

Факултет Машински

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

1424/4

Веће научних области техничких наука

(Назив стручног већа коме се захтев упућује, сагласно

члану 6. и чл. 7 став 1. овог правилника)

(Број захтева)

07.12.2023. године

(Датум)

ЗАХТЕВ**за давање сагласности на реферат о урађеној докторској дисертацији**

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

БРАТИСЛАВ (МИЛОШ) РАЈИЧИЋ

(име, име једног од родитеља и презиме)

КАНДИДАТ **БРАТИСЛАВ (МИЛОШ) РАЈИЧИЋ** уписан на Докторске студије 2010. г.

(име, име једног од родитеља и презиме)

Поднео је захтев за израду докторске дисертације:

„МАТЕРИЈАЛИ ПОВЕЋАНЕ ЕРОЗИОНЕ ОТПОРНОСТИ ИЗЛОЖЕНИ ЕКСТРЕМНИМ УСЛОВИМА РАДА НА ТЕРМОЕНЕРГЕТСКИМ ПОСТРОЈЕЊИМА“,

Универзитет је дана 19.09.2016. год. својим актом под бр. 61206-4251/2-16 дао сагласност на предлог теме докторске дисертације која је гласила: **„МАТЕРИЈАЛИ ПОВЕЋАНЕ ЕРОЗИОНЕ ОТПОРНОСТИ ИЗЛОЖЕНИ ЕКСТРЕМНИМ УСЛОВИМА РАДА НА ТЕРМОЕНЕРГЕТСКИМ ПОСТРОЈЕЊИМА“,**

Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата: **Братислава (Милош) Рајичића**

(име, име једног од родитеља и презиме)

Образована је на седници одржаној 28.09.2023. године, одлуком факултета под бр. 1424/2, у саставу:

Име и презиме члана комисије	звање	научна област	установа у којој је запослен
1. <u>Др Гордана Бакић</u>	Ред. проф.	Тех. мат. маш. мат. и заваривање и сродни поступци	Машински факултет Београд
2. <u>Др Милош Ђукић</u>	Ред. проф.	Тех. мат. – маш мат. и заваривање и сродни поступци	Машински факултет Београд
3. <u>Др Александар Ванцл</u>	Ред. проф.	Тех. мат. – Трибологија	Машински факултет Београд
4. <u>Др Александар Масларевић</u>	Научни сарадник	Тех. мат. – Машински мат.	Машински факултет Београд
5. <u>Др Весна Максимовић</u>	Научни саветник	Наука о материјалима	ИНН Винча

Наставно-научно веће факултета прихватило је извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације на седници одржаној дана 07.12.2023. године.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

проф.др Владимир Поповић

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
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ –
Број: 1424/4
Датум: 07.12.2023. године
Београд, Краљице Марије бр. 16

На основу члана 40. Закона о високом образовању („Службени гласник РС“, број 88/2017, 73/2018, 27/2018 – др. закон 67/2019, 6/2020 – др. закони, 11/2021 – аутентично тумачење, 67/2021, 67/2021 – др. закон и 76/2023), члана 64. Статута Машинског факултета - пречишћен текст (број 1136/4 од 28.06.2021. године), Одлуке о изменама и допунама Статута број 239/6 од 17.02.2023. године, чланова 46. и 47. Правилника о докторским студијама на Универзитету у Београду - Машинском факултету, Наставно-научно веће Машинског факултета на седници одржаној 02.11.2023. године, донело је:

ОДЛУКУ

Усваја се Извештај о урађеној докторској дисертацији Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације **„Материјали повећане ерозионе отпорности изложени екстремним условима рада на термоенергетским постројењима“** студента **Братислава Рајичића**, маг. инж. маш.

У року од 30 дана од дана стављања докторске дисертације на увид јавности није било примедби на Извештај и докторску дисертацију.

Докторску дисертацију и Извештај о урађеној докторској дисертацији доставити на давање сагласности Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

Јавна одбрана докторске дисертације обавиће се по добијању сагласности Универзитета у Београду.

Универзитет у Београду је својом Одлуком број 61206-4251/2-16 од 19.09.2016. године, дао сагласност на предлог теме докторске дисертације.

Објављени радови студента у часописима међународног значаја:

1. **Rajicic B.**, Maslarevic A., Bakic G., Maksimovic V., Djukic M., Erosion Wear Behavior of High Chromium Cast Irons, Transactions of the Indian Institute of Metals, Vol. 76, pp. 1427-1437, DOI: 10.1007/s12666-022-02860-7, 2023 (**IF=1,6**) (ISSN: 0975-1645).

Одлуку доставити: Универзитету у Београду, студенту, ментору, Катедри за технологију материјала и архиви Факултета.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

проф. др Владимир Поповић

Универзитет у Београду

Машински факултет

ВЕЋУ ДОКТОРСКИХ СТУДИЈА

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата **Братислава М. Рајичића**, маг. инж. маш., студента докторских студија

Одлуком Наставно-научног већа Универзитета у Београду – Машинског факултета, број 1424/2 од 28.09.2023. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата **Братислава М. Рајичића**, под насловом

Материјали повећане ерозионе отпорности изложени екстремним условима рада на термоенергетским постројењима

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 Братислав М. Рајичић, маг. инж. маш, уписан је на Докторске академске студије Универзитета у Београду – Машинског факултета школске 2010/2011 године. По плану и програму докторских студија, кандидат је са просечном оценом 10,00 (десет) положио све предмете и одбранио пројекат идеје докторске дисертације. На основу захтева кандидата бр. 1604/1 од 07.07.2016. године да му се одобри и да сагласност на предлог теме докторске дисертације, Наставно-научно веће Универзитета у Београду – Машинског факултета је на седници одржаној 14.07.2016. године донело Одлуку бр. 1604/2 да се прихвати тема докторске дисертације кандидата **Братислава М. Рајичића** под називом **Материјали повећане ерозионе отпорности изложени екстремним условима рада на термоенергетским постројењима**, а на седници од 25.08.2016. године донело Одлуку бр. 1604/5 о заснованости теме и испуњености услова за израду дисертације. За менторе дисертације су именовани проф. др Гордана Бакић и проф. др Милош Ђукић. Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду је донело Одлуку бр. 61206-4251/2-16 од 19.09.2016. године, којом се даје сагласност на предлог теме докторске дисертације Братислава М. Рајичића, под називом **Материјали повећане ерозионе отпорности изложени екстремним условима рада на термоенергетским постројењима**.

На основу обавештења ментора да је кандидат завршио дисертацију и предлога Катедре за технологију материјала бр. 1424/1 од 22.09.2023.год., Наставно-научно веће

Универзитета у Београду – Машинског факултета, је на седници одржаној 28.09.2023. године донело Одлуку бр. 1424/2 којом се именују чланови Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата **Братислава М. Рајичића**, у саставу:

- проф. др Гордана Бакић, ред. проф., Универзитет у Београду – Машински факултет
- проф. др Милош Ђукић, ред. проф., Универзитет у Београду – Машински факултет
- проф. др Александар Венцл, ред. проф., Универзитет у Београду – Машински факултет
- др Александар Масларевић, научни сарадник, Универзитет у Београду – Машински факултет
- др Весна Максимовић, научни саветник, Универзитет у Београду, Институт за нуклеарне науке „Винча“

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација Братислава М. Рајичића под називом **Материјали повећане ерозионе отпорности изложени екстремним условима рада на термоенергетским постројењима** припада научној области Техничких наука – Машинско инжењерство, ужа научна област Технологија материјала – Машински материјали и заваривање и сродни поступци, за коју је матичан Универзитет у Београду – Машински факултет. Ментори ове докторске дисертације, са компетенцијама из научне области, су проф. др Гордана Бакић (36 радова, 789 цитата и h-index 9, извор Scopus) и проф. др Милош Ђукић (40 радова, 1167 цитата и h-index 13, извор Scopus) са Катедре за технологију материјала, Универзитета у Београду – Машинског факултета.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Братислав М. Рајичић рођен је 04.08.1974. године у Чачку, где је завршио основну школу „Филип Филиповић“ са одличним успехом као носилац Вукове, Аласове и Спартакове дипломе. Чачанску Гимназију усмереног образовања, занимање математичко-програмерски сарадник у природним наукама, завршава 1993. године такође са одличним успехом. Универзитет у Београду – Машински факултет уписао је 1993.год., где је и дипломирао 2004.год. на смеру Термотехника. Дипломски рад на тему „Процена века паровода свеже паре ТЕ Морава са аспекта стварне радне температуре“, одбранио је на Катедри за технологију материјала са оценом 10 (десет). Мастер академске студије на Универзитету у Београду – Машинском факултету завршава 2012. године, модул „Заваривање и заварене конструкције“, са просечном оценом током студија 9,06 (девет и 06/100), положивши Дипломски (Мастер) рад на тему „Експертиза лома овесних цеви на термоенергетском постројењу“ са оценом 10 (десет), чиме је стекао академски назив мастер инжењер машинства. Докторске академске студије на Универзитету у Београду – Машинском факултету, уписао је 2010. године и по плану и програму је положио све обавезне и изборне предмете и одбранио Пројекат идеје докторске дисертације.

Братислав М. Рајичић је запослен на Универзитету у Београду – Машинском факултету, Катедра за технологију материјала, почев од 2004 до 2021. године, а од 2021. године до данас је запослен у Иновационом центру Машинског факултета. Као стручни сарадник на Катедри за технологију материјала (Центар за материјале, трибологију и сагоревање, Р.Ј 12.04 проф. В. Шијачки) био је запослен у периоду 2004-2012 година. У два изборна периода, од 30.08.2012. до 01.09.2018. године, кандидат је био запослен као асистент, на истој Катедри, за ужу научну област технологија материјала – машински материјали и заваривање и сродни поступци. Изборно веће у оквиру Наставно-научног већа

Универзитета у Београду – Машинског факултета, на седници одржаној дана 10.10.2019. године, донело је Одлуку бр. 1005/5 да се Братислав М. Рајичић изабере у истраживачко звање истраживач-сарадник. Кандидат је био секретар Катедре за технологију материјала од 01.10.2012. до 30.09.2015. године.

Братислав М. Рајичић, маг. инж. маш. и студент докторских студија, прво као стручни сарадник (2004-2012), затим као асистент (2012-2018) и као истраживач-сарадник (2019-2023) на Катедри за технологију материјала, активно учествује у извођењу наставе на студијском програму Основних академских студија „Машинског инжењерства“ и држи вежбе из обавезних предмета Машински материјали 1 и Машински материјали 2, као и из изборног предмета Репарација машинских делова и конструкција. Такође, од школске 2020/2021 кандидат учествује и у настави на студијском програму Основних академских студија „Информационе технологије у машинству“ и држи вежбе из изборног предмета Машински материјали. Кандидат има склоност ка педагошком раду са студентима па је тако, према анонимним студентским анкетама, позитивно оцењиван за свој рад и то оценама у распону од 4,47 до 4,81 (од 5,00).

Братислав М. Рајичић има изразиту склоност за научно-истраживачки рад, па је тако у периоду од 2004. године до сада, активно учествовао у реализацији 5 (пет) националних пројеката Министарства просвете, науке и технолошког развоја (МПНТР), Републике Србије, у областима Технолошког развоја (ТР), Енергетске ефикасности (ЕЕ) и Иновационе делатности (ИД).

Такође, кандидат је учествовао и у изради преко 100 ауторизованих елабората, експертиза и других докумената ограничене циркулације (пројекти сарадње са привредом), пре свега у областима понашања и поузданости материјала у експлоатацији при различитим условима рада, процени преосталог радног века методама заснованим на стању метала и структурној деградацији, продужетку радног века компоненти термоенергетских и других индустријских постројења, испитивањима материјала са и без разарања, заштити материјала од хабања и корозије коришћењем превлака, и сл.

Братислав М. Рајичић је током јуна 2004. године боравио на Bay Zoltan Insitute for Logistic and Produstion Systems, Miskolc, Hungary, где је похађао ЕУ пројект семинар Extending Plant Life through Improved Fabrication and Advanced Repair Methodology (ELIXIR). Кандидат је члан следећих научно-стручних организација: Друштва термичара Србије, Друштва за интегритет и век конструкција (ДИВК), Европског друштва за интегритет конструкција (ESIS) и Друштва за унапређење заваривања у Србији (ДУЗС). Познаје рад на рачунару и служи се свим програмима из Microsoft Windows/Office пакета (сертификат бр. 275/G2K од 06.11.2000.год., оператер на персоналним рачунарима), а такође користи и програме као што су AutoCad, SolidWorks, CorelDraw, MathCad, ProEngineer и сл. Кандидат се активно служи енглеским језиком.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација кандидата Братислава М. Рајичића под називом „**Материјали повећане ерозионе отпорности изложени екстремним условима рада на термоенергетским постројењима**“ је изложена на укупно 104 стране и садржи 81 слику, 24 табеле, 180 литературних навода и прилог (биографија и библиографија аутора, Изјава о ауторству, Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада и Изјава о коришћењу).

Дисертација садржи следећа поглавља:

1. Увод
2. Теоријски део
3. Експериментални део
4. Резултати испитивања и дискусија
5. Закључак

У оквиру дисертације, налазе се странице са подацима о менторима и члановима комисије, предговор, сажетак на српском и енглеском језику, садржај, номенклатура, списак табела и списак слика.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

Увод

У уводном делу дисертације наведен је значај оштећења насталих услед абразивно-ерозивног хабања на домаћим индустријским постројењима, као и системска анализа при решавању проблема настанка оштећења изазваних ерозијом са циљем продужетка радног века опреме. Овај приступ је базиран на одржавању усмереном ка поузданости, у циљу очувања функционисања система, кроз дефинисање критичних компоненти у систему и утврђивања узрока који доводе до отказа. На примеру једног домаћег термоенергетског (ТЕ) постројења снаге 650MW, који сагорева лигнит ниске калоричне моћи и са високим садржајем минерала, системском анализом је утврђено да је ерозивно-абразивно хабање доминантан узрок оштећења компоненти у преткотловском постројењу, котлу и на систему за отпепељавање. Као најкритичнији подсистем ТЕ постројења издвојен је систем за отпепељавање који ради у условима интензивног хабања, посебно цевоводи за пнеуматски транспорт пепела, јер само услед застоја и отказа ових компоненти није произведено више од 170000 MWh електричне енергије у периоду од 15 месеци.

Цевоводи за пнеуматски транспорт пепела су, према пројекту, са унутрашње стране заштићени слојем базалта или керамике (на бази Al_2O_3 , ZrO_2 и SiO_2). Њихов радни век у експлоатационим условима екстремне ерозије износио је <7000h за цеви заштићене базалтом, односно 10000-12000h за цеви заштићене керамиком. Велике количине угља променљивог квалитета, ниске топлотне моћи и са већим садржајем несагорелог минералног остатка у пепелу, као и знатна количина издвојене шљаке, представљају утицајне факторе који утичу на појаву и развој ерозивно-абразивних оштећења материјала критичних компоненти. Узимајући у обзир све претходно наведено, као главни циљ ове дисертације дефинисан је продужетак радног века делова елемената система за отпепељавање који раде у екстремним ерозивно-абразивним експлоатационим условима.

Теоријски део

У теоријском делу, кроз више подпоглавља и уз детаљан литературни преглед актуелних истраживања, приказане су теоријске основе које представљају подлогу за истраживања у оквиру ове дисертације. Кроз прва три подпоглавља теоријског дела, детаљно су обрађени механизми ерозионог хабања кртих и дуктилних материјала. Разматрани су

најважнији параметри који утичу на ерозивно хабање материјала, а тичу се утицаја брзине, облика и величине ерозионих честица, угла удара, флуksа еродента као и интеракцији материјала и еродента у функцији њихове тврдоће.

У четвртном подпоглављу теоријског дела дисертације, анализиране су ерозионе карактеристике угљева и пепела у домаћим термоелектранама, са аспекта садржаја кварца и пирита у њима, који имају највећи допринос у изазивању ерозивно-абразивних оштећења. У петом подпоглављу дат је осврт на хабање компоненти термоенергетских постројења. Издвојене су компоненте ТЕ постројења са најчешћим и најинтензивнијим ерозивно-абразивним оштећењима, који доводе до хабања и отказа на: а) деловима млинског постројења за припрему и уситњавање угља; б) транспортним системима као што су канали аеросмеше, разделници, итд.; в) грејним површинама и г) систему за транспорт пепела и шљаке на депонију (цевоводи за пнеуматски транспорт пепела).

У оквиру шестог подпоглавља теоријског дела дат је приказ легура које су отпорне на хабање, са посебним освртом на високолегирана бела ливена гвожђа са високим садржајем хрома (*eng.* High Chromium Cast Irons, HCCI). Основна идеја ове докторске дисертације је била могућност примене HCCI легура за израду делова елемената цевовода за пнеуматски транспорт пепела у ТЕ постројењу, уместо комерцијалних антихабајућих материјала (базалт и керамика). Могућност побољшања отпорности на хабање ових легура њиховом модификацијом, у погледу садржаја легирајућих елемената и начина термичке обраде, чини ове легуре потенцијалним кандидатима за уградњу на критична места у домаћим ТЕ постројењима. У истом подпоглављу анализиране су и превлаке типа Fe-Cr-C, које су по саставу врло сличне HCCI легурама, ради међусобног поређења са аспекта отпорности на хабање. Отпорност на хабање оваквих HCCI легура је, у оквиру овог теоријског дела, детаљно разјашњена са јасно издвојеним утицајем микроструктурних карактеристика на потенцијалне ерозивно-абразивне механизме оштећења.

Експериментални део

У поглављу Експериментални део ове дисертације, описана су лабораторијска и истраживања *in-situ*, кроз неколико подпоглавља. У оквиру експерименталног дела у првом кораку су израђени ливени узорци од модификованих легура високолегираних белих ливених гвожђа легираних хромом, као и узорак са превлаком Fe-Cr-C добијен плазма поступком наваривања. Модификација HCCI легура са ~15%Cr и ~25%Cr, у односу на стандардне, је извршена у погледу хемијског састава и режима термичке обраде након ливења (узорци HCCI-15, HCCI-15HT, HCCI-25 и HCCI-25-HT; где је HT ознака за термички обрађен узорак) са циљем да компоненте израђене од ових легура успешно одговоре на постаљене експлоатационе захтеве на ТЕ постројењима. У сврху провере погодности легура за примену у интензивно-ерозивним радним условима, израђена је инсталација и изведено ерозионо испитивање направљених узорака, са великим брзинама честица (90 m/s) и са повећаним масеним протоком ерозионих честица (3000 g/min), под најчешћим углом удара честица (45°). Такође, у циљу поређења ерозионе отпорности и под истим условима ерозионог теста, извршено је и ерозионо испитивање узорака са Fe-Cr-C превлаком нанетом плазма наваривањем (HCCI-PTA), као и узорака комерцијалних превлака на бази базалта (P-B) и керамике (P-C), које се већ користе у сврху заштите од ерозивно-абразивног хабања на системима за транспорт пепела. На свим металним узорцима извршена су детаљна микроструктурна испитивања, као и остала потребна испитивања приказана у Плану експеримента. На основу овога извршена је детаљна карактеризацију узорака пре и после ерозионог испитивања, са циљем да се идентификују механизми ерозије.

За испитивање—*in-situ* израђен је цевни лук (HCCI-CL) и уграђен у цевовод за отпепељавање једне домаће термоелектране. Овај цевни лук је демонтиран после приближно 2 године рада, уздужно је исечен по изводници и детаљно испитан.

Резултати испитивања и дискусија

У поглављу Резултати испитивања и дискусија, приказани су резултати са детаљном анализом свих Планом експеримента предвиђених испитивања. У уводној дискусији, систематизовани су карактеристични параметри HCCI легура, као што су запремински удео карбида (CVF), однос Cr/C и Cr/Fe у легурама, врста основе и тип карбида, који сумарно могу ближе да одреде микроструктурну карактеризацију и утицај исте на експлоатационо понашање таквих материјала. За испитиване легуре HCCI-15, HCCI-25 и HCCI-PTA одређено је да на основу хемијског састава спадају у групу подеутектичких легура. Такође, у дискусији је ближе одређен и утицај параметара термичке обраде на ливене HCCI легуре са освртом на микроструктурно стање таквих узорака и њихове потенцијалне експлоатационе карактеристике.

У оквиру подпоглавља Микроструктурна анализа испитаних легура извршена је карактеризација узорака HCCI-15, HCCI-25, HCCI-PTA и HCCI-CL, као и узорака HCCI-15-НТ и HCCI-25-НТ, оптичком (ОМ) и скенирајуће електронском микроскопијом (SEM). Узорци HCCI-PTA и HCCI-CL су анализирани и енергодисперзионом спектроскопијом (EDS), док су рендгенском дифрактометријом (XRD) анализирани узорци HCCI-15, HCCI-15-НТ, HCCI-25, HCCI-25-НТ и HCCI-CL.

Подпоглавље Ерозионо испитивање у екстремним условима приказује резултате ерозионе отпорности свих испитаних узорака за исте услове испитивања, кроз добијене вредности губитка масе (Δm) током овог испитивања. На основу резултата испитивања примећен је приближно исти губитак масе код легура HCCI-15 и HCCI-25, док су нешто бољу ерозиону отпорност показале термички обрађене легуре из ове категорије. Узорак HCCI-PTA је показао најбољу ерозиону отпорност при овом испитивању, док су се узорци од комерцијално применљивих материјала (базалт и керамика) показали као најлошији.

Након ерозионог испитивања, у подпоглављу Механизми ерозије, извршена је микроструктурна карактеризација и поређење еродираних узорака HCCI-15 и HCCI-15-НТ, еродираних узорака HCCI-25 и HCCI-25-НТ, као и анализа еродираног узорка HCCI-PTA, са циљем повезивања карактеризације материјала и уочених ерозионих механизма у таквим структурама. За све три групе легура идентификовани су механизми који доводе до ерозије у екстремним условима испитивања, што је и верификовано кроз публикување резултата у индексираном часопису.

У следећем подпоглављу обрађено је испитивање *in-situ* цевног лука израђеног од изабране легуре HCCI-15-НТ. Избор легуре HCCI-15-НТ је извршен на основу више критеријума произашлих из научних сазнања ове докторске дисертације, до којих се дошло током испитивања узорака у лабораторијским условима, од којих је најзначајнији тај да се код ове легуре издвајају M_7C_3 карбиди, састава $(Cr_4Fe_3)C_3$ који имају најбоље механичке особине и повећану жилавости лома због највећег удела металне везе у њиховом саставу. Након проведених $\sim 16000h$ рада без застоја, цевни лук је демонтиран и испитан према Програму испитивања. Оштећења цевног лука су верификовала резултате испитивања у лабораторијским условима и показала да је изабрана легура одличан заменски материјал за до сада коришћене комерцијалне антихабајуће материјале. Узорак цевног лука је по радном веку надмашио све до сада комерцијално коришћене материјале, односно испитивањем *in-situ* доказано је да је значајно продужен радни век делова изложених интензивном хабању.

Закључак

Закључак садржи завршна разматрања, на основу Резултата испитивања и дискусије, а у складу са дефинисаним циљевима истраживања и постављеним хипотезама ове дисертације. Научни и стручни доприноси дисертације су приказани у оквиру овог поглавља, са предлозима и смерницама будућих истраживања у овој области.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Докторска дисертација под називом **Материјали повећане ерозионе отпорности изложени екстремним условима рада на термоенергетским постројењима** кандидата **Братислава М. Рајичића** представља савремен и оригинални научни допринос у истраживању ерозионо отпорних легура, са циљем продужетка радног века машинског дела изложеног екстремним условима хабања на термоенергетским постројењима. Оригиналност дисертације се односи на израду нових легура из групе белих ливених гвожђа легираних хромом, модификацијом постојећих у погледу хемијског састава легуре и режима термичке обраде, како би се добила боља отпорност на ерозију за адекватну примену на индустријским постројењима.

У докторској дисертацији је приказано да се овакве легуре успешно могу производити у ливницама у Србији, а такође је показано да се машински делови израђени од оваквих материјала могу са успехом уградити у комплексна индустријска постројења и да као таква представљају одличан заменски антихабајући материјал, чиме се продужује радни век компоненти израђених од до сада коришћених комерцијалних материјала.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Прегледом навода цитиране литературе, кандидат **Братислав М. Рајичић** је при изради ове дисертације користио актуелне и референтне публиковане изворе. Истраживања у овој дисертацији су усклађена са светским истраживањима новијег датума, док су коришћене методе карактеризације материјала и симулирање интензивних услова рада у складу са стандардима из одговарајућих области. У оквиру поглавља Литература ове дисертације, наведено је 180 литературних навода у које спадају књиге, научно-стручни часописи, зборници међународних конференција, регистровани национални патенти, пројекти Министарства науке, технолошког развоја и иновација, као и други релевантни извори из области науке о материјалима. Осим литературе која је фундаментална и пионирска у овој области, највећи део литературних навода је новијег датума, анализиран је у Теоријском делу и представља основу експерименталних истраживања у овој дисертацији.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

У оквиру ове докторске дисертације, примењене су економски исплативе и једноставне методе добијања легура ливењем у домаћим ливницама, као и добијање легуре наношењем превлаке на основу материјала поступком плазма наваривања. У циљу испитивања ерозионе отпорности материјала, конструисана је инсталација за спровођење ерозионих испитивања у складу са стандардом ASTM G76. У корист овог

испитивања конструисани су и уписани у Регистар малих патената, Завода за интелектуалну својину Републике Србије „Уређај за ерозионо испитивање материјала чврстим честицама“ (рег.бр. 1681) и „Алат за осигурање положаја дискова при одређивању средње брзине честица еродента ношених струјом ваздуха“ (рег.бр. 1745). У оквиру карактеризације испитиваних материјала у овој дисертацији су коришћене савремене методе енергодисперзионе спектроскопије, рендгенске дифрактометрије и оптичке и скенирајуће електронске микроскопије.

3.4. Применљивост остварених резултата

Применљивост остварених резултата експерименталног дела дисертације кандидата **Братислава М. Рајичића** је проверена и потврђена испитивањем *in-situ* цевног лука израђеног од једне од лабораторијски испитаних модификованих легура. Током истраживања у овој дисертацији и испитивања на лицу места, цевни лук DN250 од изабране НССИ легуре је изливен у домаћој ливници и уграђен у цевовод система за пнеуматски транспорт пепела једног домаћег термоенергетског постројења снаге 650MW, где је провео ~16000h без застоја и отказа у раду, са довољно ресурса у дебљини зида за даљи несметани рад. Такође, поред термоенергетских постројења, применљивост ових НССИ легура повећане отпорности на хабање могућа је и у рударској, грађевинској и прехранбеној индустрији, каменоломима, цементарама и сл. С обзиром да је ова легура еколошки прихватљива, да може да се рециклира и да има релативно ниску цену, наспрам других комерцијално заступљених антихабајућих материјала, њена применљивост у индустријским системима је тиме још конкурентнија.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Вишегодишњи научноистраживачки рад **Братислава М. Рајичића**, који је посебно дошао до изражаја током израде ове дисертације, показује да је кандидат способан да сагледа проблеме актуелних истраживања и да самостално и креативно приступи њиховом решавању. Кандидат је своју способност за самостални научни рад, и изражену склоност за тимским радом, потврдио на основу верификованих истраживачких резултата који су публиковани у часописима од међународног значаја, радовима саопштеним на међународним конференцијама, регистрованим националним патентима, пројектима Министарства науке, технолошког развоја и иновација, као и другим релевантним изворима из области науке о материјалима.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Научни доприноси истраживања кандидата **Братислава М. Рајичића** у докторској дисертацији под називом **Материјали повећане ерозионе отпорности изложени екстремним условима рада на термоенергетским постројењима** су садржани у унапређењу знања из области науке о материјалима.

Продужетак радног века критичних елемената индустријских система је могућ кроз избор и уградњу правилно пројектованог заменског антихабајућег материјала добијеног ливењем, при чему се из ове дисертације као посебни научни доприноси издвајају следећи:

- Модификацијом постојећих легура из групе белих ливених гвожђа легираних са $\sim 15\%Cr$ и $\sim 25\%Cr$, у погледу ограничења садржаја легирајућих елемената (Ni, Cu, Mn, Mo, Si, W+V, C) и уз специфичну термичку обраду жарења са спорим хлађењем у пећи ($20^\circ C/h$), могуће је добити дуктилну претежно аустенитну структуру, са малим садржајем мартензита, и са чврсто везаним примарним и секундарним карбидима M_7C_3 . Тако добијена структура, иако има нижу тврдоћу после термичке обраде, је ерозионо отпорнија у односу на исте легуре које нису термички обрађене. Лабораторијска испитивања ерозионе отпорности у условима великих брзина честица (90 m/s) и при повећаним масеним протоком ерозионих честица (3000 g/min), за која постоји врло мали број података у светској литератури, омогућила су да се добију подаци о ерозионој отпорности различитих антихабајућих материјала у екстремним условима ерозије. За ове услове ерозионог испитивања, идентификовани механизми ерозије су моделирани за пет HCCI легура (легуре се $\sim 15\%Cr$ и $\sim 25\%Cr$, са и без термичке обраде, и превлака типа Fe-Cr-C).

- Добијени резултати су публиковани у часопису Transactions of the Indian Institute of Metals под називом „Erosion Wear Behavior of High Chromium Cast Irons“, док су у докторској дисертацији приказани у поглављу 3 (страна 46) и поглављу 4 (странице 51, 59, 60, 62, 66-68), као и у поглављу 4 (странице 67-69, 71-74).

- Посредни научни допринос ове дисертације је приказан у поглављу 4 (странице 52-55, 75 и 79) и дефинише утицај састава M_7C_3 карбида на ерозиону отпорност HCCI легура. Најновија светска истраживања показују да су у HCCI легурама, за однос $Cr/C \approx 6-7$, присутни карбиди типа $(Cr_4Fe_3)C_3$ који су жилавији и са највећим уделом металне везе која им омогућује пластичну деформацију и бољу ерозиону отпорност, што је у овој дисертацији показано за легуру HCCI-15-НТ која је изабрана за израду цевног лука и испитивање *in-situ*.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

На основу прегледа релевантне научне литературе, доступних сазнања, искуства и потребе индустријских система за поузданошћу и сигурношћу у раду, може да се констатује да су резултати истраживања у оквиру ове дисертације научно утемељени и значајни. С обзиром на све чешће захтеве за употребом еколошки прихватљивих материјала за индустријску примену, анализирани HCCI легуре представљају идеалан пример таквих материјала, уз констатацију да се могу 100% рециклирати, што их уз економски прихватљиву цену чини још више конкурентним материјалима.

Са друге стране, у периоду свакодневне енергетске нестабилности на светском нивоу, сваки произведени мегават-час електричне енергије предстаља губитак и утиче на пад поузданости енергетског система једне земље. Велика предност испитиваних HCCI легура је то што је технологија њихове производње освојена у домаћим ливницама, па самим тим имају могућност брзе и ефикасне примене као заменског материјала на постојећим системима за отпепељавање ТЕ постројења али и на другим индустријским системима изложеним интензивном хабању.

4.3. Верификација научних доприноса

Верификација научних доприноса кандидата **Братислава М. Рајичића**, који су проистекли из истраживања током докторских студија и израде дисертације, публиковани су у истакнутом међународном часопису, саопштењима са међународног скупа и националном часопису:

Рад у истакнутом међународном часопису (M22)

1. **Rajicic B.**, Maslarevic A., Bakic G., Maksimovic V., Djukic M., Erosion Wear Behavior of High Chromium Cast Irons, Transactions of the Indian Institute of Metals, Vol. 76, pp. 1427-1437, DOI: 10.1007/s12666-022-02860-7, 2023 (**IF=1,6**) (ISSN: 0975-1645)

Саопштење са међународног скупа штампано у целини (M33)

2. **B. Rajicic**, G. Bakic, M. Djukic, V. Sijacki Zeravcic, M. Braunovic, B. Andjelic, Overview of advanced methods of boiler tubes erosion protection, Proc. of Int.Conf. Power Plants 2012, pp. 514-523, 2012 (ISBN: 978-86-7877-021-0)
3. G. Bakic, V. Maksimovic, A. Maslarevic, M. Djukic, **B. Rajicic**, A. Djordjevic, Microstructural characterization of WC and CrC based coatings applied by different processes. Proc.of MME SEE, 2015, Metallurgical & Materials engineering congress of South-East Europe, Belgrade, pp. 195-201, 2015 (ISSN: 978-86-87183-27-8)

Рад у националном часопису (M53)

4. V. Sijacki Zeravcic, G. Bakic, M. Djukic, **B. Rajicic**, B. Andjelic, Prediction and prevention of boiler tubing systems erosion in thermal plant, Tehn.dijagn., Vol. 9, No. 2, pp. 3-9, 2010 (ISSN 1451-1975)

Такође, истраживања из ове докторске дисертације су подпомогла објављивање два регистрована патента на националном нивоу:

- Maslarević, G. Bakić, M. Đukić, **B. Rajičić**, N. Mitrović, Uređaj za eroziono ispitivanje materijala čvrstim česticama, Patent, reg.br. 1681, rešenje 2020/17627 od 08.10.2020, br.prijave MP-2020/0059, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 2020
- A. Maslarević, G. Bakić, **B. Rajičić**, N. Milošević, I. Martić, Alat za osiguranje položaja diskova pri određivanju srednje brzine čestica erodenta nošenih strujom vazduha, Patent, reg.br. 1745, rešenje 2022/1210 od 09.02.2022, br.prijave MP-2021/0112, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 2021

а своје место су нашла и у оригиналном стручном остварењу, тј. резултатима националних научних пројеката:

- Razvoj i primena novog antihabajućeg materijala MM antiabraziv za cevovode termoenergetskih postrojenja, (2013-2014) Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, Oblast Inovaciona delatnost, ID-Ev.br.451-03-2802/2013-16/138, Nosilac realizacije: BSK doo Obrenovac; Rukovodilac projekta prof. dr V. Šijački Žeravčić, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet (učesnik **B. Rajičić**)
- Primena savremenih tehnologija u cilju sprečavanja erozije kotlovskih cevi, (2008-2011) Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, Program Tehnološkog razvoja, oblasti Energetske efikasnosti; Ev.br. EE-18005; Rukovodilac: prof. dr V. Šijački Žeravčić (učesnik **B. Rajičić**)

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу прегледа и детаљне анализе докторске дисертације под називом **Материјали повећане ерозионе отпорности изложени екстремним условима рада на термоенергетским постројењима** кандидата **Братислава М. Рајичића**, маг. инж. маш., студента докторских студија, Комисија за преглед, оцену и одбрану констатује:

- да урађена докторска дисертација представља оригинални научни рад са научним доприносом у области Техничких наука – Машинско инжењерство, ужа научна област Технологија материјала – Машински материјали, заваривање и сродни поступци;
- да је написана у складу са свим стандардима за научно-истраживачке радове и
- да испуњава све услове предвиђене Законом о високом образовању, стандардима и Статутом Машинског факултета Универзитета у Београду

У докторској дисертацији је приказана могућност продужетка радног века критичних елемената индустријских система изложених екстремној ерозији, кроз избор правилно пројектованог заменског антихабајућег материјала добијеног ливењем. Наведени резултати представљају значајна достигнућа и допринос у области науке о материјалима. Резултати експерименталног истраживања су верификовани у публикованим научним радовима који су на SCI листи, као и у другим објављеним радовима на међунородним конференцијама.

На основу свега наведеног, Комисија предлаже Наставно-научном већу Универзитета у Београду – Машинског факултета да се докторска дисертација под називом **Материјали повећане ерозионе отпорности изложени екстремним условима рада на термоенергетским постројењима** кандидата **Братислава М. Рајичића**, маг. инж. маш., студента докторских студија, прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

Београд, 04.10.2023.год.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

Проф. др Гордана Бакић, редовни професор
Универзитет у Београду – Машински факултет

Проф. др Милош Ђукић, редовни професор
Универзитет у Београду – Машински факултет

Проф. др Александар Венцл, редовни професор
Универзитет у Београду – Машински факултет

Др Александар Масларевић, научни сарадник
Универзитет у Београду – Машински факултет

Др Весна Максимовић, научни саветник
Универзитет у Београду, Институт за нуклеарне науке „Винча“

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ
Бр. 1424/2
Датум: 28.09.2023. године
БЕОГРАД, Ул. краљице Марије бр. 16

На основу обавештења др Гордана Бакић, ред. проф., ментора и др Милоша Ђукића, ред. проф., ментора да је студент Братислав Рајичић, маг. инж. маш., завршио докторску дисертацију „Материјали повећане ерозионе отпорности изложени екстремним условима рада на термоенергетским постројењима“, предлога Колегијума наставника Катедре за технологију материјала, а сагласно члану 40. Закона о високом образовању („Службени гласник РС“, број 76/2005, 100/2007 – аутентично тумачење, 97/2008, 93/2012, 89/2013 и 76/2023) и члану 42 Правилника о докторским студијама Машинског факултета, Наставно – научно веће Машинског факултета на седници одржаној дана 28.09.2023. године, донело је следећу

ОДЛУКУ

- др Гордана Бакић, ред. проф., ментор
- др Милош Ђукић, ред. проф., ментор
- др Александар Венцл, ред. проф.
- др Александар Масларевић, научни сарадник, Универзитет у Београду – Машински факултет
- др Весна Максимовић, научни саветник, ИНН Винча Београд

именују се за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације „МАТЕРИЈАЛИ ПОВЕЋАНЕ ЕРОЗИОНЕ ОТПОРНОСТИ ИЗЛОЖЕНИ ЕКСТРЕМНИМ УСЛОВИМА РАДА НА ТЕРМОЕНЕРГЕТСКИМ ПОСТРОЈЕЊИМА“ студента БРАТИСЛАВА РАЈИЧИЋА, маг. инж. маш.

Одлуку доставити: члановима Комисије, студенту и архиви Факултета.



ДЕКАН 
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

проф. др Владимир Поповић