

НАСТАВНО - НАУЧНОМ ВЕЋУ
ФАКУЛТЕТА ТЕХНИЧКИХ НАУКА У ЧАЧКУ

Предмет: Извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Боривоја Недељковића, дипл. инж. металургије

Одлуком Већа за техничко - технолошке науке Универзитета у Крагујевцу број IV-04-579/14 од 10. јула 2019. године, на предлог Наставно-научног већа Факултета техничких наука у Чачку (одлука бр. 10-1464/5 од 19. јуна 2019. године), именовани смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Боривоја Недељковића, дипл. инж. металургије под насловом:

**“КАРАКТЕРИЗАЦИЈА FeCoV ЛЕГУРЕ ДОБИЈЕНЕ ТЕХНОЛОГИЈОМ БРИЗГАЊА
КОМПОЗИТА ПРАХА СА РАСТОПЉЕНИМ ВЕЗИВОМ“**

На основу увида у приложену докторску дисертацију и Извештаја комисије за оцену подобности кандидата и научне заснованости теме докторске дисертације, која је одобрена за израду одлуком Наставно-научног већа Факултета техничких наука у Чачку бр. 5-289/6 од 24. фебруара 2016. године и одлуком Стручног већа за техничко-технолошке науке Универзитета у Крагујевцу бр. IV-01-217/13 од 13. априла 2016. године, на основу Правилника о пријави, изради и одбрани докторске дисертације Универзитета у Крагујевцу, Комисија подноси Наставно - научном већу следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Значај и допринос докторске дисертације са становишта актуелног стања у одређеној научној области

Докторска дисертација кандидата Боривоја Недељковића дипл. инж. металургије под називом “КАРАКТЕРИЗАЦИЈА FeCoV ЛЕГУРЕ ДОБИЈЕНЕ ТЕХНОЛОГИЈОМ БРИЗГАЊА КОМПОЗИТА ПРАХА СА РАСТОПЉЕНИМ ВЕЗИВОМ“, представља резултат оригиналног научноистраживачког рада у области примене савремених технологија за добијање магнетних материјала.

Предмет испитивања у овој докторској дисертацији су узорци легуре састава 49Fe49Co2V, добијени технологијом бризгања композита праха са растопљеним везивом (Powder Injection Moulding PIM - технологијом), тј. истраживана је корелација поступка синтеровања са структурним и мултифункционалним (магнетним и механичким) својствима. Легуре FeCoV система су најбоље комерцијалне легуре међу полутврдим магнетним материјалима (semi-hard magnetic materials) који задржавају високе

вредности магнетне индукције при високим радним температурама. Највећи број магнетно меких и магнетно полутврђих материјала поседује вредности Киријеве температуре између 350 °C и 550 °C, док једино легура из система FeCoV - VACOFLUX®50 поседује температуру прелаза феромагнетик-парамагнетик чак око 950 °C.

Додатак од око 2 мас. % ванадијума - V у бинарне легуре Fe-Co система спречава формирање уређене структуре, омогућава оптималну комбинацију механичких, електричних и магнетних својстава уз високу отпорности на корозију. Дакле, у односу на остале магнетне материјале, FeCoV легуре имају најбољи баланс термичких (Киријева температура изнад 800 °C), магнетних (магнетна индукција засићења изнад 2 T), механичких (висока тврдоћа HV₁₀ ~ 300-400) и електричних (специфична електрична отпорност изнад 30 μΩcm) својстава, и то уз повољан однос цена/перформансе.

Бризгање композита праха са растопљеним везивом (PIM технологија) данас је у широкој употреби за производњу компоненти и магнетно меких и магнетно тврђих материјала са сложене геометријом, било да се ради о керамичким CIM (нпр. ферити) или металним MIM (нпр. легуре система FeCoV) магнетима. У поређењу са конвенционалним методама производње сама PIM/MIM технологија садржи већи број процесних корака. Међутим, многи делови комплексних геометријских облика у великим серијама се могу лакше и јефтиније произвести путем MIM технологије, па постоји изражен интерес испитивања добијања феромагнетних језгара на бази FeCoV легуре за примену у високотемпературским радним срединама.

2. Оцена да је урађена докторска дисертација резултат оригиналног научног рада кандидата у одговарајућој научној области

На основу позитивног Извештаја о провери на плагијаризам докторске дисертације кандидата Боривоја Недељковића, дипл. инж. металургије, под називом “КАРАКТЕРИЗАЦИЈА FeCoV ЛЕГУРЕ ДОБИЈЕНЕ ТЕХНОЛОГИЈОМ БРИЗГАЊА КОМПОЗИТА ПРАХА СА РАСТОПЉЕНИМ ВЕЗИВОМ”, (Извештај Универзитета у Крагујевцу бр. IV-04-499/2 од 27. јуна 2019. године) потврђено је да је докторска дисертација резултат оригиналног научног рада кандидата.

У оквиру ове докторске дисертације, MIM технологијом бризгања композита праха са растопљеним везивом су произведени “браон узорци” FeCoV торусних језгара дебљине око 28 mm, спољашњег пречника 18 mm и унутрашњег пречника 10 mm. Селектовани узорци су синтеровани на 1370 °C, 1400 °C, 1430 °C и 1460 °C у атмосфери водоника током 3,5 сата. Кандидат је затим детаљно обавио испитивање структурних, механичких и магнетних својстава добијених узорака 49Fe49Co2V легуре у зависности од примењених технолошких параметара и експлоатационих услова.

Истраживањима спроведеним током израде дисертације дошло се до следећих резултата:

- Кристална фаза α'-FeCo (структура типа B2) је регистрована при свим температурама синтеровања (1370 °C, 1400 °C, 1430 °C и 1460 °C). Ову кристалну фазу карактерише висока вредност Киријеве температуре (T_c ≈ 1390 K = 1117 °C).
- Повећање температуре синтеровања је константно праћено порастом удела кристалне фазе што је детектовано повећањем интензитета кристализационих

пикова α' -FeCo фазе и нарочито је изражено при највишим температурама синтеровања од 1430 °C и 1460 °C.

- Микроструктуре испитиваних узорака добијене скенирајућом електронском микроскопијом - SEM показују да је током синтеровања дошло до топљења честица праха које је директно пропорционално температури синтеровања.
- Најнижа вредност тврдоће је регистрована код узорка синтерованог на 1400 °C, док даљи пораст температуре синтеровања прати повећање тврдоће. Измерене вредности тврдоће HV10 су у релативно доброј сагласности са литературним подацима за узорке FeCoV добијене стандардном металуршком технологијом индукционо топљење/ливење/хладно ваљање.
- С обзиром на неопходност истовременог достизања добрих и магнетних и механичких својстава извршено је поређење вредности коерцитивног поља $H_{C/DC}$ и тврдоће HV₁₀. Уочено је да повећање тврдоће са порастом температуре синтеровања прати и смањење DC коерцитивности $H_{C/DC}$.
- У оквиру истраживања магнетних својстава спроведена су мерења кривих магнетног хистерезиса B(H), и то при константним вредностима радних фреквенција: 5 Hz, 10 Hz, 20 Hz, 40 Hz, 50 Hz и 60 Hz.
- Највеће вредности релативне магнетне пермеабилности ($\mu_r \approx 210$ при фреквенцији $f = 5$ Hz) поседује узорак синтерован на температури 1370 °C, што је у доброј сагласности са литературним вредностима.
- Код свих испитиваних узорака је евидентно ширење кривих магнетног хистерезиса са повећањем фреквенције услед пораста и хистерезисних губитака и губитака услед вихорних струја са порастом радне учестаности.
- Анализа фреквентних зависности губитака услед вихорних струја свих испитиваних узорка показују да најмање магнетне губитке поседује узорак синтерован на температури 1370 °C.
- Спроведена је и анализа фреквентне зависности коерцитивности $H_c(f)$ према литературном моделу који укључује и допринос анормалних вихорних струја (код узорака са најнижом вредношћу коерцитивног поља, тј. синтерованих на температурама 1370 °C и 1400 °C).
- На основу резултата свеобухватних анализа (микроструктуре, корецитивне силе, магнетне пермеабилности, тврдоће) процењен је оптимални термички третман за добијање материјала са унапређеним мултифункционалним својствима.

3. Преглед остварених резултата кандидата у одређеној научној области

Боривоје Недељковић је рођен 10. 03. 1974. године у Чачку, где је завршио основну и техничку школу са одличним успехом. Студије на одсеку за Металуршко инжењерство на Технолошко-металуршком факултету Универзитета у Београду, завршио је 2001. године са просечном оценом 8,24 (осам двадесетчетири). Дипломски рад под називом „Утицај примене лива солима за заштиту, дегазацију и модификацију на квалитет одливака алуминијума и легура на бази алуминијума“ одбранио је са оценом 10 (десет) и стекао звање дипломирани инжењер металургије.

Током 2002-2003. године радио је у Фабрици резног алата у Чачку. Радни однос на Техничком факултету у Чачку, као стручни сарадник на Катедри за физику и материјале, засновао је 2004. године. У истраживачко звање, истраживач-приправник, изабран је 2004. године.

На Факултету техничких наука у Чачку школске 2012/2013 године уписао је докторске академске студије, студијски програм ДАС ЕРИ, модул Савремени материјали и технологије у електротехници. Положио је све испите у складу са акредитованим студијским програмом са просечном оценом 9,625.

У свом досадашњем раду објавио је укупно 25 научних радова, од тога 5 радова у часописима са SCI листе, 1 рад у међународном часопису, 6 радова са међународних скупова штампаних у целини, 7 радова са међународних скупова штампаних у изводу и 6 радова са националног скупа штампаних у целини.

Објављени радови

Рад штампан у врхунском часопису међународног значаја M21

1.B. Jordović, **B. Nedeljković**, N. Mitrović, J. Živanić, A. Maričić, "Effect of treatment on structural changes in metastable AlSi10Mg alloy", Journal of Mining and Metallurgy, Section B Metallurgy, (2014), Vol. 50(2), pp. 133-137, ISSN: 0255-5476

Рад штампан у истакнутом часопису међународног значаја M22

1. **B. Nedeljković**, N. Mitrović, J. Orelj, N. Obradović, V. Pavlović, "Characterization of FeCoV alloy processed by PIM/MIM route", Science of Sintering, (2017) Vol. 49 (3), pp. 299 - 309, ISSN: 0350-820X

Радови штампани у часописима међународног значаја M23

1.I. Jovanović, M. Stevanović, **B. Nedeljković**, N. Ignjatović, "The effect of processing parameters on characteristics of poly-L-lactide microspheres", Materials Science Forum, (2007) Vol. 555 pp. 453-458, ISSN: 0255-5476

2.M. Ćosić, Z. Aćimović-Pavlović, A. Terzić, **B. Nedeljković**, Lj Pavlović, "Process parameters influence on microstructural properties of hypereutectic Al-18wt% Si alloys obtained by rheocasting process", Metalurgia International, (2012), Vol. 17 (3), pp. 88-93, ISSN: 1582-2214

3.R. Slavković, Z. Jugović, I. Milicević, M. Popović, N. Dučić, **B. Nedeljković**, "Simulation methodology as the basis of Cad/Cam/Cae design of dynamically loaded castings in machine building", Metalurgia International, (2012), Vol. 17 (4), pp. 19-26, ISSN: 1582-2214

Рад штампан у водећем часопису националног значаја M51

1.I. Mitranić, M. Stevanović, **B. Nedeljković**, N. Ignjatović, D. Uskoković, "Controllable synthesis of horseradish peroxidase loaded poly(D,L-lactide) nanospheres", Journal of Bionanoscience, (2009), Vol. 3 (1), pp. 22-32, ISSN: 1557-7910

Радови саопштени на међународном скупу штампани у целини М33

1.N. Mitrović, B. Čukić, B. Jordović, A. Maričić, **B. Nedeljković**, "Thermal and microstructure characterization of metastable ZrTiCuNiAl alloy prepared by cooper-mold casting", 9th International Research/Expert Conference Trends in Development of Machinery and Associated Technology, TMT2005, 26-30. September, Antalya, Turkey, 2005. Proceedings pp. 849-852 ISBN: 9958-617-28-5

2.A. Patarić, B. Jordović, **B. Nedeljković**, Z. Gulišija, M. Stefanović, V. Đorđević, "The possibility application of new production process for casting aluminium alloys", 31. Conference on production Engineering of Serbia and Montenegro with foreign participation, 19.-21.09.2006., Kragujevac, Serbia, Proceedings, pp. 257-262, ISBN: 86-80581-92-5

3.Z. Gulišija, A. Patarić, B. Jordović, S. Marković, **B. Nedeljković**, "Characterization of electromagnetic casting 2024 Al alloy ingots", 4th Balkan Conference on Metallurgy, September 27-29. 2006., Zlatibor, Srbija, Proceedings, pp. 681-686 ISBN: 86-904393-4-X

4. A. Patarić, Z. Gulišija, B. Jordović, **B. Nedeljković**, "Effect of electromagnetic field on the microstructure of continual casting Al 2024 alloys ingots", 3th International Conference, Deformation Processing and Structure of Materials, 20-22. September 2007., Beograd, Srbija, Proceedings pp. 141-149, ISBN: 86-904393-9-3

5.M. Luković, A. Kalezić-Glišović, **B. Nedeljković**, S. Antić, "A tomographic method for determining the distance between standing wave anti-nodes and the frequency of electromagnetic radiation inside a microwave oven", 7th International Scientific Conference Technics and Informatics in Education, 25-27th May, 2018, Čačak, Serbia, pp. 334-339 ISBN: 978-86-7776-226-1

6.J. Baralić, B. Nedić, **B. Nedeljković**, P. Janković, "Wear of the focusing tube in abrasive water jet machining", The 4th International Conference Mechanical Engineering in XXI Century, 19 – 20 April, 2018, Niš, Serbia, Proceedings pp. 321-324, ISBN 978-86-6055-103-2

Радови саопштени на међународном скупу штампани у изводу М 34

1.N. Mitrović, B. Zlatkov, H. Danninger, **B. Nedeljković**, A. Kalezić-Glišović, A. Maričić, S. Djukić, "Characterization of iron-cobalt based alloys processed by PIM route", YUCOMAT 2011 Conference Herceg Novi, Montenegro, september 5-9, 2011, Book of Abstracts p.129, ISBN 978-86-80321-27-1

2.B. Jordović, A. Maričić, **B. Nedeljković**, D. Sretenović, "Influence of thermal effects on structural changes in nanocrystalline AlSi10Mg alloy, YUCOMAT 2012, Herceg Novi, Montenegro, September 3-7, 2012. Book of Abstracts, p.63. COBISS.SR-ID 1538256618,

3.N. Mitrović, B. Zlatkov, E. Gašanin, M. Mitrić, **B. Nedeljković**, S. Randjić, V.Pavlović, H.Danninger, "Magnetic and structural properties of iron-cobalt based alloys", YUCOMAT 2012 Herceg Novi, Montenegro, September 3-7, Book of Abstracts p.82. COBISS.SR-ID 1538256618,

4.M. Spasojević, **B. Nedeljković**, S. Đukić, S. Randjić, N. Mitrović, Z. Ristanović, "Temperature dependence of electrical and magnetic properties of NiCoCu alloy powder", YUCOMAT 2013, Herceg Novi, Crna Gora, 2. - 6. Sep, Book of Abstracts p. 120. COBISS.SR-ID 1538257642,

5.N. Mitrović, E. Gašanin, A. Kalezić-Glišović, **B. Nedeljković**, M.Kićanović, "Magnetic characterization of PIM MnZn ferrite for power electronic application", The Third Serbian

Ceramic Society Conference »Advanced Ceramics and Application«, New Frontiers in Multifunctional Material Science and Processing, Belgrade, 29. Sep - 1. Oct, 2014 Book of Abstracts p. 65, ISBN 978-94-6239-156-7

6.B. Nedeljković, N. Mitrović, S. Aleksić, M. Popović, V. Pavlović, S. Djukić "Magnetic properties of FeCoV alloy prepared by powder injection metal PIM-technology" The Fourth Serbian Ceramic Society Conference »Advanced Ceramics and Application«, New Frontiers in Multifunctional Material Science and Processing, Belgrade, September 21-23, 2015, Book of Abstracts p. 69, ISBN 978-86-915627-3-1

7.B. Nedeljković, B. Koprivica, N. Mitrović, "Frequency dependence of the coercivity of FeCoV alloy prepared by PIM/MIM technology", The Seventh Serbian Ceramic Society Conference »Advanced Ceramics and Application«, New Frontiers in Multifunctional Material Science and Processing, September 17-19, 2018, Belgrade, Book of Abstracts p. 97, ISBN 978-86-915627-6-2

Радови саопштени на скупу националног значаја штампани у целини М 63

1.Н. Митровић, Б. Јордовић, Б. Чукић, **Б. Недељковић**, С. Рот, М. Стојка "Оптимизација функционалних својстава аморфне масивне металне легуре $Fe_{65,5}Cr_4Mo_4Ga_4P_{12}C_5B_{5,5}$ ", Зборник радова 51. Конференције за ЕТРАН 2007, Игало, 4-8 јун 2007, НМ 1.6, стр. ISBN: 978-86-80509-62-4

2.Б. Чукић, **Б. Недељковић**, Н. Митровић, М. Поповић, С. Рот, М. Стојка "Механичка и магнетна својства термички третиране аморфне масивне металне легуре $Fe_{65,5}Cr_4Mo_4Ga_4P_{12}C_5B_{5,5}$ ", Зборник радова 56. Конференције ЕТРАН 2012, Златибор, 11-14 јун 2012 године, НМ 1.4 стр. 1-4. ISBN: 978-86-80509-67-9

3.Б. Чукић, Н. Митровић, А. Маричић, **Б. Недељковић**, М. Поповић, М. Стојка, "Утицај одгревања на магнетну пермеабилност, микроструктуру и тврдоћу аморфне легуре FeCrMoGaPCB" Зборник радова 57. Конференције ЕТРАН 2013, Златибор, 3-6 јун, 2013. године, НМ 1.5. стр. 1-5. ISBN: 978-86-80509-68-6

4.Б. Чукић, Н. Митровић, Н. Лабус, **Б. Недељковић**, М. Поповић, М. Луковић, М. Стојка, "Корелација процеса кристализације и термичког ширења аморфне масивне металне легуре FeCrMoGaPCB" Зборник радова 58. Конференције ЕТРАН 2014, Врњачка Бања, 2-5 јун 2014. године, НМ 1.4. стр. 1-6, ISBN: 978-86-80509-70-9

5.Б. Недељковић, Н. Митровић, В. Павловић, М. Поповић, М. Луковић, С. Ђукић, Х. Данингер, "Карактеризација FeCoV легуре добијене технологијом бризгања композита праха са растопљеним везивом", Зборник радова 59. Конференције ЕТРАН 2015, Сребрно језеро, 8-11 јун, 2015, НМ1.4 стр. 1-4 ISBN: 978-86-80509-72-3

6.Б. Недељковић, Н. Митровић, Ј. Орел, Б. Копривица, „Магнетна својства FeCoV легуре добијене PIM/MIM технологијом бризгања композита праха са растопљеним везивом“, Зборник радова 62. Конференције ЕТРАН 2018, Палић, 11-14 јун, 2018, НМ 1.2 стр. 349-354 ISBN: 978-86-7466-752-1

4. Оцена о испуњености обима и квалитета у односу на пријављену тему

Докторска дисертација кандидата Боривоја Недељковића под називом “КАРАКТЕРИЗАЦИЈА FeCoV ЛЕГУРЕ ДОБИЈЕНЕ ТЕХНОЛОГИЈОМ БРИЗГАЊА КОМПОЗИТА ПРАХА СА РАСТОПЉЕНИМ ВЕЗИВОМ“, одговара по садржају прихваћеној теми од стране Наставно - научног већа Факултета техничких наука у Чачку и Стручног већа за техничко - технолошке науке Универзитета у Крагујевцу. По квалитету и обиму истраживања у потпуности задовољава све научне, стручне и законске услове за докторску дисертацију.

Дисертација је написана на 100 страна, садржи 67 слика, 6 табела и цитирано је 88 библиографских наслова.

Докторска дисертација садржи следећа поглавља:

1. УВОД
2. ТЕОРИЈСКИ ДЕО
3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ДЕО
4. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА
5. ЗАКЉУЧАК

ЛИТЕРАТУРА

У **Уводном делу** истакнут је значај и развој FeCoV легура са акцентом на легуре које садрже 45-55 мас. % Fe, 45-55 мас. % Co и 1.5 - 2.5 мас. % V. Указано је на најновија истраживања у овој области са приказом могућности примене PIM/MIM технологије за добијање легура са магнетним својствима. Затим су представљени главни циљеви, експерименталне методе спроведене током истраживања и очекивани резултати до којих је могуће доћи током израде докторске дисертације.

У **Теоријском делу** је приказан преглед стања у подручју истраживања FeCo и FeCoV легура са подацима о атрактивности легуре састава $49\text{Fe}49\text{Co}2\text{V}$ као гранично магнетно меког материјала, која далеко надмашују најближе конкурентне легуре у погледу високотемпературних магнетних својстава. Затим су приказани резултати испитивања својстава FeCo и FeCoV легура добијених PIM/MIM технологијом без завршног високотемпературског синтеровања ($T_{\text{ sint}} < 1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Напоменуто је и да се упоредо са PIM/MIM технологијом испитује израда FeCoV легура поступцима механохемијског процесирања (формирање наноструктурних прахова), као и различите комбинације формирања композита.

У **Експерименталном делу** је најпре детаљно описан поступак добијања легуре FeCoV применом технологије бризгања композита праха са растопљеним везивом (PIM/MIM технологија) у свим процесним корацима: од припреме композита преко бризгања растопљеног композита и одстрањивања везива, до финалног процеса синтеровања. С обзиром да коначна мултифункционална својства легуре највише зависе од тога како се одигравају структурне трансформације током синтеровања, приказане су све три фазе овог процеса: почетна, интермедијарна и крајња фаза. Наглашена је и потреба правилног димензионисања зелених узорака с обзиром на њихово изражено скупљање током синтеровања. У поређењу са конвенционалним методама производње сама **PIM/MIM** технологија садржи већи број процесних корака, али многи делови сложених геометријских облика не могу бити произведени без ове технологије па су сви

елементи економски оправдани с обзиром на велике серије производа, широки спектар доступних материјала, ниске трошкове радне снаге, минималне губитке и мали број операција у финалној обради.

Структурне трансформације настале током високотемпературског синтеровања испитане су рендгеноструктурним истраживањима (XRD анализа), оптичком микроскопијом (ОМ) и скенирајућом електронском микроскопијом (SEM метода). Термичка стабилност је испитивана Фарадејевом вагом, а криве магнетног хистерезиса $B(H)$ су мерене помоћу хистерезиографа на узорцима у облику торуса. Механичка својства испитивана су мерењем тврдоће по Викерсу HV_{10} .

У делу **Резултати и дискусија** су најпре дата истраживања структурних својстава испитиваних узорака легуре FeCoV спроведена дифракцијом X-зрачења-XRD и скенирајућом електронском микроскопијом-SEM. Квантитативни показатељи испитиваних микроструктура (у зависности од примењених температура синтеровања) добијени стереолошком анализом су обухватили хистограме релативне фреквенције и кумулативне криве расподеле вредности параметара: величине честица D_{max} , Feret X и Feret Y (и то минималне, максималне и средње вредности сва три праћена параметра). На основу упоредних кривих кумулативних учесталости анализиран је утицај повећања температуре синтеровања на вредности величине честица D_{max} , Feret X и Feret Y. С обзиром на неопходност истовременог достизања добрих и магнетних и механичких својстава извршено је поређење вредности коерцитивног поља $H_{C/DC}$ и тврдоће HV_{10} у зависности од температуре синтеровања. У оквиру истраживања магнетних својстава спроведена су мерења кривих магнетног хистерезиса $B(H)$ и то најпре при константним вредностима радних фреквенција: 5 Hz, 10 Hz, 20 Hz, 40 Hz, 50 Hz и 60 Hz, а затим и при константним вредностима спољашњег магнетног поља (до максималног поља од $H_m = 10$ kA/m). Криве хистерезиса су најпре коришћене за одређивање фреквентне зависности хистерезисних губитака (по јединици масе - P_h [W/kg]) а затим и губитака енергије услед класичних вихорних струја (по јединици масе - P_e [W/kg]) а према Штајнмицовим једначинама. Анализа фреквентне зависности коерцитивности $H_c(f)$ испитиваних узорака легуре FeCoV где је у обзир узиман и додатни члан губитака услед аномалних вихорних струја, показала је оправданост да се код кривих хистерезиса које имају нижи реманентни однос (B_r/B_s) и за ниске радне учесталости може користити модел са збиром хистерезисних губитака и губитака услед класичних вихорних струја.

Упоредном анализом експерименталних резултата добијених различитим методама испитивања, утврђена је корелација између еволуираних структурних промена у FeCoV легури и одговарајућих промена функционалних својстава (тврдоћа, коерцитивно поље, магнетна пермеабилност и магнетни губици).

У **Закључку** су прегледно и систематично приказани резултати докторске дисертације, тј. показано је како је на основу структурне, механичке и магнетне карактеризације обављена оптимализација експлоатационих својстава испитиваних узорака у зависности од температуре синтеровања.

5. Научни резултати докторске дисертације

Теоријским и експерименталним истраживањима узорака легуре FeCoV добијених PIM/MIM технологијом бризгања композита праха са растопљеним везивом, кандидат Боривоје Недељковић је дошао до следећих резултата.

- Кристална фаза α' -FeCo (структура типа B2) са високом вредношћу Киријеве температуре од око $T_c = 1390$ K (више и у односу на чист кобалт) омогућава Fe-Co/FeCoV легурама јединствено својство задржавања феромагнетних својстава на изузетно високим радним температурама. Фазу α' -FeCo карактерише увећање магнетизације како атома кобалта тако и атома гвожђа (чак $3 \mu_B/\text{Fe-атома}$) што омогућава Fe-Co/ FeCoV легурама друго јединствено својство међу магнетним материјалима: високу вредност магнетне индукције засићења.
- Током синтеровања дошло је до топљења честица праха а овај процес је директно пропорционалан температури синтеровања. При вишим температурама је интензивнији раст вратова и губитак индивидуалности честице, а простор међу честицама значајно мења облик услед затварања пора што доводи и до повећања густине узорка (тзв. интермедијарна фаза синтеровања се одиграва при температурама 1370 °C, 1400 °C и 1430 °C). У крајњем стадијуму синтеровања, при највишој температури од 1460 °C честице потпуно губе индивидуалност услед топљења
- Узорци који садрже већи удео кристалне фазе имају и већу тврдоћу: нпр. узорак D-1460 °C (348 HV_{10}) има за око 33 % већу тврдоћу у односу на узорак A-1370 °C. Повећање тврдоће HV_{10} је узроковано смањењем кретања дислокација у структури. При порасту температуре, процес синтеровања прелази из интермедијарне фазе у крајњу фазу синтеровања када долази до раста зрна, отворене поре се скупљају (и прелазе у затворене) и достижу се вредности од преко 90 % теоријске густине. Финалну фазу карактерише и приближно хомогена микроструктура те је коначно евидентно и смањење кретања дислокација у структури.
- Повећање тврдоће са порастом температуре синтеровања прати и смањење DC коерцитивности $H_{c/DC}$. Дислокације се код магнетних материјала понашају као центри пининга магнетних домена и нису пожељне када се желе постићи магнетно мека својства феромагнетика. Смањење кретања дислокација у структури (које узрокује повећање тврдоће HV_{10}) истовремено доводи до олакшаног померања зидова магнетних домена те коначно има за последицу смањење коерцитивне силе $H_{c/DC}$.
- Најбољу комбинацију функционалних магнетних својстава (што веће B_{s10} и што ниже H_{c10}) поседује узорак синтерован на 1370 °C код којег вредност магнетене индукције засићења износи $B_{s10} \approx 1.35$ T. Ово чини испитивану легуру Fe49Co49V2 као најбољу опцију за израду језгара трансформатора и/или пригушница минијатурних димензија, тј. свуда где се при конструисању електричних направа јавља проблем ограничене тежине и што мањих габарита компоненте а с циљем постизања што виших вредности магнетног флукса .
- Истраживања FeCoV наночестица са садржајем од 1,8 % ванадијума које су пресоване на 725 °C / 1 сат показују коерцитивност од око 39 Oe (тј. око 3100 A/m) што је скоро двоструко више од измерених вредности испитиваних узорака легуре Fe49Co49V2

произведених РИМ/МИМ технологијом, које се крећу од око 17 Ое, тј. око 1400 А/м, (1400 °С) до око 21,5 Ое тј. око 1700 А/м (1460 °С).

- Анализом зависности релативне магнетне пермеабилности μ_r од побудног магнетног поља H , уочено је да највеће вредности релативне магнетне пермеабилности ($\mu_r \approx 210$ @ $f = 5$ Hz) поседује узорак синтерован на температури 1370 °С, док при 50 Hz највећа релативна пермеабилност износи око 135 али при двоструко увећаној вредности побудног магнетног поља од 6 kA/m. Оптимална вредност побудног магнетног поља при којој су добијене максималне вредности релативне магнетне пермеабилности код свих испитиваних узорака износи 3 kA/m.
- С обзиром да су у изведеним експериментима мерења вршена у области ниских радних фреквенција (до максималних 60 Hz), као и да су достигнуте вредности магнетне индукције најчешће биле тек нешто изнад 1 Т и испод ове вредности, у спроведеној анализи магнетних губитака је коришћен модел укупних губитака са збиром хистерезисних губитака P_h и губитака услед вихорних струја P_e .
- Најмање магнетне губитке поседује узорак синтерован на температури 1370 °С, што је у потпуној сагласности са анализама зависности релативне магнетне пермеабилности од магнетног поља. Фреквентне зависности хистерезисних губитака узорака легуре Fe49Co49V2 произведеног РИМ/МИМ технологијом показују линеарну зависност хистерезисних губитака у складу са Штајнмицовом једначином.
- Моделовање криве хистерезиса за узорак синтерован на температури 1370 °С, спроведено коришћењем нумеричког задавања узлазне и силазне криве магнећења на бази *arctg* функције, дало је одлична слагања мерених и моделованих кривих при свим испитиваним радним фреквенцијама, иако су приметне значајне промене облика хистерезисних кривих из класичног R-облика (нпр. при 5 Hz, 10 Hz и 20 Hz) у анормални облик (нпр. при 40 Hz, 50 Hz и 60 Hz).
- Допринос анормалних вихорних струја коерцитивности код узорка синтерованог на температури 1370 °С је свега 1% на 5 Hz, тј. 5% на 50 Hz. Овај допринос је већи код узорка синтерованог на 1400 °С (3.9% на 5 Hz, тј. 18% на 50 Hz), што је у сагласности и са вишим вредностима коерцитивности H_c (услед увећаног удела кристалне фазе при вишој температури синтеровања) као и нешто вишој вредности реманентног односа (B_r/B_s).

6. Применљивост резултата у теорији и пракси

Докторска дисертација кандидата Боривоја Недељковића под називом "КАРАКТЕРИЗАЦИЈА FeCoV ЛЕГУРЕ ДОБИЈЕНЕ ТЕХНОЛОГИЈОМ БРИЗГАЊА КОМПОЗИТА ПРАХА СА РАСТОПЉЕНИМ ВЕЗИВОМ", даје као резултат магнетни материјал са унапређеним мултифункционалним својствима.

Један од ретких материјала који задовољава својства високих вредности магнетне индукције засићења, пермеабилности, Киријеве температуре, тврдоће, електричне и корозионе отпорности уз истовремено што ниже вредности коерцитивности и магнетних губитака је легура састава 49Fe49Co2V која је испитивана у овој дисертацији.

Захваљујући бројним комбинацијама меша металних прахова, полимерних везива, облика калупа, метода за отклањање везива и температурско/временских профила синтеровања, РИМ/МИМ технологија је погоднија за индустрију магнетних

материјала у поређењу са класичним поступцима јер омогућава комерцијалну серијску производњу феромагнетних језгара комплексних геометријских облика.

Након поступка бризгања и термичког одстрањивања везива спроведено је синтеровање на температурама од 1370 °C до 1460 °C. Обављеним истраживањима успостављена је корелација структурних, термичких и физичких својстава са процесом високотемпературског синтеровања, чиме је кандидат успешно заокружио тетраду синтеза-структура-својства-примене која је основа развоја савремених техничких материјала.

7. Начин презентовања резултата научној јавности

Истраживања у оквиру ове докторске дисертације представљају један део научног рада кандидата из области науке о материјалима. У области проучавања FeCoV легура кандидат је до сада публикувао: 1 рад у истакнутом часопису међународног значаја категорије M22, 4 рада саопштена на међународном скупу штампана у изводу категорије M34 и 2 рада саопштена на скуповима националног значаја штампана у целини категорије M63. Поред овде испитиване PIM/MIM технологије, данас се интензивно испитују и друге технологије израде FeCoV легура са специфичним магнетним својствима што и истраживања која је кандидат обавио током рада на дисертацији чини и надаље веома интересантним па ће се наставити са даљим презентовањем постигнутих резултата научној јавности.

ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ КОМИСИЈЕ

Докторска дисертација кандидата Боривоја Недељковића, дипл. инж. металургије, под називом "КАРАКТЕРИЗАЦИЈА FeCoV ЛЕГУРЕ ДОБИЈЕНЕ ТЕХНОЛОГИЈОМ БРИЗГАЊА КОМПОЗИТА ПРАХА СА РАСТОПЉЕНИМ ВЕЗИВОМ", одговара прихваћеној теми од стране Наставно - научног већа Факултета техничких наука у Чачку, односно Стручног већа за техничко-технолошке науке Универзитета у Крагујевцу.

У оквиру докторске дисертације кандидат је комбинованим теоријско - експерименталним радом дошао до више оригиналних научних резултата, који се односе на структурна, механичка и магнетна својства испитиване FeCoV легуре. Докторска дисертација је резултат самосталног рада и по квалитету, обиму и приказаним резултатима истраживања у потпуности задовољава законске услове и универзитетске норме прописане за израду докторске дисертације.

Данас се упоредо са PIM/MIM технологијом интензивно испитују различите комбинације формирања композита као и поступак механохемијског легирања, којима се добијају специфична магнетна својства легура из система Fe-Co-V, тако да истраживања и резултати ове докторске дисертације садрже актуелне материјале за публикување у референтним научним часописима и презентације на међународним научним скуповима из области савремених мултифункционалних/феромагнетних материјала. Током израде дисертације кандидат је систематски приступио решавању научних проблема и овладао свим елементима научноистраживачког рада уз ефикасно коришћење светске литературе из области савремених технологија производње и неопходне свеобухватне карактеризације магнетних материјала.

С обзиром на актуелност проблематике која је обрађена и остварене резултате, чланови Комисије сматрају да кандидат Боривоје Недељковић, дипл. инж. металургије, и поднета докторска дисертација, испуњавају све услове, који се у поступку оцене писаног дела докторске дисертације захтевају Законом о високом образовању, Статутом Универзитета у Крагујевцу и Статутом Факултета техничких наука у Чачку.

На основу претходно наведеног, Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Боривоја Недељковића предлаже Наставно – научном већу Факултета техничких наука у Чачку и Већу за техничко - технолошке науке Универзитета у Крагујевцу да докторску дисертацију под називом:

**"КАРАКТЕРИЗАЦИЈА FeCoV ЛЕГУРЕ ДОБИЈЕНЕ ТЕХНОЛОГИЈОМ БРИЗГАЊА
КОМПОЗИТА ПРАХА СА РАСТОПЉЕНИМ ВЕЗИВОМ"**

прихвати као успешно урађену и да кандидата позове на усмену јавну одбрану дисертације.

У Чачку и Београду, августа 2019. год.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

1. 

Др Нина Обрадовић, научни саветник, председник

Научна област: Материјали

Институт техничких наука САНУ, Београд

2. 

Др Слободан Вукић, редовни професор у пензији, члан

Научна област: Електроника

Факултет техничких наука у Чачку

Универзитет у Крагујевцу

3. 

Др Небојша Митровић, редовни професор, члан

Научне области: Примењена физика, Физика и технологија материјала

Факултет техничких наука у Чачку

Универзитет у Крагујевцу



ИЗВЕШТАЈ О ПРОВЕРИ НА ПЛАГИЈАРИЗАМ У ЈЕВАЦ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

| | | |
|---------------------------------------|--|--|
| НАЗИВ ДИСЕРТАЦИЈЕ | КАРАКТЕРИЗАЦИЈА FeCoV ЛЕГУРЕ ДОБИЈЕНЕ ТЕХНОЛОГИЈОМ БРИЗГАЊА КОМПОЗИТА ПРАХА СА РАСТОПЉЕНИМ ВЕЗИВОМ | |
| Кандидат | Боривоје Недељковић | |
| Ментор | др Небојша Митровић, редовни професор | |
| Датум приспећа дисертације на проверу | 25.06.2019. | |

РЕЗУЛТАТ ПРОВЕРЕ:

| | |
|-------------------------------------|-----------------------------|
| <input checked="" type="checkbox"/> | УПУЋУЈЕ СЕ У ДАЉУ ПРОЦЕДУРУ |
| <input type="checkbox"/> | ВРАЋА СЕ НА ДОРАДУ |

ОБРАЗЛОЖЕЊЕ:

Докторска дисертација колеге Боривоја Недељковића, под називом „Карактеризација FeCoV легуре добијене технологијом бризгања композита праха са растопљеним везивом“, према софтверу за детекцију плагијаризма iThenticate, пронађено је укупно 20% идентичног текста. Овај проценат је настао, јер је софтвер препознао као идентични текст наслов дисертације који се налази у хедеру сваке стране.

ПРИЛОЗИ:

iThenticate_izvestaj_doktorska_disertacija_Borivoje_Nedeljkovic.pdf

| | |
|---------------------------|---|
| Датум формирања извештаја | 26.06.2019. |
| Име и презиме, функција | Доц. др Марко Ђапан, члан Комисије за претходна питања за област техничко технолошких наука Универзитета у Крагујевцу |
| Потпис | |

ИЗВЕШТАЈ ЈЕ ИЗРАЂЕН У ДВА ПРИМЕРКА.