проф. др Игор Балаћ,
Машински факултет Београд

др Нина Обрадовић, научни саветник на Институту техничких наука САНУ

dr Giuseppe Cocchetti, vanredni profesor na univerzitetu
Politecnico di Milano