

## **NAUČNOM VEĆU**

### **INSTITUTA TEHNIČKIH NAUKA SANU**

Na elektronskoj sednici naučnog veća Instituta tehničkih nauka SANU održanoj 16.01.2015. imenovani smo za članove Komisije za izbor u zvanje naučni saradnik dr Miodraga Lukića istraživača saradnika Instituta tehničkih nauka SANU. Na osnovu uvida u objavljene naučne radove radove kandidata, stručnu biografiju, i pregledanog materijala podnosimo Naučnom veću sledeći

### **IZVEŠTAJ**

#### **I Biografski podaci**

Miodrag Lukić je rođen 17. 01. 1984. godine u Sarajevu, Bosna i Hercegovina. Fakultet za fizičku hemiju Univerziteta u Beogradu je završio 02. 04. 2009. godine, stekavši zvanje diplomirani fizikohemičar (izjednačeno sa zvanjem master), a od 16. 04. 2009. godine je zaposlen u Institutu tehničkih nauka SANU.

Doktorske studije upisao je na Fakultetu za fizičku hemiju u prolećnom semestru 2008/2009. godine. U proteklom periodu je završio sve obaveze predviđene planom i programom doktorskih studija, položio sve ispite (prosečna ocena 9,71/10,00) i odbranio doktorsku disertaciju pod nazivom „Dvostepeno sinterovanje, fazne transformacije, električne i mehaničke osobine nanostrukturnih biokeramičkih materijala na bazi hidroksiapatita“ 29.12.2014. godine.

Oblasti interesovanja su mu: biokeramički nanomaterijali, polimerni biomaterijali, sinteza i procesiranje nanomaterijala, fazne transformacije, rast kristala, međuzavisnost mikrostrukturnih i funkcionalnih karakteristika, metode određivanja mehaničkih, električnih i bioloških osobina.

## **II. Angažovanost na projektima**

### *Integralna i interdisciplinarna istraživanja*

III45004 „Molekularno dizajniranje nanočestica kontrolisanih morfoloških i fizičko-hemijskih karakteristika i funkcionalnih materijala na njihovoj osnovi“, (2011-). - Rukovodilac projekta Prof. dr Dragan Uskoković, naučni savetnik u penziji.

### *Bilaterani projekat*

Bilateralni projekat između Instituta tehničkih nauka SANU i Instituta za biomaterijale Univerziteta u Erlangenu-Nirnbreg, „Development and Evaluation of Bioactive Glass Based Therapeutics for Tissue Engineering and Controlled Delivery of Medicaments“, br. projekta 451-03-01858/2013-09/2, (2014-2015). Rukovodilac projekta dr Magdalena Stevanović, viši naučni saradnik.

### *Međunarodni projekat*

COST projekat „Theranostics Imaging and Therapy: An Action to Develop Novel Nanosized Systems for Imaging-Guided Drug Delivery“- CMST COST Action TD1004, (2012-2015). Rukovodilac projekta dr Magdalena Stevanović, viši naučni saradnik.

## **III Kratka analiza naučnog rada**

Dr Miodrag Lukić je do sada objavio 5 radova u vrhunskim međunarodnim časopisima (M21), 2 rada u istaknutim međunarodnim časopisima (M22), 1 poglavlje u knjizi (M13), 21 saopštenje sa međunarodnih skupova štampano u izvodu (M34), kao i 1 saopštenje sa skupa nacionalnog značaja štampano u izvodu (M64).

Naučno-istraživačka aktivnost dr Miodraga Lukića je do sada uglavnom bila usmerena na optimizaciju mikrostrukturnih osobina biokeramičkih materijala na bazi hidroksiapatita paralelnom optimizacijom metoda sinteze i primenom konvencionalnog i dvostepenog sinterovanja. Pored toga, određivane su i funkcionalne osobine sinterovanih materijala. Kontrolom postupaka sinteze nanoprahova hidroksiapatita različite stehiometrije i primenom odgovarajućih uslova dvostepenog sinterovanja napravljen je značajan napredak na polju

procesiranja materijala na bazi hidroksiapatita i zaustavljanja rasta zrna u krajnjoj fazi sinterovanja, i generalno u oblasti biokeramičkih materijala na bazi hidroksiapatita.

Primenjujući metodu dvostepenog sinterovanja na nanoprah Ca-deficitarnog hidroksiapatita sintetisan hidrotermalnim procesiranjem ( $\text{Ca/P} = 1,63$ ), značajno je snižena temperatura na kojoj se može dobiti gusti bifazni kalcijum fosfat. Pored toga, dvostepeno sinterovanje je doprinelo da se prosečna veličina zrna zadrži na 375 nm, što je višestruko manje od prosečne veličine zrna koja se dobija prilikom konvencionalnog sinterovanja istog materijala, oko 1400 nm. Analiza faznog sastava dvostepeno sinterovanog bifaznog kalcijum fosfata je pokazala da je pored hidroksiapatita prisutna jedino niskotemperaturna  $\beta$ -faza trikalcijum fosfata što je vrlo značajno sa aspekta ponašanja ovog materijala u biološkom okruženju. Analizom mehaničkih osobina je utvrđeno da se smanjenjem prosečne veličine zrna i kontrolom faznog sastava poboljšavaju vrednosti tvrdoće (sa 4,5 do 4,9 GPa) i lomne žilavosti (sa 0,9 na 1,11 MPam<sup>1/2</sup>) bifaznog kalcijum fosfata, što je među najboljim saopštenim vrednostima u literaturi. (*Journal of the European Ceramic Society, Vol. 31, 1-2, 2011, str. 19-27*)

Daljim radom na istom sistemu Ca-def hidroksiapatita došlo se do važnih saznanja o procesiranju ovog materijala različitim brzinama zagrevanja i utvrđeno je da povećanje brzine zagrevanja pospešuje proces sinterovanja u oblasti intermedijerne faze sinterovanja. Rezultati su korelisani sa faznim transformacijama koje se dešavaju u sistemu Ca-deficitarnog hidroksiapatita i evolucijom njihovog faznog sastava. Ispitivanjem mikrostrukturnih karakteristika je utvrđeno da raspodela veličine zrna postaje znatno uniformnija i da se prosečna veličina zrna smanjuje sa povećanjem brzine zagrevanja sa 2 na 20 °C/min. S druge strane, sa povećanjem brzine zagrevanja se eksponencijalno smanjuje sadržaj trikalcijum fosfata u sinterovanom materijalu, čime se pokazuje da je moguće kreirati željeni odnos bioaktivnosti i biokompatibilnosti u istom materijalu jednostavnom promenom brzine zagrevanja. (*Materials Letters, Vol. 68, 2012, str. 331-335*)

Primenom metode dvostepenog sinterovanja na stehiometrijski hidroksiapatit ( $\text{Ca/P} = 1,67$ ) na temperaturama od 900/850 °C dobijen je gusti monofazni hidroksiapatit sa prosečnom veličinom zrna od 75 nm, što predstavlja jedan od najznačajnijih rezultata u oblasti biokeramičkih materijala. Pored toga je utvrđen i mehanizam sinterovanja kao difuziono-viskozni tok pri difuziji po granicama zrna, i utvrđena je energija aktivacije procesa sinterovanja

od oko 410 kJ/mol primenom metode master krive sinterovanja. Ukazano je na značaj mikrostrukturnog uređenja pojedinačnih nanočestica za ponašanje tokom procesa sinterovanja. Daljom primenom različitih uslova dvostepenog i konvencionalnog sinterovanja je dobijen niz potpuno gustih sinterovanih materijala sa različitom prosečnom veličinom zrna. (*Journal of the American Ceramic Society, Vol. 95, 11, 2012, str. 3394-402*)

Analiza električnih osobina gustog sinterovanog hidroksiapatita sa prosečnom veličinom zrna u rasponu od mikrometarskog do nanometarskog nivoa urađena je metodom impedansne spektroskopije u oblasti frekvencija od 42 Hz do 5 MHz, i opsegu temperatura od 800 do 1050 °C u ciklusu grejanje/hlađenje. Utvrđeno je da se smanjenjem prosečne veličine zrna na nanometarski nivo može poboljšati visokotemperaturna električna provodljivost hidroksiapatita. Razdvojeni su doprinosi provodljivosti unutrašnjosti zrna i granica zrna i određene su energije aktivacije za ove vrste provodljivosti. Utvrđeno je da se u navedenoj oblasti temperatura provodljivost odvija mehanizmom migracije hidroksilnih jona, i da poboljšnje provodljivosti potiče od smanjenja difuzionih putanja kod nanostrukturnog materijala i odsustva dehidroksilacije u kristalnoj strukturi hidroksiapatita usled nižih temperatura procesiranja. (*Materials Research Bulletin, Vol. 61, 2015, str. 534 – 538*)

Korišćenjem prethodno određenih uslova dvostepenog sinterovanja, 900/850 °C, formirani su funkcionalno gradijentni materijali od početnih slojevitih (tri sloja i pet slojeva) ispresaka stehiometrijskog i Ca-deficitarnog hidroksiapatita. Početni i krajnji sloj uvek je bio monofazni materijal, dok se sastav međuslojeva početnih ispresaka menjao, sadržavajući različit odnos stehiometrijskog i Ca-deficitarnog hidroksiapatita (80/20, 50/50, 20/80). Dvostepeno sinterovanje je omogućilo dobijanje nanostrukturnih sinterovanih materijala različite gustine (od potpuno gustih do 40 % poroznosti) i faznog sastava (odnos hidroksiapatita i  $\beta$ -trikalcijum fosfata, utvrđen iz ramanske i infracrvene spektroskopije). Takva raspodela mikrostrukturnih i hemijskih karakteristika je usloвила gradijentnu promenu mehaničkih osobina (tvrdoća i modul elastičnosti), koja znatno približiva mehaničke osobine ovog materijala realnim osobinama prirodnog koštanog tkiva. (*Ceramics International, Vol. 41 2015, str. 2654-2667*)

Pored procesiranja biokeramičkih materijala na bazi hidroksiapatita različitim metodama sinterovanja, kandidat dr Miodrag Lukić se bavio i hemijskom sintezom i ispitivanjem uticaja različitih koncentracija jona cirkonijuma na rast kristala i karakteristike hidroksiapatita. Sinteza

hidroksiapatita je urađena hemijskom precipitacijom, uz uslov da molski odnos (Ca + Zr)/P uvek bude 1,67, pri čemu je udeo cirkonijuma od 0 do 10 mol. % u odnosu na Ca. Utvrđeno je da sa povećanjem sadržaja Zr do 10 mol. % dolazi do znatnog smanjenja u prosečnoj dužini/širini čestica sa oko 150/20 nm do 45/10 nm. Pri tome dolazi do znatnog porasta u specifičnoj površini materijala, i to sa 74 do 137 m<sup>2</sup>/g. Ispitivanjem neizoternskog sinterovanja do 1300 °C je utvrđeno da je moguće sprečiti reakciju između hidroksiapatita i cirkonijum oksida usled ranijeg dešavanja fazne transformacije unutar samog nestehiometrijskog hidroksiapatita. Pri sadržaju od 10 mol. % Zr je utvrđeno da potpuna transformacija hidroksiapatita u β-trikalcijum fosfat dovodi do stresom-indukovane transformacije iz tetragonalog u monoklinični cirkonijum oksid. Ispitivanjem biološkog odgovora ovih materijala je utvrđeno da je njihova biokompatibilnost nije narušena. (*Materials Letters, Vol. 122, 2014, str. 296–300*)

Jedan deo istraživanja kandidata dr Miodraga Lukića posvećen je proučavanju faznog sastava, kristalne strukture i morfologije neorganskog dela vilične kosti, a zatim i sintezi praha koji će po svim karakteristikama odgovarati humanoj viličnoj kosti i biti adekvatan za njenu reparaciju. Analiziran je biološki hidroksiapatit (BHAp) iz dela vilične kosti 23-ogodišnjeg pacijenta, koji je iz medicinskih razloga uklonjen. Ritveldovim utičnjavanjem XRD podataka određeni su strukturni i mikrostrukturni parametri kao i fazni sastav; utvrđeno je da je BHAp monofazni hidroksiapatit, srednje veličine kristalita od 10±1.6 nm, pri čemu su kristaliti anizotropni tj. izduženi u kristalografskom pravcu [0 0 *l*], što je potvrđeno i dodatnom TEM analizom. Termičko ponašanje i sadržaj karbonata u uzorku BHAp određeni su metodama TG/DSC; utvrđeno je da je sadržaj karbonata oko 1 mas.%, a da na temperaturi oko 790 °C dolazi do faznog prelaza od hidroksiapatita do β-trikalcijum fosfata. Metodama vibracione spektroskopije (ramanska i infracrvena spektroskopija) određen je tip karbonatnog apatita i sadržaj karbonatnih jona na položajima A i B u kristalnoj strukturi hidroksiapatita; utvrđeno je da BHAp spada u AB-tip karbonatnog apatita sa odnosom A:B = 2:3. Nakon detaljne analize kristalne strukture, faznog sastava i tipa karbonatnog apatita, kao i morfologije čestica urađena je sinteza praha karbonatnog hidroksiapatita (KHAp) jednostavnom metodom hemijske precipitacije. Detaljnom analizom XRD podataka utvrđeno je da je KHAp monofazni hidroksiapatit, srednje veličine kristalita od 8±1.3 nm, pri čemu su kristaliti takođe izduženi u kristalografskom pravcu [0 0 *l*] ali u manjem stepenu nego kod BHAp-a, što je potvrđeno i dodatnom TEM analizom. Metodama TG/DSC utvrđeno je da je sadržaj karbonata oko 1 mas.%,

a da na temperaturi oko 790 °C dolazi do faznog prelaza od hidroksiapatita do  $\beta$ -trikalcijum fosfata, što u potpunosti odgovara predhodno analiziranom biološkom hidroksiapatitu. Metodama ramanske i infracrvene spektroskopije utvrđeno je da KHAp takođe spada u AB-tip karbonatnog apatita sa odnosom A:B = 1:1. S obzirom da sadržaj karbonata u kostima zavisi od tipa kosti, godina i zdravstvenog stanja pacijenata, ovom studijom je pokazano da se veoma jednostavnim i jeftinom metodom mogu kreirati materijali koji u potpunosti simuliraju hemijski sastav i morfologiju prirodnog apatita i kao takvi mogu kao kompatibilni koristiti za reparaciju koštanih defekata. (*Biomedical Materials, Vol. 6, 2012, 045005*)

Kandidat se takođe bavio i sintezom i karakterizacijom neogranskih oksidnih keramika sa potencijalnom primenom u elektronskoj industriji. Prah  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  sintetisan je metodama reakcije u čvrstoj fazi i mehanohemijski. Sintetisani prahovi su karakterisani metodama XRD i FESEM, a takođe je određena i raspodela veličina čestica. Sinterabilnost prahova je proučavana u termičkom mikroskopu. Prahovi su uniaksijalno presovani u tablete i sinterovani do 1100 °C, brzinama zagrevanja od 2, 5, 10 i 20 °C/min. Snimljene krive skupljanja su korišćene da bi se odredili uslovi konvencionalnog i dvostepenog sinterovanja. Metodom dvostepenog sinterovanja uzorci su zagrevani do 1070 °C i nakon zadržavanja od 10 min hlađeni do 1020 °C i zadržavani na toj temperaturi 20 h. Mikrostruktura pripremljenih keramičkih materijala proučavana je metodom FESEM; električne karakteristike su proučavane u srednjoj oblasti frekvencija (42 Hz–5 MHz) i mikrotalasnoj oblasti. Korelisane su električne karakteristike i mikrostruktura pripremljenih  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  uzoraka. Ovim istraživanjem pokazano je da je optimalan izbor uslova sinterovanja veoma bitan za pripremu visokokvalitetnih  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  elektrokeramika. (*Processing and Properties of Advanced Ceramics and Composites V - Materials Science and Technology 2012 Conference, Vol. 240, 2013, str. 337-48*)

#### **IV Citiranost**

Radovi dr Miodraga Lukića su citirani 47 puta (40 heterocitata i 7 autocitata) na osnovu baza *Web of Science Core Collection* i *Scopus* na dan 13. Januar 2015. godine. Svi citati su navedeni u Prilogu.

## V Mišljenje i predlog Komisije

Za izbor u zvanje naučni saradnik Pravilnikom za sticanje pojedinačnih naučnih zvanja određeni su minimalni kvantitativni zahtevi. Uslov za prvi izbor u zvanje naučnog saradnika izražen je kao obaveza da kandidat ima ukupno najmanje 16 poena, koji treba da pripadaju sledećim kategorijama: prvoj kategoriji u zbiru navedenih faktora  $M10 + M20 + M31 + M32 + M33 + M41 + M42 + M51 \geq$  mora da ima 9 bodova i više, i u drugoj kategoriji u zbiru navedenih faktora  $M21 + M22 + M23 + M24 \geq$  mora da ispunjava uslov od nakupljenih 4 bodova i više.

Tabela objavljenih radova kandidata dr Miodraga Lukića prikazuje oznake kategorije navedene u pravilniku i broj objavljenih radova u toj kategoriji. Ukupan broj bodova u svim navedenim kategorijama iznosi 72,7.

**Tabela objavljenih radova kandidata dr Miodraga Lukića**

<b>Indikator</b>	<b>Kategorija</b>	<b>Bodovi</b>	<b>Ukupno</b>
M21	Rad u vrhunskom međunarodnom časopisu	5 x 8	40
M22	Rad u istaknutom međunarodnom časopisu	2 x 5	10
M13	Poglavlje u knjizi	1 x 6	6
M71	Doktorska disertacija	1 x 6	6
M34	Saopštenje sa međunarodnom skupa štampano u izvodu	21 x 0,5	10,5
M64	Saopštenje sa nacionalnog skupa štampano u izvodu	1 x 0,2	0,2
Ukupno po relevantnim kategorijama (M10 + M20 + M21 + M22 + M23 + M24 + M31 + M32 + M33 + M41 + M42 + M51)			<b>72,7</b>

Na osnovu svega izloženog može se izvesti

### ZAKLJUČAK

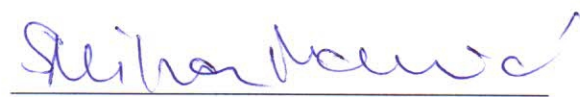
Kandidat dr Miodrag Lukić je u svom dosadašnjem radu pokazao visok stepen samostalnosti, kreativnosti, kao i sklonost ka temeljnom naučno-istraživačkom radu, a takođe i kapacitet za timski zajednički rad po projektnom zadatku. Kod kandidata je izražena želja i inicijativa za daljim usavršavanjem i sticanjem novih eksperimentalnih i teorijskih znanja u oblasti nanostrukturnih materijala, sa izraženim akcentom na njihovu primenu u oblasti biomaterijala.

Imajući u vidu naučne rezultate kandidata, predlažemo Naučnom veću Instituta tehničkih nauka SANU da usvoji ovaj Izveštaj i predloži Matičnom odboru za hemiju zahtev za odluku da dr Miodrag Lukić stekne zvanje naučnog saradnika.

### KOMISIJA

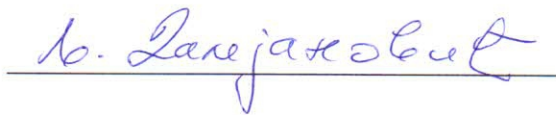
dr Smilja Marković,

viši naučni saradnik Instituta tehničkih nauka SANU

  
\_\_\_\_\_

dr Ljiljana Damjanović,

vanredni profesor Fakulteta za fizičku hemiju Univerziteta u Beogradu

  
\_\_\_\_\_

dr Magdalena Stevanović,

viši naučni saradnik Instituta tehničkih nauka SANU

  
\_\_\_\_\_