

УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА У ЧАЧКУ

ФАКУЛТЕТ		ТЕХНИЧКИХ НАУКА	
БРОЈ	ДАТУМ	28.09.2018	
01	2121		

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ ФАКУЛТЕТА ТЕХНИЧКИХ НАУКА У ЧАЧКУ
ВЕЋУ ЗА ТЕХНИЧКО-ТЕХНОЛОШКЕ НАУКЕ
УНИВЕРЗИТЕТА У КРАГУЈЕВЦУ

ПРЕДМЕТ: Извештај Комисије о оцени научне заснованости теме докторске дисертације и испуњености услова кандидата **Радослава Сурле**, дипл. инж. електротехнике

Одлуком Већа за техничко-технолошке науке Универзитета у Крагујевцу број IV-04-619/6 од 29. августа 2018. године, а на предлог Наставно-научног већа Факултета техничких наука у Чачку (одлука бр. 58-1612/4 од 18.07. 2018. године), именовани смо за чланове Комисије за оцену научне заснованости теме и испуњености услова кандидата за израду докторске дисертације под радним називом:

**„УТИЦАЈ ОДГРЕВАЊА НА СТРУКТУРНЕ ТРАНСФОРМАЦИЈЕ И
МАГНЕТНА СВОЈСТВА ЛЕГУРЕ $Fe_{72}Cu_1V_4Si_{15}B_8$ “**

из образовно-научног поља Техничко-технолошких наука, научна област Електротехничко и рачунарско инжењерство - Савремени материјали и технологије у електротехници, кандидата **Радослава Сурле** дипломираног инжењера електротехнике. На основу пријаве дисертације и увида у научни рад кандидата, достављамо следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Научни приступ проблему предложеног нацрта докторске дисертације и процена научног доприноса крајњег исхода рада

Предложена тема докторске дисертације припада научној области истраживања савремених аморфних и нанокристалних материјала који поседују специфична својстава па су због тога нашла примену у свим гранама технике, а посебно у електротехници. Наиме, микроструктуру аморфних легура карактерише неуређени распоред атома (тј. постоји одсуство уређености атома на даљину) што узрокује њихова јединствена електрична, магнетна и механичка својства.

Са термодинамичког аспекта аморфна структура материјала је метастабилна што током термичке обраде омогућава њихову делимичну или потпуну кристализацију (у контролисаним условима нанокристализацију), а самим тим и значајну корекцију функционалних својстава. Наравно, за постизање побољшаних својстава неопходно је познавање стабилности легуре при различитим температурама одгревања којима се у аморфној матрици формира жељена нанокристална структура.

Аморфне феромагнетне магнетно меке легуре су материјали на бази гвожђа, кобалта и никла (односно њихове комбинације) са додатком металоида и неметала (тј. елемената за спречавање кристализације приликом поступка добијања). Нанокристални системи имају у свом саставу и одговарајући садржај елемената који омогућавају нуклеацију и контролисан раст нанокристалита током накнадних термичких третмана спроведених код аморфних металних легура, најчешће у облику трака, жица, цилиндара, ... Усавршена технологија израде аморфних легура ултрабрзим хлађењем растопа на ротирајућем диску („melt-spinning roller casting“) у комерцијалној производњи омогућава добијање трака дужине од више километара.

Аморфне и нанокристалне магнетно меке легуре су нашле широку примену за израду магнетних језгара различитих геометријских облика и различитих намена (филтри електромагнетне интерференције, високонапонски импулсни трансформатори, високофреквентни трансформатори велике снаге, ...). Све чешће се користе у сензорској техници за безконтактно мерење струје и магнетног поља, затим у биолошким испитивањима, медицинској дијагностици и др. С обзиром на то да су ови материјали добри апсорбери електромагнетног поља, филмови и широке траке се користе за оклапање електронских компоненти ради усклађивања електромагнетне компатибилности уређаја. Додатна предност појединих аморфних и нанокристалних легура је да имају повећану отпорност на корозију а самим тим и могућност примене у хемијски агресивним срединама чиме је знатно повећан век трајања компоненти.

Веза са досадашњим истраживањима

Кандидат се више година бави научном проблематиком побољшања функционалних – магнетних својстава постигнутих контролисаним термичким третманима којима се остварује нанокристална структура испитиване легуре на бази гвожђа система **Fe-Cu-V-Si-B** типа “FINEMET“. Испитивана легура са еволуираном наноструктуром поседује својство значајних промена електричних и магнетних карактеристика под утицајем спољашњег магнетног поља. Тема дисертације је актуелна, а део до сада остварених резултата је већ публикован у водећим међународним часописима и презентован на научним скуповима, што указује на позитиван крајњи исход рада. Предложени план докторске дисертације омогућава детаљан и целовит научни приступ карактерисању испитиване легуре применом различитих експерименталних метода. Тематика је посебно атрактивна за практичну примену магнетоимпедансног ефекта који се јавља код испитиване легуре пре и након спроведених термичких третмана.

2. Образложење предмета, методе и циља који уверљиво упућују да је предложена тема од значаја за развој науке

Предмет, методе и циљеви обухваћени овом дисертацијом су следећи

Предмет истраживања ове докторске дисертације је карактеризација метастабилне легуре на бази гвожђа састава $Fe_{72}Cu_1V_4Si_{15}B_8$ у облику траке, код које се накнадним термичким третманима формира нанокристална структура знатно побољшаних својстава. Легура је добијена ултрабрзим хлађењем растопа на

ротирајућем бакарном диску („melt-spinning roller casting“) у облику траке ширине око 1,5 mm и дебљине од око 40 μm са специфичним механичким, структурним, електричним и магнетним својствима. У зависности од примењених метода истраживања користиће се узорци легуре различитих димензија прилагођених експерименталним условима.

Развој аморфних металних легура (АМЛ) је и данас актуелан а паралелно се истражују аморфни/нанокристални системи са најоптималнијим својствима уз задовољење смањивања трошкова израде коришћењем јефтинијих компоненти у саставу легуре као и даље усавршавање технике брзог хлађења растопа, неопходне за добијање полазне аморфне структуре.

Комерцијалне нанокристалне магнетно меке легуре имају побољшане магнетне и електричне карактеристике у односу на стандардне и на тржишту најзаступљеније магнетно меке материјале (FeSi челици, MnZn ферити). Једна од таквих легура која је нашла широку комерцијалну примену је нанокристална легура „FINEMET“ система: Fe-Cu-Nb-Si-B (произвођачи „Hitachi Metals“ Јапан и „Vacuumschmelze“ Немачка).

Циљ истраживачких активности је испитивања својстава аморфне магнетне легуре у облику траке из система **Fe-Cu-TM-Si-B** (TM - прелазни метал Ti, V, Cr, Zr, Nb, Mo, Hf, Ta) која је пандан комерцијалној легури „FINEMET“, с тим што се уместо најчешће испитиване легуре са ниобијумом (Nb - Fe_{73.5}Cu₁Nb₃Si_{13.5}B₉) користи ванадијум (V) као елемент који омогућава формирање жељене нанокристалне структуре током контролисаних термичких третмана. Додатак ванадијума у многим магнетним легурама доводи до повећања специфичне електричне отпорности, чиме се генерално смањују губици услед вихорних струја.

Током синтезе овог аморфног система полази се од емпиријски установљених принципа за добијање аморфних структура:

1. потребно је да легура садржи бар три компоненте;
2. легура треба да садржи елементе различитих атомских пречника (минимална разлика 12 %) чија је топлота мешања блиска нули;
3. метална компонента треба да има негативну топлоту мешања са металоидом/неметалом;
4. садржај металоида/неметала је око 20 %.

У пракси се користе четири групе материјала које се комбинују за добијање аморфних и нанокристалних магнетно меких материјала: 1. група – феромагнетни материјали: (Fe, Ni, Co) као носиоци магнетних својстава, 2. група –металоиди/неметали (B, Si, Ge, P, C) који блокирају процес кристализације при хлађењу растопа, 3. група – прелазни метали (Nb, V, Cr, Mo, Ti, Zr, W, Hf, Ta) као елементи који успоравају раст зрна током термичких третмана, 4. група – агенси (Ag, Cu, Au) који омогућавају нуклеацију зрна током процеса нанокристализације структуре. Нанокристална легура из полазне аморфне легуре се најчешће добија контролисаним одгревањем током 60 мин. – 180 мин. у заштитној атмосфери или вакууму при температурама блиским температури кристализације материјала (у случају испитиване легуре Fe₇₂Cu₁V₄Si₁₅B₈ на температурама одгревања од око 500 °C).

Испитивана легура Fe₇₂Cu₁V₄Si₁₅B₈ се сврстава у групу магнетно меких материјала, које имају вредност коерцитивног поља до 200 A/m (у зависности од

микроструктуре) и нешто нижу вредност магнетне пермеабилности у односу на аморфне легуре на бази кобалта (Co), али знатно бољи однос цена/перформансе с обзиром на високу цену кобалта. Ова група материјала има ниску вредност магнетострикции засићења ($\lambda_s < 10^{-6}$), док магнетна индукција засићења (B_s) износи око 1,3 Т, а реманентни однос (B_r/B_s) у неодгреваном стању је око 0,8. Битна карактеристика овог типа легура је њихова ултра-фина наноструктура са искристалисаним зрнима ($\text{bcc } \alpha\text{-Fe/Si}$) величине од 10 – 40 nm.

У пријави докторске дисертације предложене су адекватне методе за карактеризацију структуре и одређивање електричних и магнетних својстава материјала. Наведене методе омогућавају коректан приказ синтезе предметне феромагнетне легуре, поступка добијања испитиваних аморфних трака, као и показатеље о применљивости у пракси. Сходно хронологији испитивања у тријади синтеза-структура-својства примениће се следеће методе:

- 1) технологија брзог хлађења растопа легуре на бакарном диску, којом се добија аморфна трака,
- 2) одгревање аморфне структуре у заштитној атмосфери инертног гаса,
- 3) диференцијално термијска анализа (DTA),
- 4) дифракција X - зрачења (XRD),
- 5) анализа скенирајућим електронским микроскопом (SEM),
- 6) анализа скенирајућим атомским микроскопом - AFM анализа (Atomic Force Microscope),
- 7) Мезбауерова спектроскопија,
- 8) Фарадејева метода за термомагнетна мерења,
- 9) мерење магнетоимпедансног (МИ) ефекта,
- 10) снимање магнетног хистерезиса.

3. Образложење теме за израду докторске дисертације које омогућава закључак да је у питању оригинална идеја или оригиналан начин анализирања проблема

У циљу истраживања материјала адекватних за примену у техници потребно је испитати постојање њихове мултифункционалности, тј. да ли поседују задовољавајућу комбинацију електричних, магнетних, механичких и хемијских својстава. Тема докторске дисертације је наставак досадашњих вишедеценијских истраживања аморфних металних система на Факултету техничких наука у Чачку, при којима су детаљно испитиване метастабилне легуре на бази гвожђа: $\text{Fe}_{72}\text{Al}_5\text{Ga}_2\text{P}_{11}\text{C}_6\text{B}_4$; $\text{Fe}_{89,8}\text{Ni}_{1,5}\text{Si}_{5,2}\text{B}_3\text{C}_{0,5}$; $\text{Fe}_{81}\text{B}_{13}\text{Si}_4\text{C}_2$; $\text{Fe}_{73,5}\text{Cu}_{1,5}\text{Nb}_3\text{Si}_{13}\text{B}_9$; $\text{Fe}_{65,5}\text{Cr}_4\text{Mo}_4\text{Ga}_4\text{P}_{12}\text{C}_5\text{B}_{5,5}$; и др.

За реализацију истраживања планираних у оквиру дисертације на Војнотехничком институту у Београду докторанд је конструисао генератор магнетног поља на бази Хелмхолцових калема а затим развио методу за карактеризацију хомогености генерисаног поља. Наведени систем калемова је основа за испитивање магнетоимпедансног (МИ) ефекта коришћењем уређаја за анализу импедансе испитиваног узорка у фреквентном опсегу од 1 MHz до 300 MHz. За добијање поузданих резултата мерења конструисани су одговарајући носач узорка и конектор на мерни уређај у изведби „микрострип“ медијума за пренос микроталасних сигнала

што је резултат оригиналне и свеобухватне анализе ове проблематике са конкретним предлозима докторанда за одговарајућа техничка и методолошка решење.

Мерна апаратура коју заједно чине генератор магнетног поља и уређај за анализу импедансе омогућавају ефикасно испитивање МИ ефекта у фреквентном опсегу и при вредностима спољашњег магнетног поља за које се очекују највеће промене импедансе, тј. највећа осетљивост магнетног сензора у облику траке.

Легура $\text{Fe}_{72}\text{Cu}_1\text{V}_4\text{Si}_{15}\text{B}_8$ из система **Fe-Cu-TM-Si-B (TM – V)** до сада није детаљно испитивана као магнетно меки материјал за израду МИ елемента. Анализа утицаја термичких третмана спроведених у заштитној атмосфери на структурне промене и креирање нанокристалита распоређених у аморфној матрици су неопходни за евиденцију и правилно тумачење МИ ефекта код испитиваних узорака ове легуре у облику трака. Примена Мезбауерове спектроскопије са могућностима анализе микроструктуре у првој координационој сфери атома гвожђа Fe као и евидентиране расподеле хиперфиног магнетног поља даће интересантне и нове податке који се могу користити за додатне анализе других аморфних и нанокристалних легура са комбинацијом елемената **Fe-V**.

4. Усклађеност дефиниције предмета истраживања, основних појмова, предложене хипотезе, извора података, метода анализе са критеријумима науке уз поштовање научних принципа у изради коначне верзије докторске дисертације

Кандидат Радослав Сурла је у достављеној пријави теме докторске дисертације правилно дефинисао предмет истраживања користећи одговарајуће научне и стручне термине из савремене науке о материјалима. Предложене хипотезе су базиране на обимним изворима података из међународне научне литературе у области испитивања феромагнетних аморфних и нанокристалних материјала реализованих у најеминентнијим светским истраживачким центрима. На основу свеобухватне анализе проблематике која је предмет докторске дисертације предложене су и адекватне експерименталне методе уз поштовање свих научноистраживачких принципа.

5. Преглед научно-истраживачког рада кандидата

Биографски подаци

Радослав С. Сурла, рођен је 16. јануара 1974. године у Загребу, а основну школу завршио је у Оџацима. Потом је уписао Техничку средњу војну школу у Загребу, смер електроенергетика, коју је завршио 1992. године у Крушевцу и засновао радни однос као подофицир Војске Србије (тада Југославије) у Гарнизону Ђуприја. Школске 1992./1993. уписао је Вишу техничку школу у Нишу, смер Електроника, где је дипломирао 1995. године. Школске 2000/2001. године уписао је Технички факултет у Чачку где је дипломирао 2003. године. Докторске студије уписао је школске 2013/2014 године на Факултету техничких наука у Чачку, студијски програм Електротехничко и рачунарско инжењерство, модул „Савремени материјали и технологије у електротехници“ и положио све испите. Током академског образовања, све време је у

радном односу у Војсци Србије, где сада обавља инжењерске дужности као официр Војске Србије у Војнотехничком институту (ВТИ). Поред редовних радних активности бави и истраживањима у склопу докторских академских студија на ФТН Чачак. С тим у вези на Војнотехничком институту је креирао мерну методу мерења магнетоимпедансног ефекта и реализовао Техничко решење генератора хомогеног магнетног поља које је у поступку признавање код надлежног Матичног научног одбора ресорног Министарства науке.

Стечено научно-истраживачко искуство

Докторске академске студије уписао је школске 2013/14 године на Факултету техничких наука у Чачку Универзитета у Крагујевцу, на смеру Електротехничко и рачунарско инжењерство, модул Савремени материјали и технологије у електротехници, где је положио све испите предвиђене планом и програмом докторских студија.

Списак положених испита:

- 1) Теоријске и експерименталне методе истраживања (оцена: 10, 5 ЕСПБ)
- 2) Физика чврстог стања (оцена: 9, 10 ЕСПБ)
- 3) Специјална електронска мерења (оцена: 10, 15 ЕСПБ)
- 4) Карактеризација и примена аморфних електромагнетика у електроенергетици (оцена: 9, 15 ЕСПБ)
- 5) Сензорика (оцена: 9, 15 ЕСПБ)
- 6) Савремени магнетни материјали (оцена: 10, 15 ЕСПБ)
- 7) Дисперзиони материјали, добијање, карактерисање и компактирање (оцена: 10, 15 ЕСПБ)
- 8) Докторска дисертација-теоријске основе (оцена: 10, 30 ЕСПБ)

Списак објављених научних и стручних радова из научне области из које је пријављена тема докторске дисертације

Радови чији је кандидат први аутор или коаутор публиковани су у међународном часопису категорије М21, домаћем часопису међународног значаја М24 и презентовани на међународним и домаћим научним конференцијама.

Рад у истакнутом међународном часопису М21:

- 1) M.Vasić, R. Surla, D. Minić, Lj. Radović, N. Mitrović, A. Maričić, and D. Minić, "Thermally Induced Microstructural Transformations of Fe₇₂Si₁₅B₈V₄Cu₁ Alloy", Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 48a (9), September 2017, pp. 4393–4402, Print ISSN: 1073-5623, eISSN: 1543-1940.

Рад у часопису међународног значаја М24

- 2) **R. Surla**, N. Mitrović, S. Đukić, V. Ibrahimović “Amorphous Fe₇₂Cu₁V₄Si₁₅B₈ Ribbon as Magneto-Impedance Sensing Element”, Serbian Journal of Electrical Engineering, Vol. 13 (3), (2016), pp. 381-394, Print ISSN: 1451-4869, eISSN: 2217-7183.

Радови саопштени на међународном скупу штампани у целини М 33

- 3) **R. Surla**, M. Vasić, N. Mitrović, Lj. Radović, Lj. Totovski, D. Minić “Thermal Stability and Microstructural Changes Induced by Annealing in Nanocrystalline Fe₇₂Cu₁V₄Si₁₅B₈ Alloy”, ОТЕН 2016, 7th International Scientific Conference on Defensive Technologies, Belgrade, 6-7 October 2016, pp. 678-681. ISBN: 978-86-81123-82-9.
- 4) M. M. Vasić, **R. Surla**, J. Papan, N. Begović, N. Mitrović and D. M. Minić „Thermally Induced Structural Transformations of Multicomponent Fe₇₂Cu₁V₄Si₁₅B₈ Alloy“, PHYSICAL CHEMISTRY 2016, 13th International Conference on Fundamental and Applied Aspects of Physical Chemistry, 26-30 September, 2016. Belgrade, Serbia, Proceedings Volume II, pp. 597-600, ISBN 978-86-82475-33-0.
- 5) **R. Surla**, N. Mitrović, J. Orelj, V. Joksimović „The Magnetoimpedance Effect and Principles of Measuring”, 7th International Scientific Conference Technics and Informatics in Education, Faculty of Technical Sciences, Čačak, Serbia, 25-27 May 2018, pp. 328-333, ISBN: 978-86-7776-226-1.

Рад саопштен на међународном скупу штампан у изводу М 34

- 6) N. Mitrović, **R. Surla**, A. Kalezić-Glisović, M. Kićanović, D. Minić „Magnetoimpedance Effect of Metastable Fe₇₂Cu₁V₄Si₁₅B₈ Alloy Ribbons”, YUCOMAT 2015 Conference Herceg Novi, Montenegro, 31 August - 4 September, 2015, Book of Abstracts, p. 69, ISBN 978-86-919111-0-2.

Радови саопштени на скупу националног значаја штампани у целини М 63

- 7) **Р.Сурла**, Н. Митровић, С. Ђукић, В. Ибрахимовић „Магнетноимпедансни ефекат аморфне траке Fe₇₂Cu₁V₄Si₁₅B₈“, Зборник 60. конференције за електронику, телекомуникације, рачунарство, аутоматику и нуклеарну технику ЕТРАН 2016, Златибор, 13. до 16. јуна 2016. године, стр. NM1.2.1-6, ISBN 978-86-7466-618-0 (рад награђен на секцији Нови Материјали ЕТРАН 2016).
- 8) **Р. Сурла**, Н. Митровић, В. Ибрахимовић, М. Васић, Д. Минић, С. Милетић „Оптимизација магнетноимпедансног сензора на бази метастабилне Fe-Cu-V-Si-B легуре“, Зборник 61. Конференције за електронику, телекомуникације, рачунарство, аутоматику и нуклеарну технику, ЕТРАН 2017, Кладово, 05. до 08. јуна 2017, стр. NM1.2.1-6, ISBN 978-86-7466-692-0.

На основу приложене документације, као и познавања досадашњег научног рада кандидата **Радослава Сурле**, дипл. инж. ел. утврђујемо следећи

ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ КОМИСИЈЕ

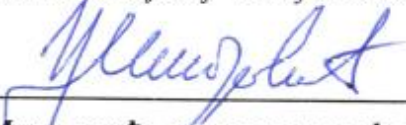
1. Кандидат Радослав Сурла испуњава све формалне и суштинске услове који се захтевају Законом о високом образовању, Статутом Универзитета у Крагујевцу и Статутом Факултета техничких наука у Чачку за одобрење теме за израду докторске дисертације.
2. Предложена тема дисертације УТИЦАЈ ОДГРЕВАЊА НА СТРУКТУРНЕ ТРАНСФОРМАЦИЈЕ И МАГНЕТНА СВОЈСТВА ЛЕГУРЕ $Fe_{72}Cu_1V_4Si_{15}B_8$ припада научној области истраживања савремених аморфних и нанокристалних феромагнетних материјала. На основу предложених полазних хипотеза, научних циљева, метода истраживања и очекиваних теоријских и експерименталних резултата, Комисија сматра да је тема дисертације актуелна, што потврђује и део резултата који су до сада публиковани у водећим међународним часописима и презентовани на научним скуповима. Тематика је посебно атрактивна за практичну примену магнетоимпедансног ефекта који се јавља код испитиване легуре пре и након спроведених термичких третмана.
3. Комисија референата предлаже Наставно-научном већу Факултета техничких наука у Чачку Универзитета у Крагујевцу и Већу за техничко-технолошке науке Универзитета у Крагујевцу да прихвати Извештај и кандидату Радославу Сурли одобри израду докторске дисертације под напред наведеном називом.
4. Комисија предлаже да ментор ове докторске дисертације буде др Небојша Митровић, редовни професор Факултета техничких наука у Чачку Универзитета у Крагујевцу.


У Чачку и Београду, септембра 2018. год

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

1. 
Др Слободан Ђукић, редовни професор, председник
Научна област: Електроника

Факултет техничких наука у Чачку Универзитета у Крагујевцу

2. 
Др Небојша Митровић, редовни професор, предложени ментор
Научне области: Примењена физика, Физика и технологија материјала
Факултет техничких наука у Чачку Универзитета у Крагујевцу

3. 
Др Милица Васић, научни сарадник, члан
Научна област: Природно – математичке науке - хемија
Факултет за физичку хемију Универзитета у Београду