

ЗАХТЕВ

за давање сагласности на реферат о урађеној докторској дисертацији

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

МИЛИСАВА (Божидар) РАНИТОВИЋА, дипл. инж.
(име, име једног од родитеља и презиме)

КАНДИДАТ: **МИЛИСАВ (Божидар) РАНИТОВИЋ, дипл. инж.,**
пријавио је докторску дисертацију под називом:

**„Интегрални хидрометалуршки поступак рециклаже метала из електронског и
електричног отпада са техно-економским аспектима “**

Из научне области: **МЕТАЛУРШКО ИНЖЕЊЕРСТВО**

Универзитет је дана 08.06.2015. године, својим актом **02 број: 61206-2568/2-15** дао сагласност на
предлог теме докторске дисертације која је гласила:

**„Интегрални хидрометалуршки поступак рециклаже метала из електронског и
електричног отпада са техно-економским аспектима ”**

Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата:

МИЛИСАВА (Божидар) РАНИТОВИЋА, дипл. инж.
(име, име једног од родитеља и презиме)

образована је на седници одржаној **28.01.2016.** године Одлуком Факултета под бр. **35/27,** у
саставу:

Име и презиме члана комисије	Звање	Научна област
1. Др Жељко Камберовић	Редовни професор	Металургија
2. Др Марија Кораћ	Виши научни сарадник	Металургија
3. Др Мирослав Сокић	Виши научни сарадник	Металургија
4. Др Милорад Гавриловски	Научни сарадник	Металургија

Наставно-научно веће Факултета прихватило је реферат Комисије за оцену и одбрану докторске
дисертације на седници одржаној дана **03.03.2016. године.**

ДЕКАН ФАКУЛТЕТА

Проф. др Ђорђе Јанаћковић

На основу чл. 30. став 3. Закона о високом образовању, чл. 40. Статута ТМФ и чл. 39. Правилника о докторским студијама ТМФ, на седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета од 03.03.2016. године, донета је

О Д Л У К А

о прихватању Реферата о оцени докторске дисертације

Прихвата се Реферат Комисије у саставу: др Жељко Камберовић, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет, др Марија Кораћ, виши научни сарадник Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет, др Мирослав Сокић, виши научни сарадник Института за технологију нуклеарних и других минералних сировина у Београду, др Милорад Гавриловски, научни сарадник Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет, Иновациони центар, о прегледу и оцени урађене докторске дисертације под називом: „**Интегрални хидрометалуршки поступак рециклаже метала из електронског и електричног отпада са техно-економским аспектима**“ коју је поднео **МИЛИСАВ Б. РАНИТОВИЋ**, дипл. инж. и упућује се на сагласност Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације Милисава Ранитовића под називом „**Интегрални хидрометалуршки поступак рециклаже метала из електронског и електричног отпада са техно-економским аспектима**“ Одлуком 02 број: 61206-2568/2-15 од 08.06.2015. године.

Верификација научних доприноса:

Категорија M22:

1. **M. Ranitović, Ž. Kamberović, M. Korać, N. Jovanović, A. Mihjalović**, Hydrometallurgical recovery of tin and lead from WPCBs: limitations and opportunities, Metalurgija 55(2), 2016, 153-156; ISSN 0543-5846; IF 0,959 (2014: 29/74);

Категорија M23:

1. **M. Ranitović, Ž. Kamberović, M. Korać, M. Gavrilovski, H. Issa, Z. Anđić**, Investigation of possibility for stabilization and valorization of electric arc furnace dust and glass from electronic waste, Science of Sintering 46(1), 2014, 83-93; ISSN 0350-820X; IF 0,575 (2014: 49/74).

Докторска дисертација и Реферат о оцени докторске дисертације достављају се на увид јавности, а по истеку рока од 30 дана, на сагласност Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

Одлуку доставити: Већу научних области техничких наука Универзитета, докторанду, ментору, Служби за наставно-студентске послове, Библиотеци и Архиви факултета.

Д Е К А Н

Проф. др Ђорђе Јанаћковић

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ
ТЕХНОЛОШКО-МЕТАЛУРШКОГ ФАКУЛТЕТА
УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Милисава Б. Ранитовића,
дипл. инж. техн.

Одлуком Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду бр. 35/27 од 28.01.2016. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Милисава Б. Ранитовића, дипл. инж. техн. под насловом

Интегрални хидрометалуршки поступак рециклаже метала из електронског и електричног отпада са техно-економским аспектима

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

- 30.03.2015. - Кандидат Милисав Б. Ранитовић пријавио је тему докторске дисертације под називом: „Интегрални хидрометалуршки поступак рециклаже метала из електронског и електричног отпада са техно-економским аспектима“.
- 14.04.2015. - На седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду донета је Одлука о именовању Комисије за оцену подобности теме и кандидата за израду докторске дисертације.
- 11.05.2015. - На седници Наставно-научног већа Факултета донета је Одлука о прихватању Реферата Комисије за оцену подобности теме и кандидата за израду докторске дисертације и одобрена је израда докторске дисертације. За ментора је одређен др Жељко Камберовић, редовни професор Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду.
- 08.06.2015. - На седници Већа научних области техничких наука Универзитета у Београду дата је сагласност на предлог теме докторске дисертације кандидата Милисава Б. Ранитовића, под називом: „Интегрални хидрометалуршки поступак рециклаже метала из електронског и електричног отпада са техно-економским аспектима“.

29.09.2015. - Наставно-научно веће Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду одобрило је продужење рока за завршетак докторских студија Милисав Б. Ранитовића, бр. индекса 4047/2009, за још два семестра - до 30.09.2016.

28.01.2016. - На седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду донета је Одлука о именовању Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Милисав Б. Ранитовића.

1.2. Научна област дисертације

Истраживања у оквиру ове дисертације припадају научној области Металуршко инжењерство, за коју је Технолошко-металуршки факултет Универзитета у Београду матична установа. Ментор др Жељко Камберовић, редовни професор Технолошко-металуршког факултета у Београду, је на основу објављених публикација и искуства компетентан да руководи изработом ове докторске дисертације.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Милисав Б. Ранитовић рођен је 17.08.1983. године у Чачку, где је завршио основну школу и Гимназију – природно-математички смер. Технолошко – металуршки факултет је уписао школске 2002/03. године. Основне студије завршио је 2009. године на одсеку Хемијско инжењерство. Дипломски рад одбранио је на тему „Избор хидрометалуршког поступка прераде електронског отпада“, под руководством ментора Проф. др Жељка Камберовића. Докторске студије уписао је школске 2009/10. године на смеру Металуршко инжењерство, под руководством Проф. др Жељка Камберовића. Положио је све испите предвиђене планом и програмом докторских студија, као и завршни рад са темом „Рециклажа основних и технолошких метала из урбаних отпадних токова“. Од новембра 2009. до јануара 2011. године био је запослен као инжењер у фабрици за рециклажу електронског и електричног отпада. Од јануара 2011. године ради као истраживач приправник у Иновационом центру Технолошко-металуршког факултета у Београду д.о.о., где је ангажован на пројекту Министарства просвете, науке и технолошког развоја, под називом „Иновативна синергија нус-продуката, минимизације отпада и чистије производње у металургији“ под руководством Проф. др Жељка Камберовића. Кандидат учествује у реализацији практичне наставе у индустријским условима на предмету Рециклажа. Аутор је пет радова у међународним и домаћим часописима као и седам публикација на међународним и домаћим конференцијама. Учесник је једног иновационог пројекта финансираног од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије као и на једном пројекту финансираном од стране Европске комисије (ФП7). Коаутор је једног признатог Индустријског дизајна (Регистарски број 11035) и једне патентне пријаве, бр. Р-2010/0478 поднете Заводу за интелектуалну својину Републике Србије. Такође, учествовао је у изради већег броја пројеката и студија за домаће и стране партнере из индустрије. Добро влада инжењерским софтверима, међу којима су значајни: „HSC Chemistry“ и „SuperPro Designer“. Обучен је за самосталан рад на сканирајућем електронском микроскопу. Током 2014. и 2015. године учествовао је на такмичењу за Најбољу технолошку иновацију. Тим кандидата је у 2014. години у укупном пласману освојио 16 место и награду у категорији „РЕГИОНАЛНЕ НАГРАДЕ“, а у 2015. години тим кандидата био је полуфиналиста такмичења и у укупном пласману освојио 8 место.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација Милисава Б. Ранитовића, дипл. инж. техн., под називом „Интегрални хидрометалуршки поступак рециклаже метала из електронског и електричног отпада са техно-економским аспектима“ написна је на укупно 141 стране и садржи 7 поглавља, 39 слика (графичких приказа), 44 табеле и 148 литературних навода. Састоји се од следећих поглавља: Увод, Теоријски део, Преглед литературних резултата, Експериментални део, Анализа резултата и дискусија, Закључак и Литература. Дисертација садржи и изводе на српском и енглеском језику, изјаву захвалности и 3 обавезна прилога, тј. изјаве.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У уводном делу, кандидат је приказао опште узроке приоритетности адекватног збрињавања и рециклаже урбаних отпадних токова са посебним освртом на савремене трендове критичности метала, чистије производње и одрживог развоја. У овом поглављу, посебно је истакнут значај рециклаже отпадних електричних и електронских уређаја, као најквалитетнијег и најбрже растућег урбаног отпадног тока, који у поређењу са примарним сировинама и другим нестандардним металуршким отпадима, садржи знатно веће количине основних и племенитих метала, што га чини изузетно вредном и значајном секундарном сировином.

У другом поглављу, поред дефинисања и класификације електричног и електронског отпада, приказан је историјски преглед успостављања законске регулативе која уређује област управљања овом врстом отпада. Такође, представљени су подаци о количинама електричног и електронског отпада које се генеришу у свету и Републици Србији на годишњем нивоу, као и детаљан приказ просечног хемијског и материјалног састава различитих електричних и електронских уређаја. У оквиру овог поглавља, посебна пажња посвећена је анализи еколошког и економског значаја рециклаже ове врсте отпадног материјала. Упоредном анализом са количинама и саставом других урбаних отпадних токова, истакнуто је да у систему управљања отпадом рециклажа ове врсте отпадног материјала има све већи значај, пре свега због чињенице да предметни отпад представља најбрже растући отпадни ток, али и изузетно комплексан састав који истовремено обухвата највредније материјале, попут племенитих метала и најтоксичније, попут, олова, живе, хрома и др. Због својих физичко-хемијских карактеристика и садржаја многих токсичних материја, електрични и електронски отпад је класификован као опасан отпад (каталогски бројеви 16 02 09*-16 02 15* и 20 01 35*).

У трећем поглављу, с обзиром да је примарни задатак ове дисертације оптимизација интегралног хидрометалуршког поступка рециклаже и селективног добијања метала из отпадних штампаних плоча, као смернице за индустријску примену, приказана је њихова хемијска комплексност са аспекта садржаја и специфичног концентрисања различитих материјала у појединачним деловима и компонентама штампаних плоча. Такође, дат је и просечан хемијски и материјални састав отпадних штампаних плоча.

Кроз посебне делове у оквиру овог поглавља анализирају су савремени поступци припреме, односно, механичког третмана као и финалног пиро или хидрометалуршког третмана отпадних штампаних плоча.

Поред тога, дат је преглед доступних литературних података и стање технике, нарочито карактеристика механичких метода припреме, али и постојећих пиро и хидрометалуршких поступака рециклаже отпадних штампаних плоча и добијања метала из истих. У оквиру анализе стања технике појединачно су анализиране главне карактеристике ових технолошких поступака у савременој металуршкој пракси, продукти примењених технолошких решења као и предности и недостаци сваког од анализираних поступка са аспекта ефикасности процеса, економске оправданости и потенцијалних утицаја на животну средину. У том смислу, детаљно су описани техно-економски услови и еколошка ограничења који утичу на избор поступака, као и сам начин извођења поступка рециклаже отпадних штампаних плоча. Ипак, с обзиром на предмет ове дисертације, посебна пажња посвећена је анализи стања технике хидрометалуршких поступака рециклаже и добијања метала из отпадних штампаних плоча. Детаљно су описани физичко-хемијски процеси припреме отпадних штампаних плоча, као и технолошка решења добијања појединачних метала и/или група метала, применом различитих хидрометалуршких поступака.

У четвртм поглављу, наведене су све фазе обухваћене експерименталним истраживањима, као и основни циљеви истраживања: проучавање механизма и термодинамичка анализа сложених реакција у хидрометалуршком систему за рециклажу механички припремљеног гранулата штампаних плоча, оптимизација селективних хидрометалуршких операција кроз испитивање утицаја различитих процесних параметара (концентрација излуживача и оксиданса, време, температура, брзина мешања, однос чврсто:течно) на ефикасност излужења и добијања метала из раствора након лужења, дефинисање интегралног хидрометалуршког поступка селективног добијања метала из механички припремљеног гранулата е-отпада, израд материјалног и енергетског биланса и техно-економска оцена иновативног хидрометалуршког процеса, испитивања поступања са крајњим неметаличним остацима и синергије са железоносним нус-продуктима.

Након излагања циљева, наведени су материјали који су коришћени у фази експерименталних истраживања. Затим су описане методе и опрема која је коришћена за детаљну карактеризацију лабораторијских и полуиндустријских узорака гранулата која настаје процесом механичког предтретмана, као и продуката изведеног хидрометалуршког третмана. Претходно се пре свега односи на примену аналитичких метода, атомске апсорпционе спектрофотометрије (AAS) и флуоресценције X зрака (XRF), рентгеноструктурне анализе (XRD), сканирајуће електронске микроскопије (SEM), различитих волуметријских метода итд. У оквиру лабораторијских и увећаних лабораторијских испитивања хидрометалуршког третмана гранулата штампаних плоча, коришћена је методологија планираног експеримента чиме је оптимизован број експеримената лужења и добијања метала из раствора након лужења. У циљу оптимизације технолошких параметара хидрометалуршког третмана гранулата штампаних плоча, испитивани су најзначајнији утицајни технолошки параметри за конкретне поступке, попут, концентрација излуживача, додатак оксиданса, време и температура лужења, брзина мешања, однос чврсто:течно. Приказане су поставке експерименталног истраживања, са интервалима испитиваних процесних параметара.

У петом поглављу, приказани су резултати карактеризације полазног гранулата, испитивања утицаја и оптимизације различитих процесних параметара, као и продуката добијених различитим поступцима третмана. Испитивања су спроведена кроз пет фаза које су обухватале: термодинамичку анализу могућих реакција, лабораторијске тестове оптимизације и потврду изводљивости оптимизованих процеса на пилот нивоу, дефинисање интегралног хидрометалуршког поступка и техно-економску анализу дефинисаног поступка, предлог

поступања се крајњим неметаличним остацима. Због великог броја тестова, лабораторијска испитивања су систематизована анализирајући три групе метала које карактерише хидрометалуршка компатибилност (основни метали, метали легуре лема и племенити метали), а резултати су приказани у табеларном и графичком облику. Најпре су приказани резултати карактеризације гранулата штампаних плоча. Затим су приказани резултати анализе могућих реакција комплексног хидрометалуршког система и одређивање термодинамичких параметара могућих реакција. У следећем делу су приказани резултати лабораторијских испитивања утицаја различитих процесних параметара на ефикасност излужења метала и добијања метала из раствора након лужења. Оптимизација процеса селективног лужења основних метала (Cu, Fe, Zn, Ni и Co), вршена је употребом раствора H_2SO_4 испитивањем утицаја додатка H_2O_2 као оксидационог средства (без додатка, 20 ml/h и 40 ml/h), температуре лужења (50°C, 60°C, 70 °C и 80°C), брзине мешања (200, 250 и 300 o/min) и односа чврсто:течно (50g/L, 100g/L и 150g/L). Након усвајања оптималних процесних параметара лужења (H_2SO_4 конц. 2M; H_2O_2 конц. 40 ml/h; 70°C; 5h; 300 o/min; 150 g/L) вршена је оптимизација поступка цементације Ag и Fe и Ni, испитивањем утицаја температуре (23°C, 30°C и 40°C) при чему је температура од 30°C усвојена као оптимална. Добијање Cu вршено је поступком електролизе при константним параметрима (40 °C, 120 A/m², 2,2 V, 100 o/min). Испитивањем је установљено да је након лужења основних метала могуће извршити једноставну механичку сепарацију фракције са повећаним садржајем Sn, што је са економског аспекта изузетно значајно у случају материјала са релативно ниским садржајем овог метала. Испитивање могућности селективног лужења легуре лема (Pb и Sn) вршена је употребом раствора NaOH, HNO_3 и HCl. Оптимизација поступка лужења раствором NaOH је вршена испитивањем утицаја додатка оксидационог средства (O_2 , 3-нитро бензоева киселина (MNB) и H_2O_2), температуре лужења (60°C, 70°C, 80 °C и 90°C), концентрације NaOH (0,5 M, 1 M, 2 M и 3 M) и времена лужења (1h, 2h, 4h и 6h). Оптимизација поступка лужења раствором HNO_3 је вршена испитивањем утицаја температуре лужења (70°C, 80 °C и 90°C), концентрације HNO_3 (1 M, 2 M и 3 M) и времена лужења (1h, 2h и 3h). Оптимизација поступка лужења раствором HCl је вршена испитивањем утицаја температуре лужења (70°C, 80 °C и 90°C), концентрације HNO_3 (2 M, 4 M и 6 M) и времена лужења (1h, 3h и 6h). Испитивањем је установљено да применом коришћених метода са економског аспекта није могуће постићи селективно лужење Pb и Sn, али да је након увећања концентрације киселине могуће селективно лужење Pb и Ag. Након усвајања оптималних процесних параметара лужења (HNO_3 конц. 8M; 80°C; 2h; 300 o/min; 200 g/L) вршена је оптимизација поступка таложења Pb и Ag раствором NaCl испитивањем утицаја температуре (23°C, 30°C и 40°C), а температура од 30°C усвојена као оптимална. Оптимизација поступка лужења племенитих метала (Au) концентрованим раствором царске воде вршена је испитивањем времена лужења (1h, 2h и 3h), а време од 2 h усвојено као оптимално. Ефикасности оптимизованих корака лужења и добијања метала потврђене су на нивоу увећаног (пилот) теста, којим је симулиран интегрални хидрометалуршки поступак селективног добијања метала из гранулата штампаних плоча, а које су износиле: Cu (93%), Fe (85%), Ni (72%), Sn (54%), Pb (>98%), Ag (>98%), Au (>98%). На бази потврде процеса на нивоу пилот теста, извршена је техно-економска анализа процеса са посебним освртом на цену коштања производног процеса, којом је показана конкурентност и висок потенцијал индустријске примене у случају мањих производних капацитета и материјала са релативно ниским садржајем Sn. Дат је предлог поступања са крајњом фракцијом неметаних материјала и синергије са железоносним нус-продуктима.

У шестом поглављу, сумирани су најзначајнији закључци проистекли из рада на овој дисертацији.

У седмом поглављу, приказана је Литература која садржи све референце цитиране у дисертацији.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Иако је употреба електричних уређаја заступљена још од тридесетих година прошлог века, тек након појаве првог персоналног рачунара, произведеног 1975. године, уследио је прави процват електронске индустрије, а потом и индустрије телекомуникација. Управо зато, проблематика електронског и електричног отпада, све до почетка деведесетих година, била је потпуна непознаница. Са друге стране, како електронска индустрија и индустрија телекомуникација, данас представљају грану индустрије која се развија највећом брзином, а употребни век ових производа значајно смањује, за последицу има да се количине ове врсте отпада данас увећавају брже од било које друге врсте отпадног материјала.

Прва законска регулатива која уређује ову област генерално започиње почетком деведесетих година, усвајањем Базелске Конвенције. Међутим, све до 2010 године, рециклажа електронског и електричног отпада посматрана је искључиво са аспекта што ефикаснијег прикупљања и одлагања на начин којим се не угрожава здравље људи и животна средина. Наиме, усвајањем стратегије Европске Уније назване Raw materials initiative 2010. године, рециклажа електронског и електричног отпада по први пут је посматрана са технолошког аспекта истичући значај развоја и имплементације процеса који омогућавају истовремено збрињавање и ефикасну валоризацију врло вредних материјала који су у њему садржани.

Пирометалуршки поступци третмана представљају традиционалне методе рециклаже овог отпадног материјала, који се у савременим постројењима процесира заједно са примарним сировинама. Како су ова постројења изворно пројектована за третман примарних сировина, њихови прерађивачки капацитети су ограничени, а промене технолошког поступка у циљу очувања животне средине праћене су огромним инвестицијама. Са друге стране, како сектором рециклаже електричног и електронског отпада данас доминирају мала и средња предузећа, развој и имплементација хидрометалуршких поступака које генерално карактерише значајно нижи степен инвестиционих улагања, постају све актуелнија. Увидом у доступну литературу и стање технике, може се уочити да хидрометалуршки поступци рециклаже и добијање метала из отпадних штампаних плоча, као најзначајније компоненте електронског и електричног отпада, у последње две деценије узимају потпуни примат у односу на традиционалне пирометалуршке поступке. У том смислу, у научној литератури доступне су бројне хидрометалуршке методе валоризације метала и/или група метала из отпадних штампаних плоча. Ипак, анализа могућности имплементације ових метода у интегралне процесе селективног добијања метала тема је врло малог броја истраживања. Шта више, одсуство анализе економских показатеља, компатибилности и потенцијалних негативних утицаја појединачних операција селективног добијања метала или група метала, управо представља главну препреку успешној имплементацији ових поступака на индустријском нивоу.

Ова докторска дисертација анализира како технолошке, тако и економске и еколошке аспекте могућности развоја интегралног хидрометалуршког поступка селективног добијања метала из отпадних штампаних плоча применом једноставних хидрометалуршких операција. На основу добијених резултата испитивања и оптимизације појединачних корака валоризације метала и група метала, дефинисан је технолошки поступак а техничко-технолошка изводљивост је верификована увећаним лабораторијским тестом. Имплементација једноставног механичког

поступка добијања Sn као и квалитет финалних продуката, значајно увећавају укупан економски бенефит примењеног решења. Предложени процес је флексибилан и адекватан за третман штампаних плоча различитог састава. Техно-економском анализом дефинисаног процеса одређени су основни економски показатељи којима је утврђен потенцијал примењеног решења као алтернативе пирументауршким поступцима, посебно погодан у случају мањих производних капацитета и материјала са релативно ниским садржајем Sn. Предлогом начина поступања са финалним чврстим остацима неметалних материјала након хидрометалуршког третмана, као и испитивањем синергетских ефеката са специфичним железоносним материјалима, омогућено је дефинисање безотпадног процеса што предметно истраживање чини веома значајним са аспекта валоризације вредних метала и заштите животне средине и индустријске примене.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У докторској дисертацији цитирано је укупно 148 референци. Велики број цитираних референци представљају научни радови публиковани у последњих неколико година, што указује на актуелност теме ове докторске дисертације. Највећи број цитираних радова чине радови међународног значаја са тематиком релевантном за израду докторске дисертације. Међу цитираним референцама, најзаступљенија је тема валоризације метала из отпадних штампаних плоча применом хидрометалуршких метода. Разматрани су и научни радови који се баве механичком припремом и пирументауршким поступцима рециклаже и валоризације метала из овог отпада као и научни радови у којима је разматран значај развоја и имплементације концепта чистије производње у поступцима рециклаже електричног и електронског отпада.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Због комплексности изналажења интегралног хидрометалуршког поступка који ће обезбедити максимално искоришћење свих корисних компоненти садржаних у отпадним штампаним плочама, неопходно је познавати све њихове карактеристике. Ово се пре свега односи на физичко-хемијске карактеристике материјала, али и познавање термодинамичких параметара комплексног система могућих хемијских реакција. За комплексну карактеризацију полазног материјала, одређивање ефикасности примењених поступака као и испитивање квалитета финалних продуката, примењиване су најсавременије аналитичке методе: AAS, XRF, XRD и SEM. Анализа термодинамичких параметара комплексног система могућих хемијских реакција вршена је коришћењем HSC Chemistry софтвера. Поред ових метода, коришћене су и методе за испитивање механичких особина добијених производа применом оптималних технологија. Техно-економска анализа дефинисаног процеса извршена је коришћењем SuperPro Designer софтвера. У циљу добијања резултата за безбедно одлагање крајњих остатака, рађено је одређивање токсичности стандардним тестом лужења (TCLP). Оптимизација интегралног хидрометалуршког поступка селективног добијања метала из отпадних штампаних плоча, постигнута је применом методологије планираног експеримента. Она је омогућила да се експериментална испитивања остваре са оптималним бројем експеримента, а да се при томе дефинишу зависности утицајних параметара на примењена технолошка решења и квалитет производа.

3.4. Применљивост остварених резултата

Истраживања која су спроведена у оквиру ове дисертације и добијени резултати омогућили су дефинисање потпуно иновативног хидрометалуршког поступка селективног добијања метала

из отпадних штампаних плоча. Примењеним технолошким решењем омогућен је висок степен искоришћења вредних метала (Cu, Fe, Ni, Pb, Sn, Ag и Au) остварен кроз низ сукцесивних хидрометалуршких операција.

Висок степен искоришћења метала и квалитет продуката добијених примењеним технолошким решењем су у највећој мери потврђени у полуиндустријским условима, што представља добру основу за индустријску примену процеса у сектору рециклаже електричног и електронског отпада различитог састава.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат Милисав Б. Ранитовић, дипл. инж. техн. је током израде докторске дисертације показао способност планирања и реализације експеримената. Изразите истраживачке квалитете исказао је коришћењем различитих инструменталних метода, а при анализи резултата показао је самосталност, систематичност и креативност. На основу досадашњег рада и постигнутих резултата кандидата, Комисија сматра да кандидат поседује квалитете неопходне за самосталан научно-истраживачки рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

У оквиру ове дисертације дефинисано је ново безотпадно техничко-технолошко решење валоризације метала из гранулата отпадних штампаних плоча хидрометалуршким поступцима. Експериментално истраживање је вођено у циљу свеобухватне карактеризације улазног материјала, добијених продуката и крајњих остатака, дефинисања оптималних технолошких параметара, интеграције оптимизованих селективних операција у техничко-технолошко решење, економске оцене дефинисаног процеса, синергетског ефекта и елемената чистије производње.

Најзначајнији научни доприноси ове дисертације су:

- дефинисан је механизам и термодинамичке карактеристике сложених реакција у хидрометалуршком систему за рециклажу механички припремљеног гранулата е-отпада,
- дефинисани су оптимални процесни параметри сваке од хидрометалуршких операција за селективно добијање метала (Cu, Fe, Ni, Pb, Ag и Au) из механички припремљеног гранулата е-отпада, као и једноставан поступак механичке екстракције Sn у раној фази хидрометалуршког третмана,
- дефинисан је интегрални хидрометалуршки поступак за селективно добијање метала из механички припремљеног гранулата е-отпада, потврђен на нивоу увећаног лабораторијског теста
- дефинисан је материјални и енергетски биланс интегралног хидрометалуршког процеса и примена елемената чистије производње,
- израђена је техно-економске оцене предложеног хидрометалуршког процеса
- дефинисан је начин поступања са крајњим остацима неметалних материјала, синергетски ефекат са специфичним железозносним материјалима кроз примену елемената чистије производње.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

На основу јасно дефинисаних предмета и циљева истраживања, одређена је методологија истраживања која је и примењена у докторској дисертацији. Полазећи од чињенице да еколошки фактор рециклаже електричног и електронског отпада има врло значајну улогу у систему управљања отпадом, унапређење економских аспеката кроз високо ефикасну валоризацију вредних метала, може значајно смањити укупне трошкове рециклажног поступка и унапредити сектор секундарне производње метала. Ипак, константне промене структуре и састава штампаних плоча, као главне компоненте електричног и електронског отпада, значајно компликује рециклажне поступке. Велики је број истраживања у овој области, која углавном обухватају технолошка решења за селективну валоризацију појединих метала, што доводи у питање економску оправданост процеса. Бројна истраживања хидрометалуршког добијања основних метала (Cu, Ni), Pb, Sn или племенитих метала, карактерише недостатак анализе потенцијалних негативних утицаја примењених решења. Ово се пре свега односи на чињеницу да су у штампаним плочама садржани бројни метали са изразито различитим особинама и које карактерише хидрометалуршка некомпатибилност. Као један од примера може се истаћи високо ефикасни процес добијања Sn раствором HCl али који прате губици Ag, што је са економског аспекта потпуно неприхватљиво. Предложено технолошко решење у овој дисертацији даје значајан допринос решавању проблема валоризације метала са изразито различитим особинама (Cu, Fe, Ni, Pb, Sn, Ag и Au) применом интегралног хидрометалуршког поступка. Дефинисању оптималног технолошког решења погодног за третман штампаних плоча различитог састава, претходило је термодинамичко моделовање појединих фаза процеса, обимна лабораторијска и полуиндустријска испитивања, детаљна анализа резултата и економска оцена дефинисаног процеса. На основу свих остварених резултата, интегрални хидрометалуршки поступак селективног добијања метала, који је установљен у оквиру ове дисертације, може бити применљив код било ког оператера који се бави примарном рециклажом електричног и електронског отпада применом механичких операција. Такође, дефинисани поступак може бити примењив и у пирометалуршким постројењима у поступцима хидрометалуршког третмана нестандардних анодних муљева.

4.3. Верификација научних доприноса

Категорија M22:

1. **M. Ranitović**, Ž. Kamberović, M. Korać, N. Jovanović, A. Mihajlović, Hydrometallurgical recovery of tin and lead from WPCBs: limitations and opportunities, *Metalurgija* 55(2), 2016, 153-156; ISSN 0543-5846; IF 0,959 (2014: 29/74);

Категорија M23:

2. **M. Ranitović**, Ž. Kamberović, M. Korać, M. Gavrilovski, H. Issa, Z. Anđić, Investigation of possibility for stabilization and valorization of electric arc furnace dust and glass from electronic waste, *Science of Sintering* 46(1), 2014, 83-93; ISSN 0350-820X; IF 0,575 (2014: 49/74).

Категорија M33:

3. Ž. Kamberović, M. Korać, S. Vračar, **M. Ranitović**, Preliminary process analysis and development of hydrometallurgical process for the recovery of copper from waste printed circuit boards, in *Proceeding of Going Green-CARE INNOVATION*, (2010), Vienna, Austria, 2010, p. No.IS05c on CD
4. Ž. Kamberović, M. Korać, D. Ivšić, V. Nikolić, **M. Ranitović**, Process selection for hydrometallurgical WPCBs recycling, *Proceedings of the 4th International Conference*—

Processing and Structure of Materials, Palić 2010, Serbia, pp. 67-72, ISBN 978-86-87183-17-9

5. Ž. Kamberović, M. Korać, **M. Ranitović**, M. Gavrilovski, N. Vraneš, An integrated approach on a WEEE recycling: Special reference to the printed circuit boards and CRT monitors, *Proceedings of the 1st International Conference "Ecology of Urban Areas 2011"*, Ečka 2011, pp. 357-362, ISBN 978-86-7672-145-0

Категорија M52:

6. Željko Kamberović, Marija Korać, Dragana Ivšić, Vesna Nikolić, **Milisav Ranitović**, Hydrometallurgical process for extraction of metals from electronic waste-Part I: Material characterization and process option selection, *Metalurgija-Journal of Metallurgy* 15 (4), ISSN 0354-6306, 2009, 231-243
7. Željko Kamberović, Marija Korać, **Milisav Ranitović**, Hydrometallurgical process for extraction of metals from electronic waste-Part II: Development of the processes for the recovery of copper from printed circuit boards (PCB), *Metalurgija-Journal of Metallurgy* 17 (3), ISSN 0354-6306, 2011, 139-149

Категорија M63:

8. Nikola Dimitrijević, **Milisav Ranitović**, Dragana Ivšić-Bajčeta, Ispitivanje mogućnosti dobijanja staklo-keramičkih materijala postupkom brzog sinterovanja EAFD i LCD, 7th Symposium & 1st Student Symposium "Recycling technologies and sustainable development" with International Participation, Soko Banja, Srbija, 5. - 7. septembar 2012., Zbornik radova, 5-9, urednik: Jovica M. Sokolović, Grozdanka D. Bogdanović, izdavač: Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru, ISBN978-86-6305-000-6
9. **Milisav Ranitović**, Vesna Nikolić, Tihomir Kovačević, Delimično topljenje i centrifugiranje kao nova metoda pred-tretmana metalnog granulata e-otpada: Preliminarni laboratorijski test, 7th Symposium & 1st Student Symposium "Recycling technologies and sustainable development" with International Participation, Soko Banja, Srbija, 5. - 7. septembar 2012., Zbornik radova, 14-19, urednik: Jovica M. Sokolović, Grozdanka D. Bogdanović, izdavač: Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru, ISBN978-86-6305-000-6

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу свега изложеног Комисија сматра да докторска дисертација кандидата Милисав Б. Ранитовића, дипл. инж. техн. под називом "Интегрални хидрометалуршки поступак рециклаже метала из електронског и електричног отпада са техно-економским аспектима", представља значајан и оригиналан научни допринос у области Металуршко инжењерство, што је и потврђено објављивањем радова у научним часописима међународног и националног значаја и саопштењима на међународним и националним скуповима. Комисија износи мишљење да је кандидат током израде дисертације показао самосталност у научно-истраживачком раду и да су циљеви докторске дисертације у потпуности остварени. Комисија сматра да приказани резултати истраживања доприносе повећању знања о могућностима интегралног добијања метала из отпадних штампаних плоча применом хидрометалуршких метода, до комерцијалних производа, уз поштовање све стриктнијих еколошких захтева, и са освртом на економске ефекте испитиваног процеса.

Имајући у виду квалитет, обим и научни допринос постигнутих и приказаних резултата, Комисија предлаже Наставно-научном већу Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду да поднету докторску дисертацију, под називом „Интегрални хидрометалуршки поступак рециклаже метала из електронског и електричног отпада са техно-економским аспектима“ кандидата Милисава Б. Ранитовића, дипл. инж. техн., прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду, и да се након завршетка ове процедуре кандидат позове на усмену одбрану дисертације пред Комисијом у истом саставу.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

др Жељко Камбировић, редовни професор
Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет

др Марија Кораћ, виши научни сарадник
Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет

др Мирослав Сокић, виши научни сарадник
Институт за технологију нуклеарних и других минералних
сировина у Београду

др Милорад Гавриловски, научни сарадник
Универзитет у Београду, Иновациони центар Технолошко-
металуршког факултета у Београду д.о.о.