

**НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ
ТЕХНОЛОШКО-МЕТАЛУРШКОГ ФАКУЛТЕТА
УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ**

Предмет: Подобност теме и кандидата Александра Радојковића, дипл. инж. технологије за израду докторске дисертације

Одлуком Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду бр. 35/332 од 26. 10. 2012. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата Александра Радојковића, дипл. инж. технологије за израду докторске дисертације и научне заснованости теме:

Својства керамике на бази баријум-церијум-итријум-оксида као електролита за чврсте горивне ћелије

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ

1.1. Биографски подаци

Кандидат Александар Радојковић је рођен 09. 09. 1976. године у Београду. Основну школу и гимназију завршио је у Вршцу. Технолошко-металуршки факултет Универзитета у Београду уписао је 1995. године и дипломирао је 2003. године са просечном оценом 8,63 под менторством др Весне Радојевић, ванредног професора на Катедри за конструкционе и специјалне материјале. Филолошки факултет Универзитета у Београду је уписао 1999. године и дипломирао 2006. године на Катедри за скандинавске језике и књижевности. Докторске студије на студијском програму „Хемијско инжењерство“ Технолошко-металуршког факултета уписао је школске 2008/2009. године, под менторством др Јелене Миладиновић, ванредног професора на Катедри за неорганску хемијску технологију. Од новембра 2008. године запослен је у Институту за мултидисциплинарна истраживања, на Одсеку за материјале и конверзију енергије, а 2010. године је изабран у звање истраживач-сарадник. Тренутно је ангажован на пројекту ИИИ45007 "0-3Д наноструктуре за примену у електроници и обновљивим изворима енергије: синтеза, карактеризација и процесирање" под руководством др Горана Бранковића, научног саветника и руководиоца Одсека за материјале и конверзију енергије Института за мултидисциплинарна истраживања. Главна област истраживања кандидата у оквиру овог пројекта је испитивање керамике на бази баријум-церијум-итријум-оксида као електролита за чврсте горивне ћелије,

добивање дебелослојних анодних филмова и испитивање других оксидних електролита применом електрохемијске импедансне спектроскопије. Члан је Српског керамичког друштва од 2010. године. До сада је објавио шест радова у врхунским часописима међународног значаја (M21) и један рад у међународном часопису (M23), а два рада су саопштена на међународним конференцијама и штампана у изводу (M34).

1.2. Стечено научно-истраживачко искуство

У досадашњем раду у Институту за мултидисциплинарна истраживања учествовао је на следећим пројектима под покровитељством Министарства просвете, науке и технолошког развоја:

- ТР 19001 „Геополимери – нови материјали на бази електрофилтерског пепела из термоелектрана у оквиру концепта одрживог развоја“ (2008.-2010.);
- ОН 142040 „Савремена метал-оксидна керамика и танки филмови“ (2010.-2011.);
- ИИИ45007 "0-3Д наноструктуре за примену у електроници и обновљивим изворима енергије: синтеза, карактеризација и процесирање"(2001.-).

Такође, учествовао је и на следећим међународним пројектима:

- EUREKA E! 3688 „Одржива примена одабраног индустријског отпада у индустрији цемента и бетона“ (2009.);
- EUREKA E! 3824 „Од индустријског отпада до комерцијалног производа“ (2010.).

Кандидат је положио све испите предвиђене планом и програмом докторских студија, укључујући и завршни испит:

Виши курс аналитичке хемије (5 ЕСПБ)	10 (десет)
Математичка обрада експерименталних података (5 ЕСПБ)	8 (осам)
Одабрана поглавља инструменталне анализе (7 ЕСПБ)	10 (десет)
Феномени преноса у инжењерству материјала (5 ЕСПБ)	10 (десет)
Хемијска термодинамика (5 ЕСПБ)	9 (девет)
Фазне равнотеже у вишекомпонентним системима (4 ЕСПБ)	10 (десет)
Теоријски основи керамике и стакла (5 ЕСПБ)	8 (осам)
Одабрана поглавља технологије грађевинских материјала (4 ЕСПБ)	10 (десет)
Структура и својства композитних материјала (5 ЕСПБ)	10 (десет)
Завршни испит (30 ЕСПБ)	10 (десет)

1.3. Списак објављених радова који опредељују афинитет кандидата на предложеној теми

Научни радови објављени у врхунским часописима међународног значаја (M21)

1. Bučevac D., **Radojković A.**, Miljković M., Babić B., Matović M.: *Effect of preparation route on the microstructure and electrical conductivity of co-doped ceria*, - Ceramic International, 2012, doi: 10.1016/j.ceramint.2012.10.188 (ISSN: 0272-8842, IF: 1,751).
2. **Radojković A.**, Žunić M., Savić M.S., Branković G., Branković Z.: *Enhanced stability in CO₂ of Ta doped BaCe_{0.9}Y_{0.1}O_{3-δ} electrolyte for intermediate temperature SOFCs*, - Ceramics International Vol. 39, No 3, 2013, pp. 2631–2637 (ISSN: 0272-8842, IF: 1,751).
3. **Radojković A.**, Žunić M., Savić M.S., Branković G., Branković Z.: *Chemical stability and electrical properties of Nb doped BaCe_{0.9}Y_{0.1}O_{3-δ} as a high temperature proton conducting electrolyte for IT-SOFC*, - Ceramics International, Vol. 39, No 1, 2013, pp. 307–313 (ISSN: 0272-8842, IF: 1,751).
4. Vijatović Petrović M.M., Bobić J.D., **Radojković A.**, Banys J., Stojanović B.D.: *Improvement of barium titanate properties induced by attrition milling*, - Ceramics International, Vol. 38, No 7, 2012, pp. 5347–5354 (ISSN: 0272-8842, IF: 1,751).
5. Zunic M., Chevallier L., **Radojkovic A.**, Brankovic G, Brankovic Z., Di Bartolomeo E.: *Influence of the ratio between Ni and BaCe_{0.9}Y_{0.1}O_{3-δ} on microstructural and electrical properties of proton conducting Ni–BaCe_{0.9}Y_{0.1}O_{3-δ} anodes*, - Journal of Alloys and Compounds, Vol. 509, No 4, 2011, pp. 1157–1162 (ISSN: 0925-8388, IF: 2,289).
6. Branković Z., Đuriš K., **Radojković A.**, Bernik S., Jagličić Z., Jagodić M., Vojisavljević K., Branković G.: *Magnetic properties of doped LaMnO₃ ceramics obtained by a polymerizable complex method*, - Journal of Sol-gel Science and Technology, Vol. 55, No 3, 2010, pp. 311–316 (ISSN: 0928-0707, IF:1,632).

Научни рад објављен у часопису међународног значаја (M23)

1. Branković Z., Branković G., Tucić A., **Radojković A.**, Longo E., Varela J.A.: *Aerosol Deposition of Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO₃ Thin Films*, Science of Sintering 41 (2009) 303–308 (ISSN: 0350-820X, IF: 0.274).

Саопштење са међународног скупа штампано у изводу (M34)

1. **Radojković A.**, Branković G., Branković Z., Žunić M., Savić S.M.: *The influence of synthesis method on properties of Nb doped BaCe_{0.9}Y_{0.1}O_{3-δ} as a proton conducting electrolyte for IT-SOFC*, Book of abstracts of First International Conference on Processing, characterization and application of nanostructured materials and nanotechnology NanoBelgrade 2012, Belgrade 2012. , pp. 119 (ISBN: 978-86-7401-285-7)
2. **Radojković A.**, Žunić M.: *Chemical stability and electrical properties of Nb doped BaCe_{0.9}Y_{0.1}O_{3-δ} as an electrolyte for high temperature proton conducting SOFC*, Program and the book of abstracts of 1st Conference of the Serbian Ceramic Society, Belgrade 2011., pp. 58 (ISBN: 978-86-7306-107-8).

1.4. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

На основу досадашњег рада и показаних резултата током докторских студија и научно-истраживачког рада, Александар Радојковић, дипл. инж. технологије, је показао велику способност за бављење научно-истраживачким радом. Из области докторске дисертације до сада је објавио два рада у врхунским научним часописима међународног значаја (M21), а два рада су саопштена на међународним конференцијама и штампана у изводу, што указује на подобност кандидата за рад на предложеној теми.

2. Предмет и циљ истраживања

Током неколико протеклих деценија велика пажња је посвећена развоју технологија за производњу горивних ћелија. Њихов значај је у томе што омогућују претварање хемијске енергије у електричну без негативних последица по животну средину [1]. До сада је израђено неколико типова горивних ћелија, међу којима се због ефикасности и других карактеристика издвајају горивне ћелије на бази чврстих оксида (SOFC). Главна карактеристика и недостатак овог типа је висока оперативна температура (око 800 °C) и даљи развој у овој области је усмерен ка њеном снижавању. Поред уштеда у енергији и мањих трошкова израде због коришћења јефтинијих материјала, постигао би се и дужи век трајања горивне ћелије у том случају.

Досадашња истраживања могу указати на корисне смернице у погледу избора материјала за SOFC, односно материјала за израду анода, катода, електролита, међуспојева и заптивака. Многи оксиди перовскитне структуре су добри јонски проводници на повишеним температурама и зато се могу користити за израду електролита за горивне ћелије. Добра проводљивост је последица присуства структурних дефеката који омогућују пренос наелектрисаних честица, најчешће кисеоничних јона и протона. Концентрација дефеката се може повећати повишењем температуре или додавањем малих количина оксида (допаната) у којима су катјони метала различите валенце од одговарајућих катјона који улазе у састав перовскитне структуре [2–5]. Баријум-церијум-итријум-оксид, $\text{BaCe}_{0.9}\text{Y}_{0.1}\text{O}_{3-\delta}$, перовскитне структуре је одличан протонски проводник у средњетемпературном опсегу (400 – 700 °C), тј. на температурама које су знатно ниже него у случају електролита који су данас у комерцијалној употреби, као што је $\text{Zr}_{1-x}\text{Y}_x\text{O}_{2-\delta}$.

Значај избора методе синтезе керамичког праха у процесу добијања електролита огледа се у могућности добијања праха дефинисаних величина и расподеле величина честица, чиме се утиче како на температуру и брзину реакције у чврстој фази, тако и на режим синтеровања као завршне фазе у изради електролита. Електролит треба да се одликује изразитом густином, без или са минималним садржајем затворених пора [6, 7]. На тај начин не може доћи до мешања гасова из анодног и катодног простора приликом рада горивне ћелије, што би довело да пада потенцијала, а тиме и до смањења ефикасности горивне ћелије.

Утицај допаната на особине електролита је вишеструк. Прво, коефицијенти дифузије допаната утичу на пренос масе између зрна у процесу синтеровања, што условљава динамику раста зрна и коначно одређује квалитет микроструктуре

синтерованог електролита. Друго, увођењем електронегативнијих елемената на местима за Се и У у перовскитној структури, може доћи до повећања киселости кристалне решетке што доприноси постојаности електролита на утицај CO_2 [4, 8, 9]. Треће, од валентног стања допаната зависи хемизам настанка дефеката и њихова концентрација, а то се непосредно одражава на проводљивост електролита [10, 11]. На крају, величина катјона допаната који попуњавају октаедарске шупљине у кристалној решетки утиче на степен деформације октаедара, тј. на промену запремине јединичне кристалне ћелије, а од тога зависи покретљивост носилаца наелектрисања [12, 13].

Атмосфера у којој се налази електролит на повишеним температурама утиче на појаву одговарајућих дефеката и доминантну улогу одређене врсте наелектрисаних честица у механизму провођења [14, 15]. Испитивањем електричне проводљивости у различитим атмосферама могу се извести закључци о особинама електролита, типу проводљивости, ефектима границе зрна и сагласности са претпостављеним хемизмом настанка дефеката.

Имајући све то у виду, циљ ове докторске дисертације је да установи утицај концентрације Nb и Ta на проводљивост $\text{BaCe}_{0.9}\text{Y}_{0.1}\text{O}_{3-\delta}$ у различитим атмосферама и хемијску стабилност на дејство CO_2 на повишеним температурама. Такође, размотриће се утицај два различита начина синтезе керамичких прахова допираних ниобијумом на микроструктурна и електрична својства електролита.

Литература:

- [1] Appleby A.J., Foulkes F.R.: *Fuel Cell Handbook*, Van Nostrand Reinhold, New York, NY, 1989.
- [2] Iwahara H.: *Proton conduction in sintered oxides and its application to steam electrolysis for hydrogen production*, - Solid State Ionics, Vol. 3–4, 1981, pp. 359–363.
- [3] Scherban T., Lee W.-K., Nowick A.S.: *Bulk protonic conduction in Yb-doped SrCeO_3 and BaCeO_3* , - Solid State Ionics, Vol. 28, No 1, 1988, pp. 585–588.
- [4] Ryu K.H., Haile S.M.: *Chemical stability and proton conductivity of doped BaCeO_3 – BaZrO_3 solid solutions*, - Solid State Ionics, Vol. 125, No 1–4, 1999 pp. 355–367.
- [5] Amsif M., Marrero-López D., Ruiz-Morales J.C., Savvin S.N., Núñez P.: *Effect of sintering aids on the conductivity of $\text{BaCe}_{0.9}\text{Ln}_{0.1}\text{O}_{3-\delta}$* , - Journal of Power Sources, Vol. 196, No 22, 2011, pp. 9154–9163.
- [6] Žunić M.: *Anode supported IT-SOFCs based on proton conducting electrolyte films fabricated by electrophoretic deposition*, doktorska disertacija, Univerzitet u Rimu, 2010.
- [7] Bonanos N., Knight K.S., Ellis B.: *Perovskite solid electrolytes: Structure, transport properties and fuel cell applications*, - Solid State Ionics, Vol. 79, 1995, pp. 161–170.
- [8] Bi L., Zhang S., Zhang L., Tao Z., Wang H., Liu W.: *Indium as an ideal functional dopant for a proton-conducting solid oxide fuel cell*, - International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 34, No 5, 2009, pp. 2421–2425.
- [9] Di Bartolomeo E., D’Epifanio A., Pugnalin C., Giannici F., Longo A., Martorana A., Licoccia S.: *Structural analysis, phase stability and electrochemical characterization of Nb doped $\text{BaCe}_{0.9}\text{Y}_{0.1}\text{O}_{3-\chi}$ electrolyte for IT-SOFCs*, - Journal of Power Sources, Vol. 199, 2012, pp. 201–206.

- [10] Lv J., Wang L., Lei D., Guo H., Kumar R.V.: *Sintering, chemical stability and electrical conductivity of the perovskite proton conductors $BaCe_{0.45}Zr_{0.45}M_{0.1}O_{3-\delta}$ ($M=In, Y, Gd, Sm$)*, - Journal of Alloys and Compounds, Vol. 467, No 1–2, 2009, pp. 376–382.
- [11] Xiea K., Zhoua J., Meng G.: *Pervoskite-type $BaCo_{0.7}Fe_{0.2}Ta_{0.1}O_{3-\delta}$ cathode for proton conducting IT-SOFC*, - Journal of Alloys and Compounds, Vol. 506, No 1, 2010, pp. L8–L11.
- [12] Amsif M., Marrero-López D., Ruiz-Morales J.C., Savvin S.N., Gabás M., Núñez P.: *Influence of rare-earth doping on the microstructure and conductivity of $BaCe_{0.9}Ln_{0.1}O_{3-\delta}$ proton conductors*, - Journal of Power Sources, Vol. 196, No 7, 2011, pp. 3461–3469.
- [13] Kreuer K.D.: *Mechanisms of proton conduction in perovskite-type oxides*, iz: T. Ishihara, *Perovskite oxide for solid oxide fuel cells*, Springer, Dordrecht, Heidelberg, London, New York, 2009, pp. 260–272.
- [14] Iwahara H.: *Ionic conduction in perovskite-type compounds*, iz: T. Ishihara, *Perovskite oxide for solid oxide fuel cells*, Springer, Dordrecht, Heidelberg, London, New York, 2009, pp. 45–63.
- [15] Kjølsest C. et al: *Space-charge theory applied to the grain boundary impedance of protonconducting $BaZr_{0.9}Y_{0.1}O_{3-\delta}$* , - Solid State Ionics, Vol. 181, No 5–7, 2010, pp. 268–275.

3. Полазне хипотезе

Последњих неколико деценија поклања се велика пажња технологијама које немају негативан утицај на животну средину и које омогућавају добијање електричне енергије из алтернативних извора. Горивне ћелије на бази перовскитних оксида могу бити једно од могућих решења, при чему су системи који користе $Zr_{1-x}Y_xO_{2-\delta}$ као електролит већ у комерцијалној употреби. Као што је поменуто, главна карактеристика ових горивних ћелија је висока оперативна температура, а откићем протонске проводљивости почетком осамдесетих година прошлог века настао је нови талас истраживања са циљем да се пронађе електролит са идеалним карактеристикама: високе проводљивости на што нижим температурама, уз добре механичке особине и хемијску стабилност. $BaCe_{0.9}Y_{0.1}O_{3-\delta}$ је један од најбољих протонских проводника, али му је мана нестабилност у атмосфери која садржи CO_2 на повишеним температурама. То доводи у питање његову примену у горивним ћелијама које користе горива на бази угљоводоника, јер се у таквим системима CO_2 издваја као производ.

Увођењем у структуру $BaCe_{0.9}Y_{0.1}O_{3-\delta}$ електронегативнијих елемената, као што је Nb, може доћи до побољшања стабилности, али до сада нису спроведена детаљнија испитивања о томе на који начин и у којој мери ови допанти утичу, поред стабилности, и на друга својства електролита. Разумевање механизма настајања дефеката као и промена у микроструктури приликом допирања је веома важно, јер се тако могу предвидети трендови промене електричне проводљивости електролита.

Циљ ове докторске дисертације биће да се установи утицај малих концентрација петовалентног ниобијума и петовалентног тантала и (до 5 молских %) на стабилност, микроструктуру и електрична својства електролита на бази $BaCe_{0.9}Y_{0.1}O_{3-\delta}$ и да ли се на овај начин може добити електролит задовољавајућих карактеристика, како у погледу проводљивости, тако и у погледу стабилности на утицај CO_2 . Један део истраживања

биће посвећен методама синтезе прахова, као полазног поступка у изради електролита за горивне ћелије. Финоћа добијених прахова, расподела величина честица и степен агрегације утичу на квалитет микроструктуре електролита, а самим тим и на проводљивост. У докторској дисертацији ће се такође размотрити утицај два различита поступка синтезе прахова допираних ниобијумом на својства електролита.

4. Научне методе истраживања

У оквиру ове докторске дисертације користиће се две различите методе за синтезу керамичких прахова:

- метода реакције у чврстом стању (узорци допирани ниобијумом и танталом);
- метода реакције самосагоревања (узорци допирани ниобијумом).

Циљ упоредне синтезе керамичких прахова различитим методама је утврђивање утицаја начина синтезе на квалитет добијених прахова, као основних компоненти у процесу израде чврстих електролита. За карактеризацију прахова ће бити примењене следеће експерименталне методе:

- 1) **Диференцијална скенирајућа калориметрија и термогравиметријска анализа** за одређивање оптималне температуре реакције у чврстом стању. Истовременим праћењем промене масе у систему и топлотних ефеката, могуће је утврдити температурни интервал у којем се може одиграти реакција у чврстом стању. Експериментални подаци ће бити добијени снимањем спектра у температурном интервалу од собне температуре до 1400 °C, при брзини загревања од 10 °C/min.
- 2) **БЕТ анализа** за одређивање специфичне површине прахова као једне од метода за оцењивање квалитета прахова добијених различитим поступцима синтезе.
- 3) **Рендгенска дифракциона анализа** за квалитативну анализу минералшког састава прахова и одређивање основних кристалографских параметара. Од величине запремине јединичне кристалне ћелије и зависи покретљивост носилаца наелектрисања, а самим тим и проводљивост електролита. Допирањем се у микроструктуру уносе катјони који имају различито наелектрисање и величину и на тај начин утичу на промену запремине јединичне ћелије и њену деформације. На основу промене основних кристалографских параметара може се претпоставити тренд промене проводљивости електролита у зависности од врсте и концентрације допанта. Осим тога, на основу ширине пикова на полувисини могуће је одредити средњу величину кристалита, односно микроструктурних домена са истом оријентацијом кристалографских равни.
- 4) **Скенирајућа електронска микроскопија високе резолуције** за приказивање и поређење морфологије керамичких прахова. Такође, поређењем морфологије прахова са величином кристалита добијених на

основу података рендгенске дифракционе анализе, могуће је проценити степен агрегације.

За израду електролита ће бити примењена метода униаксијалног пресовања прахова у калупу за пресовање пречника 8 mm применом притисака од 200 МПа до 600 МПа, после чега ће пресовани узорци бити синтеровани на 1550 °C у току 5 h. Следеће методе ће бити примењене за карактеризацију синтерованих узорака (електролита):

1) **Рендгенска дифракциона анализа** за одређивање минералношког састава електролита након фазе синтеровања. У току синтеровања на температурама преко 1500 °C може доћи до разлагања електролита, тако да је неопходно проверити да ли је дошло до издвајања непожељних фаза у систему.

2) **Скенирајућа електронска микроскопија** за приказивање морфологије површине и прелома синтерованих узорака, при чему ће бити коришћен детектор секундарних електрона. Средња величина зрна синтерованих узорака биће одређена методом исечка коришћењем најмање три микрограма за дати узорак. Поред тога, за утврђивање чистоће узорака у појединим случајевима ће бити коришћен детектор одбијених електрона.

3) **Електрохемијска импедансна спектроскопија** за одређивање електричних карактеристика електролита биће изведена у опадајућем режиму фреквенција од 1 MHz до 42 Hz. Мерења ће бити изведена у температурном интервалу од 550-750 °C јер је то опсег радних температура за горивне ћелије које користе овај тип електролита. Такође, мерења ће бити изведена у атмосферама влажног водоника, влажног аргона и сувог аргона, како би се разјаснио механизам провођења и одредио тип проводљивости у зависности од примењене атмосфере и присуства микроструктурних дефеката.

На крају, биће испитана стабилности узорака електролита у атмосфери CO₂ на 700 °C у току 5 h применом **рендгенске дифракционе анализе**.

5. Очекивани научни допринос

Истраживања у оквиру ове докторске дисертације треба да доведу до:

- Дефинисања оптималних параметара синтезе прахова баријум-церијум-итријум-оксида допираних ниобијумом и танталом;
- Побољшања стабилности електролита на бази баријум-церијум-итријум-оксида у атмосфери CO₂ допирањем танталом и ниобијумом;
- Одређивања концентрације допаната за коју електролит испољава оптималне карактеристике: задовољавајућу проводљивост и добру хемијску стабилност;

- Утврђивања фактора који утичу на проводљивост електролита у различитим атмосферама на основу претпостављеног хемизма настанка дефеката, микроструктуре, врсте допаната и кристалографских параметара;
- Утврђивања која врста проводљивости доминира у различитим атмосферама на основу присутних структурних дефеката;
- Утврђивања утицаја врсте синтезе праха на микроструктуру и електрична својства електролита.

6. План истраживања и структура рада

1) План истраживања је одређен на основу литературног прегледа који обухвата следеће тематске целине:

- општи теоријски принципи рада горивних ћелија;
- карактеристике материјала за чврсте горивне ћелије;
- протонска проводљивост у оксидима перовскитне структуре;
- хемизам дефеката и механизам транспорта наелектрисања у допираном баријум-церијум-оксиду;
- методе синтезе керамичких прахова.

2) Експериментални део према плану истраживања обухвата следеће целине:

- синтеза керамичких прахова;
- карактеризација керамичких прахова;
- процесирање керамичких прахова;
- карактеризација синтерованих електролита;
- испитивање стабилности електролита на утицај CO_2 ;

3) Резултати и дискусија.

4) Закључак.

7. Закључак и предлог

На основу изложеног, Комисија сматра да је тема докторске дисертације „Својства керамике на бази баријум-церијум-итријум-оксида као електролита за чврсте горивне ћелије“, предложена од стране дипл. инг. Александра Радојковића, студента докторских студија, научно заснована и да је кандидат подобан за рад на предложеној теми, па предлаже Наставно-научном већу Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду да одобри Александру Радојковићу израду предложене

докторске дисертације под менторством др Јелене Миладиновић, ванредног професора Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду и др Горана Бранковића, научниог саветника Института за мултидисциплинарна истраживања Универзитета у Београду. Истраживања у оквиру ове докторске дисертације припадају научној области Технолошко инжењерство, за коју је Технолошко-металуршки факултет Универзитета у Београду матична установа.

У Београду, 18. 02. 2013.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

1. др Јелена Миладиновић, ванредни професор, коментор
Технолошко-металуршки факултет, Универзитет у
Београду

2. др Горан Бранковић, научни саветник, коментор
Институт за мултидисциплинарна истраживања,
Универзитет у Београду

3. др Рада Петровић, редовни професор, члан комисије
Технолошко-металуршки факултет, Универзитет у
Београду

4. др Зорица Бранковић, научни саветник, члан комисије
Институт за мултидисциплинарна истраживања,
Универзитет у Београду

5. др Снежана Грујић, ванредни професор, члан комисије
Технолошко-металуршки факултет, Универзитет у
Београду