

Број захтева: _____

Датум: _____

ЗАХТЕВ

за давање сагласности на реферат о урађеној докторској дисертацији

Молимо да, сходно члану 46. став 5. тачка 4. Статута Универзитета у Београду (“Гласник Универзитета” број 131/06), дате сагласност на реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата:

Мр Иване (Иван) Марковић

КАНДИДАТ: **Мр Ивана (Иван) Марковић**

Пријавила је докторску дисертацију под називом:

ИСТРАЖИВАЊЕ ЕФЕКТА ОЈАЧАВАЊА ЖАРЕЊЕМ КОД СИНТЕРОВАНИХ И ЛИВЕНИХ ЛЕГУРА СИСТЕМА БАКАР-ЗЛАТО

Из научне области: **Металуршко инжењерство**

Универзитет је дана **28.11.2011.** године својим актом под бројем **06-8225/17-11** дао сагласност на предлог теме дисертације која гласи: **ИСТРАЖИВАЊЕ ЕФЕКТА ОЈАЧАВАЊА ЖАРЕЊЕМ КОД СИНТЕРОВАНИХ И ЛИВЕНИХ ЛЕГУРА СИСТЕМА БАКАР-ЗЛАТО**

Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата: **Мр Иване (Томислав) Марковић** образована је на седници одржаној **20.02.2014.** године, одлуком факултета под бр. **VI/4-14-10.1.**, у саставу:

Име и презиме члана комисије / звање / научна област / установа у којој је запослен

1. Др Светлана Несторовић, ред. професор, металуршко инжењерство, Технички факултет у Бору, ментор
2. Др Десимир Марковић, ред. професор, металуршко инжењерство, Технички факултет у Бору, члан
3. Др Мирјана Рајчић Вујасиновић, ред. професор, металуршко инжењерство, Технички факултет у Бору, члан
4. Др Јасмина Стевановић, научни саветник, електрохемијско инжењерство, ИХТМ Београд, члан
5. Др Владан Ћосовић, виши научни сарадник, наука о материјалима-инжењерство материјала, ИХТМ Београд, члан

Наставно-научно веће факултета прихватило је извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације на седници одржаној дана **17.04.2014.** године, под бројем: **VI/4-7-7.2.**

Декан Факултета

Проф. др Милан Антонијевић

Прилог:

1. Извештај комисије са предлогом
2. Акт наставно-научног већа факултета о усвајању извештаја.
3. Примедбе дате у току стављања извештаја на увид јавности, уколико је таквих примедби било

Универзитет у Београду
Технички факултет у Бору
Број: VI/4-16-7.2.
Бор, 17. 04. 2014. године

На основу чл. 47. Статута Техничког факултета у Бору, Наставно научно веће Факултета, на седници одржаној 17. 04. 2014. године, донело је

О Д Л У К У

I Усваја се Извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата: **мр Иване Марковић**, дипл. инж. металург. под називом: „Истраживање ефекта ојачавања жарењем код синтерованих и ливених легура система бакар-злато“, на који није било примедби.

II Универзитет у Београду је дана 28. 11. 2011. године дао сагласност на предлог теме докторске дисертације.

III Радови из научних часописа са листе која је утврђена као релевантна за вредновање научне компетенције у одређеном научном пољу:

Категорија M21:

Marković I., Nestorović S., Marković D.: Effect of Thermo-Mechanical Treatment on Properties Improvement and Microstructure Changes in Copper–Gold Alloy, *-Materials and Design*, vol. 53, pp. 137-144, 2014 (**IF-2012=2.913**) (ISSN 0261-3069).

Категорија M22:

Marković I., Nestorović S., Marković D., Gusković D.: Properties Improvement and Microstructure Changes During Thermomechanical Treatment in Sintered Cu-Au Alloy, *-Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 24, no. 2, pp. 431-440, 2014 doi: 10.1016/S1003-6326(14)63079-X (**IF-2012=0.917**) (ISSN 1003-6326).

IV Именована ће бранити докторску дисертацију пред Комисијом у саставу:

1. др Светлана Несторовић, редовни професор Техничког факултета у Бору – ментор;
2. др Десимир Марковић, редовни професор Техничког факултета у Бору – члан;
3. др Мирјана Рајчић Вујасиновић, редовни професор Техничког факултета у Бору – члан;
4. др Јасмина Стевановић, научни саветник ИХТМ-а – члан;
5. др Владан Ћосовић, виши научни сарадник ИХТМ-а – члан.

V Одлуку доставити надлежном Већу научних области Универзитета у Београду, ради давања сагласности. Докторска дисертација из става 1. ове одлуке подобна је за одбрану након добијања сагласности именованог Већа Универзитета.

VI О термину одбране благовремено се обавештава стручна служба ради обављања претходних активности.

Доставити:

- именованој
- Већу научних области Универзитета у Београду
- студентској служби
- архиви

ПРЕДСЕДНИК
НАСТАВНО НАУЧНОГ ВЕЋА

ДЕКАН

Проф. др Милан Антонијевић

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

Технички факултет у Бору

НАСТАВНО - НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата мр Иване Марковић, дипл. инж. металургије

Одлуком Наставно-научног већа Техничког факултета у Бору Универзитета у Београду број VI/4-14-10.1 од 20.02.2014. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата мр Иване Марковић, дипл. инж. металургије под насловом:

„Истраживање ефекта ојачавања жарењем код синтерованих и ливених легура система бакар-злато“.

После прегледа достављене Дисертације и других пратећих материјала и разговора са Кандидатом, Комисија је сачинила следећи

РЕФЕРАТ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Кандидат мр Ивана Марковић, дипл. инж. металургије је одбранила магистарски рад под називом „Утицај термомеханичке обраде на механизме ојачавања и структурне промене у ливеним и синтерованим легурама система Cu-Ag“ 01.11.2007. године на Техничком факултету у Бору Универзитета у Београду, под менторством проф. др Светлане Несторовић.

Хронологија одобравања и израде докторске дисертације је протекла следећом динамиком:

- На седици Катедре за прерађивачку металургију Техничког факултета у Бору Универзитета у Београду одржаној 07.09.2011. године констатовано је да је мр Ивана Марковић, дипл. инж. металургије пријавила докторску дисертацију под називом „Истраживање ефекта ојачавања жарењем код синтерованих и ливених легура система бакар-злато“, и Наставно-научном већу Техничког факултета у Бору Универзитета у Београду је предложена Комисија за давање мишљења о научној заснованости предложене докторске дисертације у саставу: проф. др Светлана Несторовић, Технички факултет у Бору Универзитета у Београду; проф. др Десимир Марковић, Технички факултет у Бору Универзитета у Београду; проф. др Мирјана Рајчић-Вујасиновић, Технички факултет у Бору Универзитета у Београду; др Јасмина Стевановић, Институт за хемију, технологију и металургију Универзитета у Београду и др Владан Ћосовић, Институт за хемију, технологију и металургију Универзитета у Београду. За ментора је предложена др Светлана Несторовић, редовни професор Техничког факултета у Бору Универзитета у Београду.
- Одлуком Наставно-научног већа Техничког факултета у Бору Универзитета у Београду, број VI/4-16-13.1 од 22.09.2011. године именована је Комисија за оцену научне заснованости предложене теме докторске дисертације „Истраживање ефекта ојачавања жарењем код синтерованих и ливених легура система бакар-злато“.
- Одлуком Наставно-научног већа Техничког факултета у Бору Универзитета у Београду, број VI/4-17-8.2. од 21.10.2011. године усвојен је Извештај Комисије за оцену научне заснованости пријављене докторске дисертације.
- Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду на седници одржаној 28.11.2011. године донело је одлуку, број 06-8225/17-11, о давању сагласности на предлог теме докторске дисертације.
- Одлуком Наставно-научног већа Техничког факултета у Бору Универзитета у Београду број VI/4-14-10.1 од 20.02.2014. године именована је Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације.

1.2. Научна област дисертације

Предмет истраживања докторске дисертације припада научној области Металуршко инжењерство (за коју је Технички факултет у Бору акредитовао студијске програме за сва три нивоа студија), ужа научна област – Прерађивачка металургија. За ментора је изабрана др Светлана Несторовић, редовни професор Техничког факултета у Бору Универзитета у Београду због истакнутих доприноса у домену термомеханичке обраде бакарних легура.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Мр Ивана Марковић (девојачко Рангелов) је рођена 19.06.1979. године у Димитровграду. Основну школу и гимназију завршила је у Бору. Дипломирала је на Техничком факултету у

Бору 2004. године са просечном оценом 9,59 и тиме стекла звање дипломирани инжењер металургије. На основу постигнутог успеха у току основних студија награђена је: стипендијом Министарства просвете и спорта - 2002. године, стипендијом Амбасаде Краљевине Норвешке за постигнуте високе академске резултате – 2002. године, наградом Универзитета у Београду за најбољег студента генерације на Техничком факултету у Бору за школску 2003/2004. годину – 2005. године.

Магистарске студије је завршила на Техничком факултету у Бору 2007. године са просечном оценом 10,00 и тиме стекла звање магистра наука за прерађивачку металургију. Током магистарских студија била је стипендиста Министарства науке и заштите животне средине.

Од фебруара 2008. године је запослена на Техничком факултету у Бору у звању асистента на студијском програму Металуршко инжењерство. У оквиру наставне активности тренутно је ангажована на основним академским студијама на следећим предметима: Физичка металургија I, Физичка металургија II, Синтерметалургија, Синтеровани метални материјали и Контактни материјали, као и на мастер студијама на предметима Теорија синтеровања и Кинетика фазних трансформација.

Аутор/коаутор је 11 публикованих радова у међународним часописима са SCI листе, 10 радова у домаћим часописима, 4 техничка решења, као и око 40 саопштења на међународним и домаћим скуповима.

Учествовала је у реализацији 5 домаћих пројеката (од тога 3 пројекта финансирана од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја) и једног међународног пројекта. Била је члан организационих одбора 4 међународна и 2 домаћа скупа. Члан је Српског хемијског друштва и тренутни секретар СХД-Подружнице у Бору.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација кандидата мр Иване Марковић, дипл. инж. металургије написана је на 175 страна, у оквиру којих се налази 11 поглавља, са укупно 87 слика, 27 табела и 236 литературних навода. Докторска дисертација садржи следећа поглавља: Увод, Бакар и бакарне легуре, Ефекат ојачавања жарењем, Преглед досадашњих истраживања, Циљеви истраживања, Експериментални део, Резултати и дискусија, Закључак, Литература, Биографија и Објављени радови проистекли из докторске дисертације. На почетку дисертације су дати изводи на српском и енглеском језику, а на крају дисертације прилози. По својој форми и садржају, поднети рад задовољава све стандарде Универзитета у Београду за докторску дисертацију.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У *уводном поглављу* дат је опис проблема, циљеви, основне хипотезе, примењена методологија и применљивост истраживања као и кратак приказ садржаја рада.

У другом поглављу изнете су најважније особине бакра и легура система Cu-Au. Приказани су и теоретски разматрани: дијаграм стања система Cu-Au као и E-pH дијаграми за системе Cu-H₂O и Au-H₂O на 25°C.

Треће поглавље такође припада теоријском делу рада и у њему је обрађен механизам ојачавања жарењем уз објашњење основних карактеристика ојачавајућег механизма, навођења највероватнијих предлога природе овог феномена и објашњење механизма ојачавања жарењем на примеру ниско легираних хладно деформисаних бакарних легура.

У четвртном поглављу је дат преглед и анализа досадашњих истраживања. Најпре су обрађени резултати истраживања легура система Cu-Au, одакле је закључено да је највећа пажња истраживача била усмерена на проучавању легура оних састава који одговарају стехиометријским односима 3:1, 1:1 и 1:3 елемената бакра и злата, јер код њих долази до образовања сређених структура типа Cu₃Au, CuAu и CuAu₃. Само мали број аутора је проучавао легуре система Cu-Au са малом количином злата као легирајућег елемента, што је случај у овој дисертацији. У другом делу четвртог поглавља је хронолошки представљен преглед најважнијих досадашњих истраживања ефекта ојачавања жарењем. На основу прегледа доступне литературе може се закључити да је ефекат ојачавања жарењем потврђен у ливеним Cu-Au легурама, али други подаци о његовом механизму, утицају на различите особине ових легура или, пак, утицају различитих полазних микроструктура на његов интензитет, нису пронађени. Такође, не постоје подаци да је ефекат ојачавања жарењем истраживан на синтерованим бакарним легурама. Због наведених разлога су као предмет истраживања ове докторске дисертације и изабране синтероване и ливене Cu-4ат.%Au легуре, код којих је спроведена термомеханичка обрада по истој процедури, а затим су применом различитих параметара термомеханичке обраде постигнути различити интензитети ефекта ојачавања жарењем.

У петом поглављу су детаљно изложени циљеви истраживања.

У експерименталном делу, датом у шестом поглављу, детаљно је приказан:

- поступак добијања синтерованих узорака бакра и Cu-Au легура преко мешања и хомогенизације прахова, пресовања прахова и синтеровања отпресака;
- поступак добијања ливених узорака бакра и Cu-Au легура преко прорачуна шарже, топљења полазних сировина, ливења бакра и легура, хомогенизационог жарења одливака и сечења одливака;
- поступак термомеханичке обраде синтерованих и ливених узорака бакра и Cu-Au легура преко предзавршног ваљања, загревања и каљења, завршног ваљања и жарења хладно деформисаних узорака;
- поступак карактеризације синтерованих и ливених узорака бакра и Cu-Au легура након сваке фазе експеримента путем мерења тврдоће, микротврдоће, електричне проводности, микроструктурне анализе: оптичким, SEM и TEM микроскопом, применом рендгенске дифракције, диференцијално-термијске анализе и електрохемијских испитивања (мерењем потенцијала отвореног кола и цикличне волтаметрије).

У седмом поглављу су изнети резултати испитивања из оквира предметне дисертације, као и дискусија добијених резултата. На почетку поглавља су представљени резултати карактеризације прахова, отпресака и синтерованих узорака. Истраживања у оквиру докторске дисертације обухватила су експериментална испитивања синтерованих и ливених

Cu-Au легура, као и чистог бакра са циљем проучавања различитих механизма ојачавања. Након сваке фазе експеримента дате су структурне, механичке и електричне карактеристике као и корозиона стабилност путем карактеризације испитиваних узорака, а са циљем проучавања утицаја термомеханичке обраде на механизме ојачавања и структурне промене у синтерованим и ливеним легурама система Cu-Au. Најпре је обрађен механизам растварајућег ојачавања, затим механизам хладне пластичне деформације преко предзавршног и завршног ваљања, али је највећа пажња била посвећена проучавању ефекта ојачавања жарењем у хладно деформисаним синтерованим и ливеним Cu-Au легурама. На рачун ефекта ојачавања жарењем су постигнуте изванредно побољшане особине хладно деформисаних синтерованих и ливених Cu-Au легура чија су својства упоређена, а такође су својства легура упоређена са чистим бакром који је термомеханички обрађен на исти начин. Карактеризацијом својстава синтерованих и ливених легура после различитих стадијума термомеханичке обраде било је могуће да се изврши оптимизација комбинације испитиваних особина. У циљу добијања свеобухватније слике о механизму ефекта ојачавања жарењем у хладно деформисаним синтерованим и ливеним Cu-Au легурама и његове примене у пракси разматрани су резултати добијени рендгенском дифракцијом, диференцијално термијском анализом, трансмисионом електронском микроскопијом и електрохемијским испитивањима.

У *осмом поглављу* су изнети најважнији закључци изведени на основу резултата добијених у докторској дисертацији.

У *деветом поглављу* је представљена коришћена литература, која обухвата 236 релевантних референтних навода. *Десето поглавље* се односи на биографију кандидата, а у *једанаестом поглављу* дат је списак публикованих и саопштених радова проистеклих као резултат рада на дисертацији.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Континуирани технолошки прогрес захтева производњу ојачаних материјала који имају не само изузетне механичке особине, већ и високу електричну проводност и добру отпорност на корозију. Чист бакар испуњава велики број захтева у погледу особина, али су му главни недостаци нешто лошије механичке особине и нижа температура рекристализације, што представља проблем за делове који раде на повишеним радним температурама. Механичке особине бакра се могу знатно побољшати легирањем и неким видовима термомеханичке обраде. На овај начин се добијају легуре на бази бакра са атрактивном комбинацијом особина: одлична електрична и топлотна проводност, релативно добре механичке особине и отпорност на омекшавање на високим температурама, велика отпорност на корозију и добра обрадивост. Међутим, примена традиционалних метода ојачавања, које су карактеристичне за бакарне легуре (растварајуће ојачавање, пластична деформација, ојачавање уситњавањем зрна, дисперзно ојачавање), често не даје довољно ефикасне резултате, па се са тим у вези непрекидно истражују нови поступци интензивирања многих физичко-хемијских процеса, који утичу на микроструктурне промене, а самим тим и на побољшање својстава материјала.

Један од механизма који знатно утиче на побољшање механичких особина неких једнофазних бакарних легура је ојачавање жарењем, које се манифестује када се хладно

деформисане легуре жаре на температурама нижим од температуре рекристализације. Природа феномена ојачавања жарењем још увек није у потпуности проучена, што отвара могућност за наставак испитивања и употпуњавање знања о овом специфичном ојачавајућем механизму. Иако је област истраживања ефекта ојачавања жарењем на бакарним легурама присутна последњих педесетак година, та истраживања су рађена у мањем обиму и углавном су била усмерена на проучавању бинарних бакарних легура са алуминијумом или цинком, док за друге бакарне системе постоје јако оскудни подаци. Што се тиче система Cu-Au, у раду Vitek-a и Warlimont-a је потврђен најинтензивнији ефекат ојачавања жарењем управо у овом систему у односу на остале испитиване системе (Cu-Al, Cu-Zn, Cu-Ga, Cu-Ni, Cu-Pd и Cu-Rh). Међутим, други литературни подаци о ефекту ојачавања жарењем у Cu-Au легурама нису пронађени. Такође аутори, који су се бавили проучавањем ефекта ојачавања жарењем, су вршили испитивања само на ливеним бакарним легурама и у литератури није пронађено да је ојачавање жарењем истраживано на синтерованим бакарним легурама, осим радова аутора са Катедре за прерађивачку металургију Техничког факултета у Бору Универзитета у Београду.

Управо због ових разлога, предмет истраживања наведене докторске дисертације су бакар и бакарне легуре система Cu-Au, који су добијени технологијом металургије праха (синтеровањем) и класичном ингот металургијом (топљењем и ливењем), а на којима је спроведена термомеханичка обрада у циљу истраживања ефекта ојачавања жарењем који се код ових Cu-Au легура јавља. Задатак докторске дисертације је био проучавање утицаја комплексне термомеханичке обраде, која у синтерованим и ливеним Cu-Au легурама ствара услове за појаву ефекта ојачавања жарењем, на побољшање механичких особина (тврдоћа и микротврдоћа) и електричне проводности, на промену параметра јединичне ћелије, термијско и електрохемијско понашање, као и на структурне промене на микро и нано нивоу које се у легурама дешавају током термомеханичке обраде. На рачун појаве ефекта ојачавања жарењем дошло је до значајног побољшања механичких особина синтерованих и ливених Cu-Au легура, тако да су својства легура знатно побољшана у односу на чист синтеровани и ливени бакар.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У литературном прегледу докторске дисертације наведено је 236 литературних навода, од којих највећи број чине новији радови из међународних часописа са тематиком значајном за израду докторске дисертације. Наведене референце, које садрже експерименталне резултате истраживања многих истраживачких група, послужиле су за обраду прегледа досадашњих истраживања као и за упоредну анализу и дискусију добијених резултата и закључака. Из пописа литературе која је коришћена у истраживању, уочава се адекватно познавање предметне области истраживања, као и познавање актуелног стања истраживања у овој области у свету.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

За карактеризацију синтерованог и ливеног бакра, као и легура у испитиваном систему Cu-Au у току спроведене термомеханичке обраде коришћено је више савремених, стандардизованих, високо резолутивних метода и аналитичких техника.

Испитивања механичких карактеристика обухватила су мерења тврдоће и микротврдоће применом стандардизованих метода мерења по ASTM E384 стандарду. Тврдоћа је мерена применом Викерсове методе на тврдомеру „VEB Leipzig“ при оптерећењу од 49 N и времену трајања оптерећења од 15 s, док је микротврдоћа одређена на тврдомеру „ПМТ 3“ применом Викерсове методе, при оптерећењу од 0,98 N и трајању оптерећења од 15 s.

Електрична својства су праћена мерењем електричне проводности. За ова мерења је коришћен уређај за мерење електричне проводности „Institut dr. Förster Sigmatest 2.063“, који мери електричну проводност немагнетних материјала преко промене комплексне импедансе мерне сонде.

Микроструктурна анализа је обављена применом оптичке микроскопије (LOM) и скенирајуће електронске микроскопије са енергетско-дисперзивним спектрометром (SEM-EDS). За оптичку микроскопију је коришћен „Carl Zeiss Jena EPITYP 2“ оптички микроскоп за увећања од 200 или 500 пута и оптички микроскоп „Reichert MeF2“ за увећања од 1000 пута. SEM анализа је извршена на скенирајућем електронском микроскопу „Jeol JSM 6610LV“, који користи W жицу или LaB₆ као извор електрона и поседује SE, BSE, CL и EDS детекторе.

За анализу микроструктуре на нано нивоу завршно ваљаних синтерованих и ливених узорак Cu-Au легуре пре и после жарења на 260°C је примењена трансмисиона електронска микроскопија (TEM). У циљу добијања електрон транспарентних TEM фолија вршено је полирање и тањење на уређају за припрему „Gatan PIPS 691“. TEM анализа је изведена на „Jeol JEM 2010F“ трансмисионом електронском микроскопу.

Идентификација присутних фаза и одређивање параметара јединичних ћелија завршно ваљаних синтерованих и ливених Cu-Au легура пре и после жарења на 260°C су обављени применом методе рендгенске дифракције (XRD) помоћу дифрактометра за прах „Philips PW 1710“ (под следећим условима: радни напон 40 kV; јачина струје 30 mA; опсег испитивања од 10° до 100°; корак 0,02°; временска константа 0,8 s/кораку).

Термијско понашање синтерованих и ливених Cu-Au легура након завршног ваљања степеном деформације од 60 % је праћено применом методе диференцијално-термијске анализе (DTA). Експерименти су вршени у атмосфери ваздуха уз константну брзину загревања од 5°Cmin⁻¹, подешавану помоћу променљивог трансформатора.

Електрохемијска карактеризација синтерованих и ливених узорак Cu-Au легура након одређених стадијума термомеханичке обраде је испитивана применом методе мерења потенцијала отвореног кола и методе цикличне волтаметрије. Електрохемијска испитивања су изведена на систему који се састоји од: електрохемијске ћелије са три електроде (радне, референтне и контра), хардвера (PC, AD/DA конвертор PCI - 20428 W и аналогни интерфејс), софтвера за мерење и управљање (LabVIEW 8.2 платформа и специјално развијена апликација за електрохемијска мерења) и термостата за одржавање константне радне температуре. Мерење потенцијала отвореног кола је извршено у раствору 0,1 M NaOH у трајању од 60 s. Циклични волтамограми су снимани у области потенцијала од -0,7 V до 0,8V

у односу на засићену каломелову электроду, при брзини промене потенцијала од 20 mVs^{-1} у раствору $0,1 \text{ M NaOH}$.

3.4. Применљивост остварених резултата

Добијени резултати у овој докторској дисертацију указују на могућност примене ефекта ојачавања жарењем у циљу добијања синтерованих и ливених легура система Cu-Au знатно побољшаних својстава. На овај начин термомеханички обрађени материјал система бакар-злато може наћи практичну примену у свим областима, где су потребне боље механичке особине материјала и отпорност према рекристализацији, тј. омекшавању на повишеним радним температурама, као и задовољавајућа електрична проводност. Основна примена испитиваних термомеханички-обрађених синтерованих и ливених Cu-Au легура је за израду електричних контаката, јер поседују задовољавајуће вредности механичких особина и електричне проводности, и захваљујући ефекту ојачавања жарењем та својства задржавају и на повишеним радним температурама дужи временски период.

У експерименталном делу дисертације су детаљно описани поступци добијања синтерованих и ливених узорака бакра и Cu-Au легура, као и комплетна процедура по којој је спроведена термомеханичка обрада на њима, што даје могућност понављања истоветних експеримената и њихову непосредну верификацију. Додатна верификација остварених резултата је могућа и проширењем испитивања у смислу примене додатних метода као и модификовањем услова истраживања.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Урађена докторска дисертација, анализа добијених резултата, те проистекли публиковани научни радови, као и публиковани радови изван докторске дисертације и учешће у реализацији научно-истраживачких пројеката, указују на способност кандидата мр Иване Марковић, дипл. инж. металургије за самостални научни рад као и за активно учешће у тимском раду.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Прегледом доступне литературе није пронађено да су истраживачке групе, које су се бавиле истраживањима ефекта ојачавања жарењем, проучавале овај ојачавајући механизам на синтерованим бакарним легурама, а такође пронађено је јако мало литературних података о његовом интензитету и механизму у ливеним Cu-Au легурама. Због тога истраживања изнета у овој докторској дисертацију представљају значајан научни допринос, који се огледа у:

- Добијању синтерованих и ливених Cu-Au легура изванредно побољшаних својстава у односу на чист бакар, која су постигнута на рачун кључног механизма ојачавања

жарењем, који се код легура система Cu-Au јавља, а интензиван је спроведеном термомеханичком обрадом;

- Упоређењу интензитета ефекта ојачавања жарењем, као и упоређењу микроструктурних промена након спроведене термомеханичке обраде код Cu-Au легура добијених различитим поступцима – поступком металургије праха и класичном ингот металургијом;
- Много бољем објашњењу сложеног механизма ојачавања жарењем у синтерованим и ливеним Cu-Au легурама применом савремених метода испитивања рендгенском дифракцијом, диференцијално-термијском анализом, ТЕМ микроскопијом и електрохемијским методама (потенцијал отвореног кола и циклична волтаметрија);
- Проучавању додатних механизма ојачавања – легирања и хладне пластичне деформације остварене предзавршним и завршним ваљањем у синтерованом и ливеном бакру и Cu-Au легурама, кроз карактеризацију материјала током комплексне термомеханичке обраде.
- Експерименталном добијању података о физичким, механичким и термијским својствима као и микроструктурним променама на микро и нано нивоу синтерованог и ливеног бакра и Cu-Au легура након различитих стадијума термомеханичке обраде.
- Проучавању корозионе постојаности синтерованих и ливених Cu-Au легура после различитих стадијума термомеханичке обраде.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Истраживања у оквиру ове дисертације су конципирана након детаљне анализе литературе из области термомеханичке обраде бакарних легура. На основу прегледа доступне литературе утврђено је да ефекат ојачавања жарењем није проучаван на синтерованим бакарним легурама (сем радова аутора са Техничког факултета у Бору Универзитета у Београду), као и да није проучаван упоредо и на синтерованим и на ливеним легурама у склопу термомеханичке обраде. Такође у литератури нису постојали подаци о интензитету и механизму ефекта ојачавања жарењем у синтерованим и ливеним Cu-Au легурама. Због тога резултати приказани у овој докторској дисертацији значајно допуњују постојећа знања о феномену ојачавања жарењем у синтерованим и ливеним легурама система бакар-злато. Научни допринос је што су извршена упоредна истраживања на хладно деформисаним синтерованим и ливеним Cu-Au легурама, а затим су упоређени интензитети ојачавања жарењем у зависности од претходног поступка добијања. Такође, упоређено је побољшање својстава синтерованих и ливених Cu-Au легура у односу на чист бакар, током комплексне термомеханичке обраде, којом је интензиван ефекат ојачавања жарењем у Cu-Au легурама, а која је уједно изведена са циљем проучавања три различита ојачавајућа механизма (растварајуће ојачавање, хладна пластична деформација и ефекат ојачавања жарењем). У дисертацији је и детаљно проучен механизам ојачавања жарењем у хладно деформисаним синтерованим и ливеним Cu-Au легурама применом различитих метода испитивања (SEM, XRD, DTA, TEM), одакле је показано да упоредно дејство сређивања кратког дмета и сегрегације растворених атома на дислокацијама доприноси побољшању механичких особина и електричне проводности у току ојачавања жарењем.

4.3. Верификација научних доприноса

Научни допринос ове докторске дисертације је верификован кроз публикације проистекле као резултат истраживања у оквиру дисертације, али је реално очекивати да ће списак радова из оквира ове дисертације бити значајно проширен у наредном периоду, обзиром да је у припреми још радова за објављивање у међународним часописима са SCI листе. У даљем тексту је дат списак до сада објављених радова у научним часописима и радова саопштених на конференцијама, који су проистекли из ове докторске дисертације:

Категорија M21:

1. **Marković I.**, Nestorović S., Marković D.: Effect of Thermo-Mechanical Treatment on Properties Improvement and Microstructure Changes in Copper–Gold Alloy, -*Materials and Design*, vol. 53, pp. 137-144, 2014 (IF-2012=2.913) (ISSN 0261-3069).

Категорија M22:

1. **Marković I.**, Nestorović S., Marković D., Gusković D.: Properties Improvement and Microstructure Changes During Thermomechanical Treatment in Sintered Cu-Au Alloy, - *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 24, no. 2, pp. 431-440, 2014 doi: 10.1016/S1003-6326(14)63079-X (IF-2012=0.917) (ISSN 1003-6326).

Категорија M33:

1. Nestorović S., **Marković I.**, Gusković D., Ivanić Lj., Marković D.: „The Influence of Temperature on the Anneal Hardening Effect in a Cast Cu-4at%Au Alloy“, -12th *International Foundrymen Conference, Sustainable Development and Technologies*, Opatija, Croatia, 24-25 May 2012., pp. 328-338.
2. **Marković I.**, Nestorović S., Gusković D., Ivanić Lj.: „The Influence of Deformation Degree on the Anneal Hardening Effect in a Cast Cu-4at%Au Alloy“, -16th *International Research/Expert Conference „Trends in the Development of Machinery and Associated Technology”*, TMT 2012, Dubai, UAE, 10-12 September 2012., pp. 163-166.
3. Nestorović S., **Marković I.**, Marković D.: „Influence of Thermomechanical Treatment on the Properties of Sintered Cu-4at%Au Alloy“, -16th *International Research/Expert Conference „Trends in the Development of Machinery and Associated Technology”*, TMT 2012, Dubai, UAE, 10-12 September 2012., pp. 159-162.
4. **Marković I.**, Nestorović S., Marković D., Gusković D.: „Mechanical Properties and Lattice Parameter Changes of Cold Worked, Annealed Cu-Au Alloy“, -44th *International October Conference on Mining and Metallurgy*, Bor, Serbia, 1-3 October 2012., pp. 379-382.
5. Nestorović S., **Marković I.**, Gusković D., Ivanić Lj., Marković D.: „Influence of Thermomechanical Treatment on the Properties of a Cast Copper-Gold Alloy“, -44th *International October Conference on Mining and Metallurgy*, Bor, Serbia, 1-3 October 2012., pp. 383-388.

6. Nestorović S., **Marković I.**, Marković D., Ivanić Lj.: „Microstructure Changes in the Cast Copper-Gold Alloy During Thermo-Mechanical Treatment“, -45th *International October Conference on Mining and Metallurgy*, Bor Lake, Serbia, 16-19 October 2013., pp. 821-824.

Категорија M51:

1. Nestorović S., **Marković I.**, Marković D.: Influence of Thermomechanical Treatment on the Properties of Sintered Cu-4at%Au Alloy, -*Journal of Trends in the Development of Machinery and Associated Technology*, vol. 16, no. 1, pp. 63-66, 2012 (ISSN 2303-4009).
2. **Marković I.**, Nestorović S., Gusković D., Ivanić Lj.: The Influence of Deformation Degree on the Anneal Hardening Effect in a Cast Cu-4at%Au Alloy, -*Journal of Trends in the Development of Machinery and Associated Technology*, vol. 16, no. 1, pp. 67-70, 2012 (ISSN 2303-4009).

Категорија M63:

1. Nestorović S., **Marković I.**, Gusković D., Marković D.: „Anneal Hardening Effect in Thermomechanically Treated a Cast Copper-Gold Alloy“, -50. *jubilarno savetovanje Srpskog hemijskog društva*, Beograd, 14-15. juni 2012., pp. 95-98.

Категорија M64:

1. **Marković I.**, Nestorović S., Ivanić Lj., Marković D.: „Promene osobina hladno deformisanog I/M i P/M bakra i legure Cu-4Au tokom izohronog žarenja“, -*Šesti simpozijum o termodinamici i faznim dijagramima*, Borsko jezero, 19. oktobar 2013., pp. 19.

Категорија M82:

1. Nestorović S., Ivanić Lj., Gusković D., Marković D., **Marković I.**: „Mehanizam ojačavanja žarenjem u funkciji dobijanja livene Cu-Au legure poboljšanih svojstava“, Korisnik: TIR Bor – Fabrika bakarne žice, 2013.

Испитивања обухваћена предметном докторском дисертацијом представљају део истраживања у оквиру пројекта технолошког развоја „Освајање производње ливених легура система бакар-злато, бакар-сребро, бакар-платина, бакар-паладијум у бакар-родијум побољшаних својстава применом механизма ојачавања жарењем“ Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије (ТР34003, руководилац: проф. др Светлана Несторовић, циклус 2011-2014.).

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу свега напред изложеног, Комисија сматра да докторска дисертација мр Иване Марковић, дипл. инж. металургије, под називом „Истраживање ефекта ојачавања жарењем код синтерованих и ливених легура система бакар-злато“ представља значајан и оригинални научни допринос у области Металуршког инжењерства. Добијени резултати представљају нова сазнања о интензитету и механизму ефекта ојачавања жарењем у систему Си-Ау у зависности од поступка добијања (синтеровање или класични поступак топљења и ливења), и пружају информације о побољшању особина Си-Ау легура у односу на чист бакар, који је добијен и термомеханички третиран на исти начин као и легуре. На основу прегледане докторске дисертације, као и увида у верификован научни допринос кроз објављене радове у часописима (2 рада као првопотписани аутор у међународним часописима категорије M21 и M22), комисија за оцену и одбрану урађене докторске дисертације закључује да кандидат мр Ивана Марковић, дипл. инж. металургије, испуњава све законске и остале услове за одбрану докторске дисертације. Такође, комисија закључује да је урађена дисертација написана према стандардима у научно-истраживачком раду, као и да испуњава све услове предвиђене Законом о високом образовању и Статутом Техничког факултета у Бору Универзитета у Београду. Стога, Комисија предлаже Наставно-научном већу Техничког факултета у Бору Универзитета у Београду да се докторска дисертација под називом „Истраживање ефекта ојачавања жарењем код синтерованих и ливених легура система бакар-злато“ кандидата мр Иване Марковић, дипл. инж. металургије, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

У Бору, 13.03.2014.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

.....
др Светлана Несторовић, редовни професор
Универзитет у Београду, Технички факултет у Бору

.....
др Десимир Марковић, редовни професор
Универзитет у Београду, Технички факултет у Бору

.....
др Мирјана Рајчић-Вујасиновић, редовни професор
Универзитет у Београду, Технички факултет у Бору

.....
др Јасмина Стевановић, научни саветник
Универзитет у Београду, Институт за хемију,
технологију и металургију Београд

.....
др Владан Ћосовић, виши научни сарадник
Универзитет у Београду, Институт за хемију,
технологију и металургију Београд