

Факултет Машински

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

654/4
(Број захтева)Веће научних области техничких наука
(Назив већа научне области коме се захтев
упућује)05.06.2025.
(Датум)**ЗАХТЕВ****за давање сагласности на одлуку о прихватању теме докторске дисертације и
о одређивању ментора**

Молимо да, сходно члану 47. ст. 5. тач. 3. Статута Универзитета у Београду ("Гласник Универзитета", број 186/15-пречишћени текст и 189/16), дате сагласност на одлуку о прихватању теме докторске дисертације:

**РАЗВОЈ НУМЕРИЧКОГ АЛАТА ЗА ТОПОЛОШКУ ОПТИМИЗАЦИЈУ ПОЛУ-КРТИХ
МАТЕРИЈАЛА СА АДАПТИВНИМ УБАЦИВАЊЕМ КОХЕЗИВНИХ ЕЛЕМЕНАТА
NUMERICAL FRAMEWORK FOR TOPOLOGY OPTIMIZATION OF QUASI-BRITTLE
MATERIALS WITH ADAPTIVE INSERTION OF COHESIVE ELEMENTS**

(пун назив предложене теме докторске дисертације)

НАУЧНА ОБЛАСТ: Машинство (ужа научна област: Отпорност конструкција)

ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ:

1. Име, име једног од родитеља и презиме кандидата: ДОМАГОЈ (АНТУН) УРЕМОВИЋ
2. Претходно образовање (назив и седиште факултета, студијски програм):
Факултет за стројарство и бродоградњу Универзитета у Загребу
3. Година завршетка претходног нивоа студија: 2020.
4. Година уписа на докторске студије: 2021.
5. Назив студијског програма докторских студија: Машинско инжењерство

ПОДАЦИ О МЕНТОРУ:

Име и презиме ментора: Владимир БуљакЗвање: редовни професор

Списак радова који квалификују ментора за вођење докторске дисертације:

1. Stanfield Austin, Smith Steven, Filipovic Suzana, Obradovic Nina, Buljak Vladimir, Hilmas Gregory, Fahrenholtz William, Final-stage densification kinetics of direct current-sintered ZrB₂, Journal of the American Ceramic Society, 2023, 106(10): 5654-5661, ISSN: 0002-7820 (IF=3.7)

2. Buljak Vladimir, Severine Bavier-Romero, Achraf Kallel, Calibration of drucker-prager cap constitutive model for ceramic powder compaction through inverse analysis, Materials, 2021, 14(14): 1-19, ISSN: 1996-1944 (IF=4.04)

3. Buljak Vladimir, Oesch Tyler, Bruno Giovanni, Simulating fiber-reinforced concrete mechanical performance using CT-based fiber orientation data, Materials, 2019, 12(5): 1-15, ISSN: 1996-1944 (IF=3.42)

4. Obradovic Nina, Fahrenholtz William, Filipovic Suzana, Corlett Cole, Đorđević Pavle, Rogan Jelena, Vulić Predrag, Buljak Vladimir, Pavlović Vladimir, Characterization of MgAl₂O₄ sintered ceramics, Science of sintering, 2019, 51(4): 363-376, ISSN: 0350-820X (IF=1.17)

5. Buljak Vladimir, Giovanni Bruno, Numerical modeling of thermally induced microcracking in porous ceramics: An approach using cohesive elements, Journal of the European Ceramic Society, 2018, 38(11): 4099-4208, ISSN: 0955-2219 (IF=4.03)

Обавештавамо вас да је Наставно – научно веће на седници одржаној 05.06.2025. године размотрило предложену тему и закључило да је тема подобна за израду докторске дисертације јер садржи оригиналну идеју и да је од значаја за развој науке, примену њених резултата , односно развој научне мисли уопште.

ДЕКАН ФАКУЛТЕТА

Прилог:

1. Одлука Наставно-научног већа о прихватању теме и одређивању ментора
2. Извештај Комисије о оцени научне заснованости теме докторске дисертације

Напомена:

Факултет доставља Универзитету захтев са прилозима у електронској форми и једном писаном примерку за архиву Универзитета

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ -
Број: 654/4
Датум: 05.06.2025. године
Београд, Краљице Марије 16

На основу члана 40. Закона о високом образовању („Службени гласник РС“, број 88/2017, 73/2018, 27/2018 – др. закон 67/2019, 6/2020 – др. закони, 11/2021 – аутентично тумачење, 67/2021, 67/2021 – др. закон и 76/2023), члана 64. Статута Машинског факултета – пречишћени текст (број 1136/4 од 28.06.2021. године), Одлуке о изменама и допунама Статута број 239/6 од 17.02.2023. године и члана 38. Правилника о докторским студијама на Универзитету у Београду - Машинском факултету, Наставно-научно веће Машинског факултета на седници од 05.06.2025. године донело је:

О Д Л У К У
о прихватању Извештаја Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације

Прихвата се Извештај Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације кандидата **Домагоја Уремовића**, маг. инж. маш. под насловом „Развој нумеричког алата за тополошку оптимизацију полу-кртих материјала са адаптивним убацивањем кохезивних елемената (Numerical framework for topology optimization of quasi-brittle materials with adaptive insertion of cohesive elements)“

Извештај је поднела Комисија у саставу: др Игор Балаћ, ред. проф., др Весна Милошевић-Митић, ред. проф. и др Сузана Филиповић, научни саветник, Институт техничких наука Српске Академије наука и уметности.

За ментора докторске дисертације именује се др Владимир Буљак, ред. проф.

Одлуку доставити: Универзитету у Београду, кандидату, ментору и архиви Факултета.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

проф. др Владимир Поповић

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Извештај о научној заснованости теме докторске дисертације кандидата Домагоја Уремовића, магист.инж.маш.

Одлуком Наставно-научног већа Универзитета у Београду - Машинског факултета бр. 654/2 од 15.5.2025. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације под називом „Развој нумеричког алата за тополошку оптимизацију полу-кртих материјала са адаптивним убацивањем кохезивних елемената“ (**Numerical framework for topology optimization of quasi-brittle materials with adaptive insertion of cohesive elements**) кандидата Домагоја Уремовића, магист.инж.маш.

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Домагој Уремовић рођен је у Загребу, у Републици Хрватској 10.10.1994. године. У свом родном граду завршио је основну школу Врбани, а затим и 5. Гимназију, информатичко-математички смер, обе са одличним успехом.

По завршетку гимназије, 2013. године, кандидат уписује Основне академске студије на Факултету стројарства и бродоградње Универзитета у Загребу. Студије трају седам семестара, а кандидат их је успешно завршио дипломиравши са просечном оценом током студија 4,24/5 (четири и двадесетчетири стота), након чега уписује Мастер академске студије, смер Рачунарски инжењеринг, на истом факултету, у трајању од три семестра. Дипломирао је 2019. године са просечном оценом 4,65/5 (четири и шездесетпет стотина) оствареном у току Мастер академских студија. Током студија, поред редовних обавеза, кандидат је био изузетно ангажован у ваннаставним активностима. Као посебан допринос издваја се учешће у реализацији пројекта под називом „Развој и израда протетског помагала за инвалидског пса“, за који му је додељена Ректорова награда за индивидуални научни рад. Од друге године основних студија, па све до дипломирања, ангажован је као студент-демонстратор на предметима: Механика, Елементи машинских конструкција и Конструисање помоћу рачунара. Такође је био веома активан у раду

локалне канцеларије Европског студентског удружења ESTIEM, где је у два мандата обављао функцију локално одговорне особе у управи удружења.

По завршетку студија, кандидат се запошљава у аустријској компанији *Smart Lift*, где ради током једне године на пословима развоја производа за аутомобилску индустрију. Након тога запошљава се у загребачком представништву америчке компаније *Vertiv*, где се бави прорачунима конструкција у оквиру развоја малих електричних уређаја. Од децембра 2021. године запослен је на Универзитету у Београду – Машинском факултету као сарадник на европском пројекту RE-FRACTURE2, који се реализује у оквиру програма *Horizon 2020*. Тада се уписује и на Докторске студије на Универзитету у Београду – Машинском факултету. На овом пројекту је био ангажован до краја 2024. године. У том периоду провео је два месеца у компанији *Vesuvius* у Белгији као и годину дана у компанији *CAEmate S.R.L.* из Италије. Ове компаније су партнери на истом RE-FRACTURE2 пројекту. Почетком 2025. године запошљава се у компанији *NKE Bearings GmbH* из Аустрије, где и данас обавља своје професионалне дужности. Усмерен је на развој математичких модела за предвиђање века трајања лежачева чији су котрљајни елементи израђени од керамичких материјала.

Домагој Уремовић течно говори, чита и пише хрватски и енглески језик, а активно се служи и немачким језиком. Његове професионалне вештине обухватају познавање широког спектра софтверских алата, неопходних како за инжењерску праксу, тако и за научноистраживачки рад у области нумеричке механике. Напредно користи следеће рачунарске пакете и програмске језике: ABAQUS, MATLAB, FORTRAN, Python и CATIA. Од свог детињства се бави каратеом и носилац је црног појаса. Домагој Уремовић је ожењен и отац је једногодишње ћерке.

1.2. Стечено научно-истраживачко искуство

Кандидат Домагој Уремовић уписао је Докторске академске студије на Универзитету у Београду – Машинском факултету у академској 2021/2022. години. Његова посвећеност научноистраживачком раду резултирала је веома успешном реализацијом програма усавршавања, те је у академској 2022/2023. години уписао другу, а затим у 2023/2024. години и трећу, завршну годину студија. Програм усавршавања обухватао је следеће предмете, које је кандидат успешно положио током прве две године студија:

Ред. Бр.	Сем.	Предмет	ЕСПБ	Оцена
1.	1.	Мерење деформација и напона	5	10 (десет)
2.	1.	Теорија еластичности	5	9 (девет)
3.	1.	Истраживање и публиковање 1	10	10 (десет)
4.	2.	Метода коначних елемената	5	10 (десет)
5.	2.	Механика композитних материјала	5	10 (десет)
6.	2.	Виши курс линеарних система	5	10 (десет)
7.	2.	Истраживање и публиковање 2	15	10 (десет)
8.	3.	Термоеластичност	5	10 (десет)
9.	3.	Инверзне анализе за карактеризацију материјала	5	10 (десет)
10.	3.	Замор и процена века ваздухопловних конструкција	5	10 (десет)
11.	3.	Нелинеарни коначни елементи у МКЕ	5	10 (десет)

12.	3.	Истраживање и публиковање 3	20	10 (десет)
13.	4.	Истраживање и публиковање 4	8	10 (десет)
14.	4.	Пројекат идеје докторске дисертације	22	10 (десет)

Поред успешне реализације предвиђеног програма усавршавања, кандидат је успешно савладао и интерни програм усавршавања који је био предвиђен у оквиру програма пројекта RE-FRACTURE2. Овај програм подразумевао је укупно две летње школе које су се одржале на универзитету у Тренту а укључивале су следеће предмете:

Садржај Прве летње школе у оквиру пројекта RE-FRACTURE2

Ред. Бр.	Предмет	Часова предавања
1.	Nonlinear solid mechanics	20
2.	Extreme mechanics	20

Садржај Друге летње школе у оквиру пројекта RE-FRACTURE2

Ред. Бр.	Предмет	Часова предавања
1.	Advanced computational mechanics	20
2.	Constitutive modeling of advanced materials: numerical implementation	20
3.	Exploiting of intellectual property rights	20

Предмети који су се обрађивали у оквиру две летње школе обухватили су предавања реномираних стручњака из целог света. Због специфичне организације програма, класично полагање испита није било предвиђено. Уместо тога, докторанди који су учествовали у летњим школама заједнички су радили на унапред дефинисаним пројектима, које су на завршетку курса јавно презентовали.

Кандидат је активно учествовао и у другим научноистраживачким активностима организованим у оквиру пројекта RE-FRACTURE2, као и на међународним скуповима који се баве темама релевантним за истраживање обрађено у овој дисертацији. У наставку се налази преглед остварених релевантних резултата.

Саопштења са међународног скупа штампано у изводу:

[1] Domagoj Uremović, Algorithm for automatic insertion of cohesive elements for simulation of brittle materials, *Minisymposium Modeling & Simulations within the Advanced Ceramics and Application Conference X*, Belgrade, Serbia, September 26-27, 2022.

[2] Domagoj Uremović, Vladimir Buljak, Algorithm for anticipating crack path trajectory, *Mathematics and Mechanics of Solids and Structures*, Aberystwyth, Wales, UK, June 7-9, 2023.

[3] Domagoj Uremović, Vladimir Buljak, Predicting crack path trajectory based on iterative cohesive element insertion with adaptive mesh refinement in the context of two-phase topology optimization. *European Conference on Fracture*, Zagreb, Croatia, August 26-30, 2024.

[4] Domagoj Uremović, Topology optimization of two-phase ceramic for maximizing energy dissipation during cracking, *Workshop within RE-FRACTURE2 project*, Belgrade, Serbia, December 4-5, 2024.

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

Кандидат Домагој Уремовић, мастер инжењер машинства, својим досадашњим радом, а посебно ангажовањем у оквиру европског пројекта RE-FRACTURE2, показао је изузетну заинтересованост, посвећеност и способност за самостално обављање научноистраживачког рада. Његово учешће у различитим активностима предвиђеним овим пројектом, као и наступи на више међународних конференција, указују на значајан истраживачки потенцијал и развијене комуникационе вештине, које му омогућавају активно учешће у широј међународној научној заједници. Објављени научни резултати директно су повезани са темом ове дисертације.

Сходно наведеном, према мишљењу Комисије, кандидат је показао способност да самостално и успешно спроведе сва теоријска и експериментална истраживања неопходна за реализацију предложеног научноистраживачког програма у оквиру ове дисертације. Комисија сматра да ће овај истраживачки рад резултирати значајним доприносом и научном новином у релевантној области.

2. Предмет и циљ истраживања

Керамички материјали имају веома широку примену у великом броју различитих индустријских грана. Посебан значај има њихова примена у виду термичких баријера, било као заштита структурних компонената од пожара, било као облоге у процесима ливења метала. У оваквим применама, керамички материјали су изложени екстремним радним условима који укључују интензиван термички шок и рад на веома високим температурама у изразито оксидишућој средини.

У таквим условима, структурне компоненте након одређеног времена експлоатације почињу да попуштају услед формирања система микроруптура, који временом доводи до развоја макроскопских руптура, чиме се у потпуности нарушава њихова функционалност. У циљу спречавања великих губитака и материјалне штете, од изузетног је значаја да се компоненте које се користе у ливницама метала замењују пре него што дође до њихове потпуне деградације [1-3]. За ефикасно предиктивно одржавање ових компоненти, неопходна је што прецизнија процена времена њиховог отказа, како би се благовремено извршила замена.

Процену времена експлоатације принципијелно је могуће извршити применом нумеричке симулације целокупног процеса. Како би тако добијени резултати били што веродостојнији, неопходно је да усвојени математички модели што верније описују физичку природу појава које се одвијају. У циљу повећања времена експлоатације, могуће је извршити систематску оптимизацију одговарајуће компоненте. У ту сврху, у савременој пракси веома популарна и ефикасна методологија која се може применити јесте метода оптимизације топологије, на енглеском: *topology optimization* (ТО) [4]. У последње време ТО налази широку примену у аерокосмонаутици [5, 6], у развоју нових композитних материјала [7], оптимизације композитних конструкција већих димензија [8], у грађевинским конструкцијама [9], као и многим другим инжењерским и научним дисциплинама [10-12]. За примену ове методе у контексту који се овде разматра, потребно је обезбедити нумерички оквир за извођење симулација које укључују настанак руптура. Прегледом релевантне литературе уочава се да је мало радова посвећено примени ТО у комбинацији са симулацијама које обухватају појаву руптура.

Извођење нумеричких симулација са могућношћу дисконтинуитета поља померања услед појаве руптура могуће је реализовати на више начина. Метода која је изабрана у оквиру ове студије заснива се на примени кохезивних елемената [13-15]. Поред изабране методе, за симулацију механике лома алтернативно је могуће користити и проширену методу коначних

елемената *Extended Finite Element Method*, (XFEM) [16, 17], као и локализоване моделе оштећења, као што је приказано у [18]. Приступ моделирању са кохезивним елементима пружа предност ефикасне примене како у тродимензионалним симулацијама, тако и у случајевима када је присутно комбиновано еласто-пластично понашање околног материјала.

Иако су кохезивни елементи веома ефикасни за имплементацију у моделе коначних елемената, њихова мана је у томе што пукотина може напредовати искључиво дуж праваца у којима су кохезивни елементи *a priori* уметнути. Овај проблем је препознат у литератури, те су спроведена бројна истраживања у циљу његовог превазилажења. Један од приступа који смањује зависност резултата од усвојене мреже коначних елемената заснива се на уметању кохезивних елемената дуж свих граница између коначних елемената. Овакав метод је примењен у радовима [19] и [20]. Применом овог приступа, кохезивни елементи се постављају дуж великог броја различитих праваца, чиме се знатно умањује зависност резултата од усмерености и структуре мреже. Ипак, ова метода је рачунски захтевна, будући да велики број кохезивних елемената буде постављен и у оним деловима прорачунског домена у којима до настанка пукотина не долази. Сличан приступ примењен је у раду [21] где је кобинован конститутивни модел локалног оштећења материјала са кохезивним елементима.

У свим поменутих радовима присутна је извесна зависност резултата од усвојене мреже коначних елемената. Приступ који ће бити усвојен у овом истраживању заснива се на развоју алгорита за адаптивно уметање кохезивних елемената унутар прорачунског домена. Овакав алгоритам биће итеративан и треба да обезбеди више предности, од којих је најважнија могућност потпуног елиминисања зависности резултата од мреже коначних елемената. Поред тога, овај приступ представља добру основу за интеграцију са методом тополошке оптимизације (ТО), која је такође по природи итеративна.

Предмет истраживања ове дисертације је моделирање и системска оптимизација керамичких компонената намењених за примену у екстремним условима, са посебним освртом на примену тополошке оптимизације. Истраживање ће бити усмерено на развој напредних нумеричких алата способних да адекватно симулирају развој и еволуцију система пукотина у кртим материјалима, при чему се посебна пажња посвећује минимизацији зависности добијених резултата од усвојене нумеричке мреже.

Основни изазов који се разматра у оквиру овог истраживања јесте поуздано праћење процеса настанка и ширења пукотина унутар керамичких компонената под утицајем сложених термомеханичких оптерећења. За решавање овог проблема предлаже се употреба кохезивних елемената који ће се адаптивно уметати у мрежу коначних елемената, на оним местима унутар прорачунског домена где су испуњени одговарајући критеријуми за иницијацију оштећења. Такав приступ омогућава локализовано моделирање пукотина без потребе за глобалним рафинирањем мреже, чиме се значајно побољшава ефикасност и тачност симулација.

Након имплементације и валидације ових адаптивних техника, развијени нумерички алати ће бити интегрисани у оквир методологије тополошке оптимизације, са циљем пројектовања геометријски и структурно оптималних компонената. Тиме се омогућава не само рационалнија употреба материјала, већ и унапређена механичка понашања у погледу отпорности на појаву и ширење пукотина.

Крајњи резултат овог истраживања би требало да буде развој свеобухватног нумеричког окружења, односно оптимизационог алгорита, способног да у контексту реалних оптерећења врши тополошку оптимизацију компонената од кртих материјала. Овај алгоритам ће, укључивати и критеријуме везане за отпорност на отказ, што ће омогућити прецизније предвиђање животног

века компонената изложених екстремним условима рада, као што су високе температуре, термички шокови и/или агресивна средина.

Имајући у виду све претходно наведено, основни циљеви истраживања у оквиру ове докторске дисертације формулисани су на следећи начин:

1. Развој алгоритма за адаптивно уметање кохезивних елемената у прорачунски домен, на основу дефинисаних критеријума за иницијацију пукотина, са циљем реалистичнијег и прецизнијег моделирања процеса оштећења у кртим материјалима.
2. Адаптација развијеног алгоритма за сценарије који подразумевају истовремену појаву више пукотина, као и за случајеве заустављања њиховог напредовања и гранања већ постојећих пукотина, уз очување нумеричке стабилности и прецизности модела.
3. Развој методе тополошке оптимизације расподеле два различита материјала унутар задатог домена, у циљу максимализације енергије дисипације услед формирања мреже пукотина под дејством комбинованих термо-механичких оптерећења.
4. Примена и валидација предложене методологије кроз оптимизацију конкретних инжењерских компонената, са циљем повећања њихове отпорности на термички шок и продужења радног века у екстремним условима експлоатације.

У наставку је дат преглед релевантне литературе која се бави поменутом проблематиком.

2.1.Преглед и анализа литературе

- [1] W.D. Kingery, Factors affecting thermal stress resistance of ceramic materials, *Journal of American Ceramic Society*, 1955, 38: 3–15.
- [2] D.P.H. Hasselman, Unified theory of thermal shock fracture initiation and crack propagation in brittle ceramics, *Journal of American Ceramic Society*, 1969, 52: 600–604.
- [3] D.P.H. Hasselman, Elastic energy at fracture and surface energy as design criteria for thermal shock, , *Journal of American Ceramic Society*, 1963, 46: 535–540.
- [4] M.P. Bendsoe, O. Sigmund, *Topology optimization: methods and applications*, 2003, Springer Verlag, Berlin.
- [5] Ji-Hong Zhu, Wei-Hond Zhang, Liang Xia, Topology optimization in aircraft and aerospace structures design, *Ach. Computational Method Engineering*, 2016, 23: 595-622.
- [6] S. Satya Hanush, M. Manjaiah, Topology optimization of aerospace part to enhance the performance by additive manufacturing process, *Materials Today*, 2022, 62(14): 7373-7378.
- [7] A. Clausen, F. Wang, J. Jensen, O. Sigmund, J.A. Lewis, Topology optimized architectures with programmable Poisson's ratio over large deformation, *Advanced Materials*, 2015, 27(37): 5523-5527.
- [8] R.O.S.S. da Costa S.T. Pinho, Topology optimization for robust design of large composite structures, *Composite Structures*, 2023, 321: 1-17.
- [9] L. Mei, Q. Wang, Structural optimization in civil engineering: A literature review, *Buildings*, 2021, 11(2): 1-27.

- [10] A.H. Frederiksen, A. Dalklint, O. Sigmund, K. Paulios, Improved third medium formulation for 3D topology optimization with contact, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2025, 436: 1-18.
- [11] V. Cool, O. Sigmund, N. Aage, Metamaterial design with vibroacoustic bandgaps through topology optimization, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2025, 436: 1-22.
- [12] L. Xia, L. Zhang, Q. Xia, T. Shi, Stress-based topology optimization using bi-directional evolutionary structural optimization method, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2010, 199(45-48): 2876-2891.
- [13] M. Ortiz and A. Pandolfi, Finite-deformation irreversible cohesive elements for three-dimensional crack-propagation analysis, *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, 1999, 44(9): 1267–1282.
- [14] V. Buljak, G. Cocchhetti, G. Maier, Calibration of brittle fracture models by sharp indenters and inverse analysis, *International journal of Fracture*, 2013, 184: 123-136.
- [15] V. Buljak, G. Bruno, Numerical modeling of thermally induced microcracking in porous ceramics: An approach using cohesive elements, *Journal of the European Ceramic Society*, 2018, 38: 4099-4108.
- [16] N. Moes, J. Dolbow, and T. Belytschko, A finite element method for crack growth without remeshing, *International Journal of Numerical methods in Engineering*, 1999, 46(1): 131–150.
- [17] Amir R. Khoei, *Extender Finite Element Method: Theory and Applications*, John Wiley & Sons, New York, 2014.
- [18] V. Buljak, T. Oesch, G. Bruno, Simulating Fiber-Reinforced Concrete Mechanical Performance Using CT-Based Fiber Orientation Data, *Materials*, 2019, 12(717): 1:16.
- [19] R. Durand and F. H. B. T. da Silva, A Coulomb-based model to simulate concrete cracking using cohesive elements, *International Journal of Fracture*, 2019. 220(1): 17–43.
- [20] I. Guimatsia, B. G. Falzon, and G. A. O. Davies, Automatic Insertion of Cohesive Elements for Delamination Modelling, *KEM*, 2008, 383: 53–66.
- [21] P. Zobec and J. Klemenc, Yet Another Approach to Fatigue Crack Growth Simulation, *Metals*, 2022, 12(4): 1-17.
- [22] H. A. Adamu, B. O. Saume, A. Joseph, S.S. Okon, I. I. Kirim, Production and optimization of the refractory properties of blended Nigerian clay for high-temperature application; a non-stochastic optimization approach, *Functional Composites and Structures*, 2023, 5: 1-12.
- [23] Y. Sun, P. Huang, Y. Cao, G. Jian, Z. Yuan, D. Bai, X. Liu, Multi-objective optimization design of ladle refractory lining based on genetic algorithm, *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2022, 10: 1-18.
- [24] M. Mouiya, *Thermomechanical properties of refractory materials, influence of the diffuse microcracking*, PhD Thesis at University of Limoges, 2024.
- [25] L. Jiang, X. Chen, G. Han, Y. Meng, Effect of additives on properties of aluminium titanate ceramics, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, 21(7): 1574:1579.
- [26] W. Chen, A. Shui, Q. Shan, J. Lian, C. Wang, J. Li, The influence of different additives on microstructure and mechanical properties of aluminum titanate ceramics. *Ceramics International*, 2021, 47(1): 1169-1176.
- [27] M. Bocciarelli, G. Bolzon. Indentation and imprint mapping for the identification of interface properties in film-substrate systems. *International Journal of Fracture*, 2009, 155: 1-17.

Керамички материјали који се користе као термичке облоге у системима за ливење метала изложени су екстремним радним условима, које карактеришу изузетно високе температуре и оксидишућа атмосфера. Такви услови значајно скраћују радни век ових компоненти. Ова

проблематика је дуго била у фокусу истраживача, што потврђују бројни радови, од којих неки датирају још из друге половине прошлог века [1–3].

Код оваквих система готово је увек неопходно примењивати превентивно одржавање, односно замену потрошних термичких облога пре него што дође до њиховог отказа. У циљу што ефикасније превенције, неопходно је располагати што прецизнијим моделима који предвиђају појаву отказа. Фокус ових модела је на што тачнијем предвиђању свеобухватног одговора компоненте на термомеханичка оптерећења [3]. Код компонената изложених оваквим радним условима, временом долази до појаве пукотина које се, током експлоатације, постепено увећавају до критичних димензија. Након достизања те границе, долази до наглог ширења пукотине и коначног отказа компоненте.

У циљу смањења трошкова производње, значајни напори усмеравају се ка повећању отпорности керамичких материјала на оптерећења изазвана термичким шоком. У последњој деценији објављен је велики број радова у којима се аутори баве проблемом оптимизације микроструктуре материјала, са циљем добијања материјала веће отпорности на термички шок (види нпр. референце [22–26]). Овакви приступи, иако свеобухватни јер повезују крајње перформансе материјала са могућностима њихове производње, веома су скупи и захтевни, јер укључују велики број различитих експеримената.

Алтернативни приступ претходно поменутом, који је усвојен у овој дисертацији, односи се на коришћење нумеричке симулације у циљу постизања оптималног решења. Овакав приступ пружа бројне предности и свакако представља исплативију опцију, јер не укључује велики број експеримената нити производњу различитих композиција материјала. Са друге стране, за његову ефикасну имплементацију неопходно је располагати поузданим и прецизним математичким моделима, који су у стању да са довољном тачношћу предвиђају понашање материјала у задатим термомеханичким условима.

Основна методологија оптимизације која је изабрана у овој дисертацији је метода тополошке оптимизације (ТО, енгл. *Topology Optimization*). Ова метода је у последњих 10 до 20 година стекла велику популарност и примењивана је у различитим научним и инжењерским контекстима. Успешни примери примене ТО методе у области оптимизације компонената у аерокосмичкој индустрији могу се наћи у радовима [5, 6], док се примена у грађевинској индустрији обрађује у радовима [9–11]. Примери блиски предмету овог истраживања укључују рад [7], у коме је метода коришћена за оптимизацију полимерних материјала са циљем постизања жељених еластичних карактеристика, као и рад [8], који се бави оптимизацијом композитних материјала.

Већина наведених примена ТО методологије односи се на материјале који остају унутар еластичног домена. Међутим, у оквиру ове дисертације, потребно је применити ТО методу у контексту у којем материјал напушта еластично понашање и долази до формирања већег броја пукотина. Оваква ситуација подразумева бројне изазове које је неопходно превазићи ради успешне интеграције ТО методологије са нумеричким методама за симулацију настанка и развоја пукотина у структурама.

У циљу извођења нумеричких симулација методом коначних елемената, са могућношћу симулирања дисконтинуитета у пољу померања услед појаве пукотине, могуће је применити више

различитих приступа. Критеријуми лома и пропагације пукотине, засновани на кохезивним моделима лома (енгл. *Cohesive crack models*), најефикасније се имплементирају путем тзв. кохезивних елемената. Ови елементи имају широку примену у симулацијама које обухватају крте ломове [14] или полукрте ломове [19], [20], [27], а такође их је могуће ефикасно имплементирати и у тродимензионалне симулације [13]. Алтернативно, могуће је применити коначне елементе са модификованим функцијама интерполације померања који дају могућност дисконтинуитета поља померања у оквиру самог елемента. Овај приступ чини тзв. проширену методу коначних елемената (енг. *Extended finite element method - XFEM*), али је значајно сложенији за примену на тродимензионалним доменима у односу на претходно поменути кохезивни елементи [16, 17]. Робустан и рачунски ефикасан приступ моделовању напредовања пукотине кроз континуум могуће је остварити и применом феноменолошких модела, као што је приказано у радовима [18] и [28]. Међутим, оваквим приступом се губи могућност јасног праћења геометрије пукотине, при чему се ефекат њеног присуства просечно распоређује у оквиру одређене прорачунске зоне.

Основни недостатак метода код којих се геометрија пукотине експлицитно идентификује (попут XFEM-а или кохезивних елемената) огледа се у снажној зависности решења од усвојене мреже коначних елемената. Код XFEM методе, пукотина се може ширити само преко оних елемената код којих је извршена модификација интерполационих функција померања. Уколико се ова модификација примени на све елементе у мрежи, ефикасност методе се значајно смањује, нарочито у случајевима прорачуна тродимензионалних модела [17]. Са друге стране, кохезивни елементи имају урођену зависност решења од мреже коначних елемената, јер се пукотина може ширити само дуж унапред дефинисаних праваца, тј. локација на којима су кохезивни елементи постављени. О овој проблематици детаљније се расправља у раду [15].

Један од основних циљева истраживања планираног у оквиру ове дисертације јесте развој методе за прорачун настанка и напредовања пукотине унутар прорачунског домена, при чему ће се težити минималној зависности резултата од усвојене мреже коначних елемената. Као основна метода за симулацију напредовања пукотине биће усвојени кохезивни елементи, али ће се развити алгоритам који омогућава њихово адаптивно убацавање у прорачунски домен — на местима и дуж праваца где прорачуном буде утврђено да су испуњени критеријуми лома.

Развијени алгоритам биће потом имплементиран у оквиру тополошке оптимизације, са циљем формулисања компонената које показују већу отпорност на оптерећења изазвана термичким шоком. Планирано је да се развијена методологија примени у процесу пројектовања керамичких компонената које се користе као облоге у системима за ливење метала. Предмет оптимизације биће одређивање оптималне расподеле двокомпонентног керамичког праха унутар прорачунског домена који дефинише геометрију одговарајуће облоге.

3. Полазне хипотезе

На основу претходно изложеног предмета и циљева истраживања у оквиру предложене дисертације, као и након детаљне анализе релевантне научне литературе, формулисане су следеће полазне хипотезе истраживања:

1. Могуће је изводити нумеричку симулацију применом методе коначних елемената уз употребу кохезивних елемената који се адаптивно убацују у прорачунски домен по

потреби, на основу резултујућег поља напона, чиме се обезбеђује реалистичније моделирање иницирања и развоја пукотина.

2. Термо-механичко понашање керамичких материјала који се користе као термичке облоге може се са довољним степеном тачности описати конститутивним моделима који укључују еласто-пластично понашање у комбинацији са кохезивним елементима. Ови елементи омогућавају симулацију дисконтинуитета у пољу померања, насталих као последица иницирања и ширења већег броја пукотина унутар прорачунског домена.
3. Могуће је произвести компоненте сачињене од две различите фазе керамичког праха, при чему се масени удео сваке фазе може просторно мењати унутар саме компоненте.
4. Метода тополошке оптимизације може се успешно применити у контексту симулација које укључују појаву и развој пукотина, уз примену развијеног нумеричког оквира који адекватно третира нелинеарно понашање материјала и процесе оштећења.

4. Научне методе истраживања

Истраживања, која се планирају у оквиру ове дисертације су мултидисциплинарна и сходно томе планира се примена различитих метода истраживања. Неке од најважнијих биће следеће:

- Методе компилације и класификације, која ће се користити у уводном делу истраживања ради систематизације и анализе актуелних научноистраживачких достигнућа у предметној области истраживања.
- Нумеричке методе усмерене на имплементацију кохезивних елемената у прорачунски домен, са циљем развоја модела који омогућавају симулацију дисконтинуитета у пољу померања услед иницирања и ширења прскотина.
- Итеративне методе имплементирања сложеног нееластичног и термоеластичног понашања материјала солвере методом коначних елемената.
- Методе тополошке оптимизације у циљу развоја алгоритма за систематску оптимизацију понашања компонената како би имале већу отпорност на термички шок.
- Експерименталне методе које се користе за карактеризацију понашања полукрних материјала у постеластичном домену, као што су савијање греде у три тачке.

5. Очекивани научни дошпринос

Имајући у виду претходно дефинисане циљеве истраживања и формулисане полазне хипотезе, као и примену одговарајућих научних метода, очекује се да планирано истраживање у оквиру ове дисертације резултира следећим научним новинама:

- Развој нове методологије тополошке оптимизације која ће омогућити пројектовање и оптимизацију керамичких компонената изложених екстремним термо-механичким условима, са циљем унапређења њихове отпорности на термички шок.
- Формулисање алгоритма за адаптивно убацивање кохезивних елемената у прорачунски домен, чиме ће се омогућити реалистично моделирање иницирања и ширења пукотина уз минималну зависност резултата од усвојене мреже коначних елемената.

Поменуте научне новине значајно ће допринети унапређењу процеса пројектовања и производње керамичких компонената, омогућавајући бржи, ефикаснији и економичнији развој без потребе за производњом и испитивањем великог броја међурешења током поступка оптимизације. Развијени нумерички оквир биће у функцији виртуелне лабораторије, у којој се могу спроводити симулације процеса оптимизације у циљу побољшања перформанси компонената. Саставни део овог оквира представља и алгоритам за адаптивно убацивање кохезивних елемената у прорачунски домен, који има широку примену и ван непосредног оквира истраживања представљеног у дисертацији. Овим алгоритмом била би омогућена знатно робуснија симулација проблема механике лома, при чему би се у великој мери елиминисала зависност решења од структуре и густине усвојене мреже коначних елемената, што представља један од кључних изазова у овој области.

6. План истраживања и структура рада

Планирано истраживање биће спроведено кроз следеће, међусобно повезане фазе, при чему се свака фаза надовезује на резултате претходних корака. Фазе истраживања су следеће:

1. **Детаљан преглед литературе:** спровођење свеобухватне анализе постојећих научних достигнућа у области нумеричких симулација керамичких компонената изложених термичком шоку, са посебним фокусом на методе симулације иницирања и развоја прскотина унутар материјала.
2. **Анализа литературе у области тополошке оптимизације:** извршење детаљног прегледа литературе која се односи на примену тополошке оптимизације у проблемима који укључују појаву и развој пукотина, као и интеграцију ове методологије у сложене нумеричке моделе.
3. **Развој алгоритма за адаптивно инсертовање кохезивних елемената:** формулисање и имплементација алгоритма за аутоматско убацивање кохезивних елемената у прорачунски домен, на основу евалуације поља напона, у циљу

симулације иницирања и напредовања пукотина уз минималну зависност решења од усвојене мреже коначних елемената.

4. **Унапређење алгоритма за сценарије са више пукотина:** адаптација алгоритма на комплексније сценарије који укључују појаву више пукотина, њихово гранање, интеракцију и потенцијално заустављање напредовања унутар прорачунског домена.
5. **Развој алгоритма за тополошку оптимизацију у присуству пукотина:** имплементација тополошке оптимизације у оквиру нумеричког оквира који предвиђа појаву оштећења. Тестирање алгоритма кроз више студија случаја у циљу процене његове ефикасности и робусности.
6. **Интеграција термо-механичког оптерећења у нумеричке симулације:** увођење термичких и механичких оптерећења у нумерички модел, као и адаптација развијених алгорита на услове у којима се компонента налази под утицајем сложених спрегнутих поља.
7. **Примена методологије на реалне инжењерске проблеме:** тестирање развијене методологије у процесу оптимизације керамичких компоненти које се користе у екстремним условима, са циљем повећања њихове отпорности на термички шок.
8. **Критичка анализа и идентификација даљих праваца истраживања:** сумирање постигнутих резултата, процена ефикасности развијене методологије, и формулисање смерница за будућа истраживања у циљу даљег унапређења симулационих и оптимизационих техника.

ПРЕЛИМИНАРНА ОКВИРНА СТРУКТУРА ПРЕДЛОЖЕНЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ САДРЖАЋЕ СЛЕДЕЋЕ ЦЕЛИНЕ:

1. Увод
2. Пресек литературе у области нумеричких симулација керамичких компонената оптерећених термичким шоком
3. Пресек литературе у области тополошке оптимизације сложено оптерећених компонената
4. Развој алгоритма за адаптивно убацивање кохезивних елемената у прорачунски домен
5. Адаптација развијеног алгоритма на сложене сценарије са више пукотина
6. Развој тополошке оптимизације са интегрисањем алгоритма за адаптивно убацивање кохезивних елемената
7. Примери примене развијене методологије кроз више студија случаја и поређење са реалним експерименталним резултатима
8. Примери примене развијене методологије на реалне инжењерске проблеме
9. Закључна разматрања и будући правци истраживања

7. Закључак и предлог

На основу извршене анализе пријаве теме докторске дисертације кандидата Домагоја Уремовића, мастера инжењера машинства, Комисија за подношење извештаја о научној заснованости теме закључује да је предложена тема научно утемељена, актуелна и адекватна за израду докторске дисертације високог квалитета. Комисија оцењује да се израдом ове докторске дисертације може остварити значајан научни допринос, као и да кандидат испуњава све законске и друге прописане услове за рад на предложеној теми. Сходно наведеном, Комисија предлаже Наставно-научном већу Универзитета у Београду – Машинског факултета да се кандидату Домагоју Уремовићу одобри израда докторске дисертације под називом:

Развој нумеричког алата за тополошку оптимизацију полу-кртих материјала са адаптивним убацивањем кохезивних елемената (Numerical framework for topology optimization of quasi-brittle materials with adaptive insertion of cohesive elements)

која припада научној области Машинско инжењерство и ужој научној области Отпорност конструкција, за коју је матичан Универзитет у Београду – Машински факултет. Такође, Комисија предлаже да ментор предметне докторске дисертације буде др Владимир Буљак, редовни професор Универзитета у Београду – Машинског факултета, са Катедре за отпорност конструкција, који испуњава све услове у складу са чланом 28. Правилника о докторским студијама на Универзитету у Београду – Машинском факултету.

Београд, 22. 5. 2025.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ:

.....
др Игор Балаћ, редовни професор
Универзитет у Београду – Машински факултет

.....
др Весна Милошевић-Митић, редовни професор
Универзитет у Београду – Машински факултет

.....
др Сузана Филиповић, научни саветник
Институт техничких наука Српске Академије наука и уметности