

# UNIVERZITET U BEOGRADU

## Tehnološko-metalurški fakultet

### NASTAVNO-NAUČNOM VEĆU

**Predmet:** Referat o urađenoj doktorskoj disertaciji kandidata **Marka D. Pavlovića**, master inženjera metalurgije

Odlukom broj 35/328 od 31.10.2019. godine, imenovani smo za članove Komisije za pregled, ocenu i odbranu doktorske disertacije kandidata **Marka D. Pavlovića**, master inženjera metalurgije pod naslovom: "**Nastajanje i razvoj oštećenja vatrostralnih materijala na bazi bazalta pod dejstvom kavitacije**".

Posle pregleda dostavljene Disertacije i drugih pratećih materijala i razgovora sa Kandidatom Komisija je sačinila sledeći

### REFERAT

#### 1.UVOD

##### 1.1. Hronologija odobravanja i izrade disertacije

- Kandidat Marko D. Pavlović, master inženjer metalurgije upisao je doktorske studije 1.10.2013. na Tehnološko-metalurškom fakultetu, Univerziteta u Beogradu. Sve ispite je položio sa prosečnom ocenom 8,92. Završni ispit pod naslovom: "Sinteza i karakterizacija vatrostralnih punioca za izradu livačkih premaza", odbranjen je 30.09.2015. godine sa ocenom 10.

- 22.11.2018. godine kandidat Marko D. Pavlović, master inženjer metalurgije prijavio je temu doktorske disertacije pod nazivom: "Nastajanje i razvoj oštećenja vatrostralnih materijala na bazi bazalta pod dejstvom kavitacije".

- Nastavno-naučno veće Tehnološko-metalurškog fakulteta, Univerziteta u Beogradu je dana 06.12.2018. Odlukom br. 35/472 imenovalo Komisiju za ocenu podobnosti teme i kandidata Marka D. Pavlovića, master inženjera metalurgije pod nazivom: "Nastajanje i razvoj oštećenja vatrostralnih materijala na bazi bazalta pod dejstvom kavitacije".

- 31.01.2019. na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta, Univerziteta u Beogradu na osnovu izveštaja komisije doneta je Odluka br. 35/30 o prihvatanju Referata Komisije za ocenu podobnosti teme i kandidata za izradu doktorske disertacije Marka D. Pavlovića, master inženjera metalurgije pod nazivom: "Nastajanje i razvoj oštećenja vatrostralnih materijala na bazi bazalta pod dejstvom kavitacije". Za mentora ove disertacije imenovana je dr Marina Dojčinović, vanredni profesor Tehnološko-metalurškog fakulteta, Univerziteta u Beogradu.

- 25.02.2019. održana je Sednica Veća naučnih oblasti tehničkih nauka i doneta je Odluka Univerziteta, 02 broj: 61206-773/2-19, o saglasnosti na predlog teme doktorske disertacije Marka D. Pavlovića, master inženjera metalurgije, pod nazivom: "Nastajanje i razvoj oštećenja vatrostralnih materijala na bazi bazalta pod dejstvom kavitacije".

- 31.10.2019. na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta, Univerziteta u Beogradu doneta je odluka broj 35/328 o imenovanju članova komisije za pregled, ocenu i odbranu doktorske disertacije Marka D. Pavlovića, master inženjera metalurgije, pod nazivom: "Nastajanje i razvoj oštećenja vatrootalnih materijala na bazi bazalta pod dejstvom kavitacije", u sastavu dr Marina Dojčinović, vanredni profesor Tehnološko-metalurškog fakulteta, Univerziteta u Beogradu, dr Nenad Radović, redovni profesor Tehnološko-metalurškog fakulteta, Univerziteta u Beogradu, dr Ljubiša Andrić, naučni savetnik, Instituta za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina, Beograd, dr Radica Prokić-Cvetković, redovni profesor Mašinskog fakulteta, Univerziteta u Beogradu, dr Srećko Manasijević, viši naučni saradnik, LOLA Institut, d.o.o, Beograd.

## **1.2. Naučna oblast disertacije**

Istraživanja u okviru ove doktorske disertacije pripadaju naučnoj oblasti Metalurško inženjerstvo, za koju je matičan Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu. Mentor je dr Marina Dojčinović, vanredni profesor Tehnološko-metalurškog fakulteta, Univerziteta u Beogradu, koja je na osnovu dosadašnjih objavljenih publikacija i iskustva, kompetentna da rukovodi izradom ove disertacije.

## **1.3. Biografski podaci o kandidatu**

Marko D. Pavlović je rođen 1986. godine u Beogradu gde je nakon završene osnovne škole i srednje elektrotehničke škole "Nikola Tesla" upisao Tehnološko-metalurški fakultet, Univerziteta u Beogradu, školske 2005/2006. godine. Diplomirao je na Odseku inženjerstvo materijala 2013. sa opštim uspehom 7,34 u toku studija i ocenom 10 na diplomskom ispitu i time stekao zvanje diplomirani inženjer tehnologije. Na istom fakultetu školske 2017/2018. završio je Master akademske studije, odsek Metalurško inženjerstvo, sa prosečnom ocenom 9,25 i time stekao akademski naziv Master inženjer metalurgije. Doktorske akademske studije, studijski program Metalurško inženjerstvo upisao je na istom fakultetu školske 2013/2014. Položio je sve ispite predviđene programom studiranja sa prosečnom ocenom 8,92. i odbranio završni ispit sa ocenom 10. Tokom studiranja volontirao je u Livnici NHBG, Beograd i Preduzeću za informatički inženjering "Orbis", Beograd. Bio je uključen 2017. kao volonter na Projektu TR34026 pod nazivom: "Geopolimeri- razvoj tehnologije za konverziju otpada u funkcionalne materijale" u Institutu za multidisciplinarna istraživanja, Univerziteta u Beogradu. Kao inženjer prodaje radio je 2018. u firmi Golden Lab&Eng-Zemun gde je završio obuku i radio na uređajima za spektralnu analizu. Sada radi kao inženjer kontrole kvaliteta u firmi Kontrol inspekt-Beograd. Autor je 9 radova u časopisima međunarodnog značaja, 3 rada u nacionalnom časopisu međunarodnog značaja verifikovanom posebnom odlukom matičnog odbora, 3 rada u časopisu nacionalnog značaja i većeg broja radova na domaćim i međunarodnim skupovima. Govori, čita, piše engleski jezik.

## **2. OPIS DISERTACIJE**

### **2.1.Sadržaj disertacije**

Doktorska disertacija kandidata Marka D. Pavlovića, master inženjera metalurgije, napisana je na 146 strana, uključuje 29 tabela, 95 slika, kao i 261 literaturni navod. Disertacija sadrži sledeća poglavlja: Uvod, Teorijski deo, Eksperimentalni deo, Rezultate i diskusiju, Zaključak i Literaturu. Na početku disertacije dat je Rezime (na srpskom i engleskom jeziku). Na kraju

disertacije data je biografija kandidata, kao i potpisane izjave o autorstvu, istovetnosti elektronske i štampane verzije doktorskog rada i izjava o korišćenju disertacije.

## **2.2. Kratak prikaz pojedinačnih poglavlja**

U ovoj doktorskoj disertaciji ispitivana je potencijalna primena novih vatrostralnih materijala na bazi bazalta za izradu konstrukcionih delova opreme u metalurgiji i rudarstvu, vatrostralnih premaza za primenu u procesima livenja i vatrostralnih premaza za zaštitu metalnih i nemetalnih konstrukcija u uslovima dejstva povišenih temperatura, habanja i kavitacionih opterećenja. Eksperimentalno je određivana otpornost ovih vatrostralnih uzoraka na dejstvo kavitacije, proučeno je nastajanje i razvoj oštećenja površine uzoraka pod dejstvom kavitacije i procenjena je mogućnost njihove primene u rigoroznim uslovima eksploatacije u metalurgiji i rudarstvu. Takođe, ispitivana je mogućnost primene praha bazalta kao ojačivača kompozita sa polimernom osnovom.

U prvom poglavlju disertacije, *Uvod*, prikazan je predmet, sadržaj i cilj doktorske disertacije. Ukazano je na problematiku otpornosti i veka trajanja vatrostralnih materijala koji se koriste u metalurškim procesima ili su ugrađeni u opremu različitih metalurških postrojenja izloženih visokim temperaturama, habanju, koroziji i kavitaciji. Definisana je važnost poznavanja fenomena kavitacije, analiziran je odnos kavitacija / oštećenje materijala i ponašanje vatrostralnih materijala pod dejstvom kavitacije. Objasnjeni su najznačajniji aspekti uticaja strukture i svojstava različitih vatrostralnih materijala na bazi bazalta na svojstva otpornosti na dejstvo kavitacije. Predstavljene su osnovne karakteristike oblikovanih vatrostralnih uzoraka na bazi bazalta (rovni, liveni i sinterovani uzorci), neoblikovanih vatrostralnih uzoraka (vodeni Lost foam vatrostralni premazi i zaštitni vatrostralni premazi na bazi organskih rastvarača), kao i kompozita sa polimernom osnovom i ojačivačem na bazi bazalta. Ukazano je na mogućnost primene ultrazvučne vibracione metode sa stacionarnim uzorkom za brzo određivanje ponašanja materijala pod dejstvom kavitacije. Naveden je plan istraživanja i osnovni ciljevi ove doktorske disertacije.

Drugo poglavlje disertacije, *Teorijski deo* sadrži tri potpoglavlja. U prvom potpoglavlju opisani su teorijski principi procesa kavitacije, sa prikazom mehanizama nastajanja kavitacionog mehura (procesom heterogene i/ili homogene nukleacije), kolapsa kavitacionog mehura i mehanizama oštećenja materijala dejstvom udarnih talasa, mikro-mlaza i kavitacionih vrtloga. Opisano je ponašanje različitih vrsta metalnih i nemetalnih materijala pod dejstvom kavitacije, uticaj njihove strukture i svojstava na otpornost i postojanost u uslovima kavitacionih opterećenja, sa posebnim osvrtom na svojstva otpornosti vatrostralnih materijala. Prikazana je kavitacija u industrijskim uslovima i mere za smanjenje rizika od oštećenja. Opisane su laboratorijske metode za ispitivanje svojstava otpornosti materijala pod dejstvom kavitacije. S obzirom na to da je cilj disertacije dobijanje novih vatrostralnih materijala na bazi bazalta poboljšanih svojstava za primenu u rigoroznim uslovima eksploatacije, u drugom potpoglavlju opisani su najčešće primenjivani vatrostralni materijali u metalurgiji (mulit, kordijerit, cirkonijum-silikat, hromit, talk), procesi njihove sinteze, karakterizacije i primene. Posebna pažnja posvećena je vatrostralnim materijalima na bazi bazalta, koji se do sada nisu koristili u metalurgiji, a predmet su ispitivanja u doktorskoj disertaciji. Drugim potpoglavljem obuhvaćeni su i vatrostralni premazi na bazi bazalta za primenu u livnicama, kao i vatrostralni premazi za zaštitu i povećanje otpornosti na dejstvo kavitacije metalnih i nemetalnih konstrukcija. Premazi na bazi bazalta predstavljaju novinu i do sada se nisu koristili u metalurgiji. Trećim potpoglavljem obuhvaćeni su kompoziti polimerna osnova /keramički ojačivač, njihova sinteza, struktura, svojstva i primena.

Treće poglavlje disertacije, *Eksperimentalni deo*, sadrži tri potpoglavlja. U prvom potpoglavlju definisana je metodologija eksperimentalnog rada za određivanje otpornosti vatrostalnih uzoraka pod dejstvom kavitacije. Definisani su karakteristični parametri ultrazvučne vibracione metode sa stacionarnim uzorkom pod kojima su ispitivani uzorci svih serija. To je omogućilo da se dobijeni rezultati ispitivanja međusobno porede i da se izvrši selekcija materijala u odnosu na izračunate vrednosti kavitacionih brzina. Kavitacione brzine predstavljaju pokazatelj otpornosti materijala u uslovima kavitacionih opterećenja. Nastajanje i razvoj oštećenja površine tokom ispitivanja na dejstvo kavitacije praćeni su primenom skenirajućeg elektronskog mikroskopa. Posebna pažnja posvećena je proučavanju mehanizama oštećenja površine uzoraka primenom softverske analize slike. Na osnovu vrednosti kavitacione brzine i analize morfologije oštećenja površine određena je kavitaciona otpornost ispitivanih uzoraka na bazi bazalta. Sve primenjene eksperimentalne metode karakterizacije vatrostalnih uzoraka na bazi bazalta opisane su u drugom potpoglavlju i to: ultrazvučna vibraciona metoda (sa stacionarnim uzorkom) za određivanje otpornosti na dejstvo kavitacije, rendgenska difrakciona analiza, SEM mikroskopija, kvalitativna mineraloška analiza uzoraka, ispitivanje vatrostalnih premaza (određivanje gustine premaza, sedimentacione stabilnosti vatrostalnih suspenzija premaza, određivanje dubine penetracije premaza u zid kalupa). Treće potpoglavlje obuhvata sintezu i karakterizaciju vatrostalnih materijala primenjenih u disertaciji za ispitivanje otpornosti na dejstvo kavitacije i primenu u praksi. Detaljno su opisani polazni materijali, jeftine i lako dostupne nemetalne mineralne sirovine sa kojima Srbija raspolaže (pre svega olivin-piroksenski bazalt iz ležišta "Vrelo"–Kopaonik), postupci njihove pripreme procesima prečišćavanja, mlevenja, mehaničke aktivacije, zatim sinteza oblikovanih uzoraka procesima sinterovanja i procesima topljenja, livenja i termičkog tretmana, sa opisom opreme za procesiranje. Posebna pažnja posvećena je izradi vatrostalnih punioca na bazi bazalta procesima mlevenja i mehaničke aktivacije i dobijanja punioca određene veličine i oblika zrna. To je omogućilo sintezu vatrostalnih premaza visokih reoloških svojstava za primenu u livarstvu i premaza za zaštitu i povećanje otpornosti na dejstvo kavitacije metalnih i nemetalnih konstrukcija. Takođe, opisani su i postupci sinteze kompozita polimerna osnova/ bazaltni prah.

U četvrtom poglavlju disertacije, *Rezultati i diskusija*, sadržano je šest potpoglavlja. Prvim potpoglavljem dati su rezultati eksperimentalnih ispitivanja svojstava otpornosti na dejstvo kavitacije uzoraka rovnog bazalta. Prisutni minerali u uzorku rovnog bazalta (uzorci isećeni iz bazaltnih stena) su pirokseni, plagioklasi i olivini. U strukturi su prisutni sitni mehuri ispunjeni staklom ili vazduhom koji izazivaju hrapavost površine uzoraka i pojavu jamica. Na samom početku izlaganja dejstvu kavitacije javlja se gubitak mase, a na kraju ispitivanja, za 120 min ekspozicije, gubitak mase iznosi 88,5 mg; oštećenje površine je 35%; kavitaciona brzina je 0,74 mg/min. Praćenjem promena morfologije površine uzoraka primenom skenirajućeg elektronskog mikroskopa pokazalo se da je dominantan mehanizam oštećenja uzoraka rovnog bazalta veći gubitak mase sa površine bez deformacije ili promene strukture. Pokazalo se da su prisutni kristali olivina i piroksena u strukturi rovnog bazalta različito erodirali. Povećan nivo oštećenja površine i izmereni gubitak mase pokazuju da uzorci rovnog bazalta imaju malu otpornost na dejstvo kavitacije. U drugom potpoglavlju prikazani su rezultati eksperimentalnih ispitivanja svojstava otpornosti na dejstvo kavitacije uzoraka livenog bazalta dobijenih procesima topljenja bazaltnog agregata na 1250°C, livenja u peščane kalupe i termičkog tretmana po režimu: zagrevanje 850°C/2h sa postepenim hlađenjem u peći do sobne temperature u cilju smanjenja unutrašnjih naprezanja. Struktura uzoraka bila je nehomogena, pojedini kristali u staklastoj osnovi su termički izmenjeni i prisutan je manji broj mehura ispunjenih vazduhom ili staklom.

Ispitivanja pod dejstvom kavitacije pokazala su mali gubitak mase ovih uzoraka, za 120 min izlaganja gubitak mase je 3,53mg, kavitaciona brzina je mala 0,03 mg/min, oštećenje površine 12%. Jamice formirane na površini uzorka veoma malo su menjale oblik i dimenzije tokom ekspozicije. Dominantan mehanizam oštećenja je postepeni gubitak mase uzoraka sa površine jamica bez deformacije i promene strukture uzoraka. Zapažena je pojava jamica na površini gasnih mehura, koje se postepeno menjaju tokom ekspozicije. Dobijeni rezultati ispitivanja pokazali su da uzorci livenog bazalta imaju visoka svojstva otpornosti na dejstvo kavitacije i da se mogu primeniti u uslovima visokih kavitacionih opterećenja. U trećem potpoglavlju prikazani su rezultati ispitivanja otpornosti na dejstvo kavitacije uzoraka bazalta sinterovanih na 1150 °C, koji su pokazali visoka svojstva otpornosti na kavitaciona opterećenja. U ranoj fazi procesa kavitacije bilo je teško da se otkriju jamice na površini uzoraka. Tek posle dužeg vremena dejstva kavitacije pojedinačne male jamice su se javljale i taj broj se povećavao proporcionalno sa vremenom izlaganja. Proces gubitka mase uzoraka odvijao se malom brzinom, na kraju ispitivanja, za 120 min, gubitak mase bio je 2,26 mg, kavitaciona brzina 0,02 mg/min, nivo oštećenja površine 15%. Dominantan mehanizam oštećenja sinterovanih uzoraka bio je lagano povećanje gubitka mase uzoraka sa površine jamica bez deformacije i promene strukture uzoraka. U četvrtom potpoglavlju prikazani su rezultati poređenja svojstava otpornosti uzoraka rovnog, livenog i sinterovanog bazalta. Poređenje je obavljeno na osnovu vrednosti kavitacione brzine i analize morfologije oštećenja površine uzoraka. Praćeni su i mereni podaci o gubitku mase uzoraka, nastajanju i razvoju oštećenja površine uzoraka tokom ekspozicije, pojava jamica, njihov rast i/ili spajanje, povećanje hrapavosti površine. Pri tome istraživanja su vođena pri istim geometrijskim karakteristikama uzoraka; istom načinu pripreme površine uzoraka, kao i istim uslovima ispitivanja primenom ultrazvučne vibracione metode sa stacionarnim uzorkom. Istraživanjima je pokazano da dužina perioda inkubacije, perioda u kome nema gubitka mase, kao i maksimalni stepen oštećenja i gubitka mase uzoraka, prvenstveno zavise od ispitivanog materijala, njegove strukture i svojstava, a takođe, zavise i od uslova ispitivanja i prvobitnog stanja površina ispitivanih uzoraka. Pregledom površine uzoraka pre izlaganja dejstvu kavitacije, primećena su različita oštećenja na ograničenim oblastima, najčešće oko postojećih mehura u strukturi. Kod uzoraka rovnog bazalta konstatovana su veća oštećenja, sa većim brojem jamica, koje utiču na oštećenja površine i smanjuju otpornost rovnog bazalta na dejstvo kavitacije, dok su kod uzoraka livenog i sinterovanog bazalta konstatovana mala oštećenja površine u blizini postojećih mehura. Redosled poređenja ispitivanih uzoraka prema kavitacionoj brzini je: 0,02 mg/min uzorci sinterovanog bazalta; 0,03 mg/min uzorci livenog bazalta; 0,74 mg/min uzorci rovnog bazalta. Eksperimentalnim istraživanjima je pokazano da sinterovani i liveni uzorci na bazi bazalta imaju visoka svojstva otpornosti na dejstvo kavitacije i da mogu da se u praksi primene u uslovima gde se očekuju visoka kavitaciona opterećenja. U petom potpoglavlju prezentirani su rezultati ispitivanja dve vrste vatrostalnih premaza na bazi bazalta: Lost foam vatrostalni premazi za primenu u livarstvu (sa vezivom na bazi karboksimetilceluloze i bentonita, organskim aditivima za održanje suspenzije i vodom kao rastvaračem) i vatrostalni premazi za zaštitu metalnih i nemetalnih površina (sa vezivom na bazi epoksi smole, organskim rastvaračem i aditivima). Premaz na bazi bazalta predstavlja novinu i do sada se nije koristio u livarstvu. Primenjena priprema vatrostalnih punioca na bazi bazalta procesima mlevenja i mehaničke aktivacije na veličinu prečnika zrna ispod 20 µm, primenjeni sastavi suspenzija premaza prema istraženim recepturama, uticali su na sintezu Lost foam vatrostalnih premaza dobrih tehnoloških svojstava, koja su određena prema standardu za ovu vrstu vatrostalnih proizvoda. Dobijeni rezultati ispitivanja vatrostalnih premaza na bazi bazalta upoređivani su sa rezultatima ispitivanja

premaza na bazi mulita, kordijerita, cirkonijum-silikata, talka, koji se već koriste u praksi livinica. Svojstva zaštitnih vatrostalnih premaza na bazi bazalta nanesenih na metalne i polimerne materijale ispitvana su primenom ultrazvučne vibracione metode sa stacionarnim uzorkom. Dobijeni rezultati ispitivanja pokazali su visoku otpornost slojeva premaza na dejstvo kavitacije, sa malim gubicima mase, malim oštećenjima površine premaza i kavitacionim brzinama 0,11 mg/min za premaze nanete na metalne površine i 0,04 mg/min za premaze nanete na polimernu površinu. Utvrđeno je da se mehanizam oštećenja površine premaza odvija stalnim nastajanjem i spajanjem sitnih jamica koje ne oštećuju mnogo površinu premaza tokom ekspozicije. Bitna karakteristika otpornosti i postojanosti premaza su dobra adhezionna svojstva, dobro prijanjanje premaza na nanete površine, a što je postignuto optimalnim sastavom i procesom izrade premaza, odgovarajućom debljinom sloja premaza, pripremom površine podloge pre nanošenja zaštitnih premaza. U šestom potpoglavlju opisani su rezultati istraživanja sinteze i karakterizacije kompozita sa osnovom od nezasićene poliestarske smole i ojačivača na bazi praha bazalta. Dobijena su zadovoljavajuća svojstva otpornosti na dejstvo kavitacije kod ispitivanih kompozita sa dodatkom ojačivača na bazi praha bazalta veličine prečnika zrna 40 µm, u količini ispod 0,45 mg. Na osnovu dobijenih rezultata ukazano je da dalja istraživanja kompozita polimerna osnova/bazalt treba proširiti na primenu epoksi smole za osnovu kompozita i bazaltnog praha manjeg prečnika zrna (ispod 10µm), kao i ojačivača na bazi bazaltnog vlakna.

U petom poglavlju doktorske disertacije, **Zaključci**, dat je pregled najvažnijih rezultata do kojih se došlo tokom rada na disertaciji i njihov doprinos predmetnoj oblasti istraživanja.

U šestom poglavlju, **Literatura**, dat je pregled korišćene literature pri izradi disertacije.

### **3. OCENA DISERTACIJE**

#### **3.1. Savremenost i originalnost**

Poslednjih decenija u svetu je veoma aktuelana problematika razvoja tehnologija prerade nemetaličnih mineralnih sirovina, a naročito bazaltnih stena. Veći deo proizvoda dobijenih tehnološkom preradom bazalta mogu se svrstati u nove materijale, veoma tražene na svetskom tržištu za široku primenu u uslovima u kojima su prisutne visoke temperature, pritisci, habanje, kavitacija, korozija, kao zamena za metalne materijale. Srbija raspolaže znatnim resursima kvalitetnih nemetaličnih sirovina, što stvara mogućnost široke primene bazaltnih stena (rovnog bazalta), kao sirovine za industrijsku preradu i dobijanje različitih vatrostalnih proizvoda. U disertaciji su istraženi procesi sinteze sinterovanih i livenih uzoraka na bazi bazalta povišenih svojstava otpornosti na dejstvo kavitacije, kao i procesi sinteze vatrostalnih premaza. Istraženi su procesi nastajanja i razvoja oštećenja vatrostalnih materijala pod dejstvom kavitacije. Primenjene metode karakterizacije uzoraka na bazi bazalta mogu da se koriste u praksi za ocenu rizika primene vatrostalnih materijala u ekstremnim uslovima eksploatacije i prognoziranje životnog veka različitih komponenti inženjerskih konstrukcija koje su u radu izložene dejstvu kavitacionih opterećenja. Iz svega iznetog proizilazi da je tematika ove disertacije aktuelna, a rezultati mogu, osim naučnog, imati i praktičnu primenu.

Savremenost i originalnost istraživanja prikazanog u ovoj disertaciji potvrđeni su publikovanjem naučnih radova u međunarodnim i domaćim časopisima, kao i brojnim saopštenjima na skupovima međunarodnog značaja.

### **3.2. Osvrt na referentnu i korišćenu literaturu**

U okviru doktorske disertacije citiran je 261 literaturni navod, koji su većinom najnoviji radovi objavljeni u časopisima međunarodnog značaja. Pregled literaturnih podataka omogućio je da se prikaže stanje u ispitivanoj naučnoj oblasti, kao i da se sagleda aktuelnost problematike predmetne doktorske teze. Kandidat je pregledao obimnu literaturu koja je vezana za proučavanje prirode složenih procesa i fenomena kavitacije, korelacije relevantnih procesnih parametara, mikrostrukturnih karakteristika i svojstava materijala i njihove otpornosti na oštećenja pod dejstvom kavitacije. Pregledana je literatura iz oblasti savremenih projekata koji se realizuju u velikom broju svetski poznatih laboratorija za ispitivanje fenomena kavitacije, sagledana su savremna dizajnerska rešenja vezano za materijale, opremu za eksperimentalna istraživanja (hidraulični vodeni tuneli velikih brzina protoka, savremena merna tehnika na bazi lasera, kamere velikih brzina) koja omogućava istovremeno posmatranje kavitacije, promena u strukturi tečnosti i merenje akustične emisije, kao i pregled opreme i tehnika za karakterizaciju oštećenja površine materijala.

Iz popisa literature koja je korišćena u istraživanju, kao i objavljenih radova kandidata može se uočiti da kandidat na adekvatnom nivou poznaje predmetnu oblast istraživanja, kao i aktuelno stanje istraživanja u ovoj oblasti u svetu.

### **3.3. Opis i adekvatnost primenjenih naučnih metoda**

Primenom odgovarajućih eksperimentalnih tehnika i savremenih analitičkih metoda iz literature u originalnom ili modifikovanom obliku, kao i adekvatnom analizom i obradom podataka, izvršen je prikaz rezultata u ovoj doktorskoj disertaciji.

Za identifikaciju faznog sastava i strukture ispitivanih vatrostalnih uzoraka primenjene su metode rendgenske difrakcione analize i metode mikroskopske analize. Mikrostruktura vatrostalnih uzoraka analizirana je primenom optičke i skenirajuće elektronske mikroskopije (SEM). Za analizu vatrostalnih uzoraka vršeno je i snimanje pripremljenih preparata na polarizacionom mikroskopu za propuštenu svetlost primenom imerzione metode (imerzija ksilol). Analizirani su oblik i veličina zrna vatrostalnih punioca za premaze primenom programskog paketa OZARIA 2.5. Merenje veličine i faktora oblika zrna izvršeno je na 3500-4000 zrna. Za eksperimentalno određivanje otpornosti na dejstvo kavitacije vatrostalnih uzoraka na bazi bazalta primenjena je ultrazvučna vibraciona metoda (sa stacionarnim uzorkom) prema standardu ASTM G32. Metoda ispitivanja sa stacionarnim uzorkom se koristi za kavitaciono ispitivanje kada se ispituju tvrdi i kruti materijali na kojima se ne može narezivati navoj. U ovom slučaju, uzorak je fiksiran držačima koji se nalaze na dnu vodenog kupatila. Uzorci na bazi bazalta su tvrdi i kruti, kod njih se ne može lako narezivati navoj i ispitivani su pomoću metode sa stacionarnim uzorkom. Izbor karakterističnih parametara za ovu metodu izvršen je u skladu sa standardom i tokom eksperimenta navedeni parametri su kontrolisani i održavani u zadatom nivou vrednosti. Standard ASTM G32 definiše uslove i proces ispitivanja, pripremanje uzoraka i interpretaciju rezultata. Da bi se ocenila otpornost površine uzorka na dejstvo kavitacije ispitivana je površina uzorka pre i za vreme testiranja. Tokom eksperimenta interval izlaganja uzorka dejstvu kavitacije i vreme testiranja prilagođeno je ponašanju uzoraka u toku eksperimenata. Površine uzoraka snimane su na skenirajućem elektronskom mikroskopu u cilju praćenja i analize morfologije oštećenja površine. Pre i posle svakog intervala testiranja uzorci su sušeni i merena je promena njihove mase tokom izlaganja dejstvu kavitacije u cilju kvantitativne ocene oštećenja uzoraka usled kavitacije. Rezultati oštećenja su prikazani na dijagramu gubitka mase tako što se na ordinatu nanose vrednosti gubitka mase, dok se na apscisu unose vrednosti

za vreme izlaganja materijala dejstvu kavitacije. Za definisanje kavitacione brzine ispitivanih uzoraka korišćeni su dijagrami koji pokazuju pravolinijsku zavisnost između gubitka mase i vremena ispitivanja, a dobijeni su primenom metode najmanjih kvadrata tačaka dijagrama. Gubitak mase za vreme kavitacionog delovanja određen je iz tangensa nagiba prave, što ujedno predstavlja i kavitacionu brzinu na osnovu koje mogu da se porede svojstva otpornosti ispitivanih materijala pod dejstvom kavitacije. Na osnovu vrednosti kavitacionih brzina i analize morfologije oštećenja površine uzoraka na bazi bazalta, urađene primenom skenirajućeg elektronskog mikroskopa i primenom kompjuterske analize slike, određena su svojstva otpornosti svih ispitivanih uzoraka i procenjena je mogućnost njihove primene u sličnim eksploatacionim uslovima. Praćeno je nastajanje i razvoj oštećenja površine uzoraka pod dejstvom kavitacije korišćenjem programa za analizu slike Image Pro Plus, što je omogućilo analizu parametara: nivo degradacije površine uzorka, broj formiranih jamica, prosečna površina formiranih jamica. Takođe, ocena ponašanja ispitivanih vatrostalnih uzoraka na bazi bazalta pod dejstvom kavitacije analizirana je na osnovu korelacije ovih rezultata ispitivanja sa strukturom i svojstvima materijala, pre svega tvrdoćom.

### **3.4. Primenljivost ostvarenih rezultata**

Dobijeni rezultati mogu biti u potpunosti primenljivi u praksi. Predložena sinteza vatrostalnih uzoraka na bazi bazalta procesima sinterovanja i procesima topljenja bazaltnog agregata, livenja u peščane kalupe sa termičkim tretmanom u cilju dobijanja željene strukture i smanjenja unutrašnjih napreznja, pokazale su se efikasnim za dobijanje uzoraka povišenih svojstava otpornosti na dejstvo kavitacije. Osnovni oksidi koji određuju kvalitet rastopa bazalta ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ) prisutni su ispitivanim bazaltnim stenama. Promena režima termičke obrade uzoraka livenog bazalta dovela je do pojave različitih kristalnih faza, različitog udela i sastava staklaste faze, različitih mikrostruktura, pri čemu su dobijeni i uzorci staklo-keramike različitih svojstava. Procenjeno je da uzorci sinterovanog i livenog bazalta sa svojim svojstvima i performansama mogu da zadovolje zahteve industrijske primene i ugradnje u konstruktivne elemente metalurških agregata i mogu biti izloženi eksploatacionim uslovima sa visokim kavitacionim opterećenjem. Velika pogodnost uzoraka na bazi bazalta su i njihova svojstva visoke otpornosti na dejstvo korozije.

Dobijeni vatrostalni premazi na bazi bazalta predstavljaju novinu i do sada se nisu koristili u livarstvu. Primenjena priprema vatrostalnih punioca na bazi bazalta procesima mlevenja i mehaničke aktivacije na veličinu prečnika zrna ispod  $20\ \mu\text{m}$ , primenjeni sastavi suspenzija premaza prema istraženim recepturama, (sa vezivom na bazi karboksimetilceluloze i bentonita, organskim aditivima i vodom kao rastvaračem) uticali su na sintezu premaza dobrih tehnoloških svojstava za primenu u novim procesima livenja. Druga vrsta dobijenih vatrostalnih premaza na bazi bazalta sa vezivom na bazi eposki smole, sa organskim aditivima i organskim rastvaračem pogodna je za zaštitu metalnih i nemetalnih konstrukcija. Bitna karakteristika otpornosti i postojanosti premaza su dobra adheziona svojstva, dobro prianjanje na nanete površine što se postiže optimalnim sastavom premaza, odgovarajućom debljinom sloja premaza, pripremom površine pre nanošenja zaštitnih premaza.

Za dobijanje kompozita polimerna osnova/ojačivač na bazi praha bazalta potrebno je da veličina zrna ojačivača bude prečnika ispod  $20\ \mu\text{m}$  u cilju postizanja homogene raspodele ojačivača i veće otpornosti na dejstvo kavitacije.

Primena laboratorijske ultrazvučne vibracione metode sa stacionarnim uzorkom za ispitivanje otpornosti vatrostralnih materijala na oštećenja pod dejstvom kavitacije, određivanje vrednosti kavitacione brzine, kao i praćenje nastajanja i razvoja oštećenja površine materijala tokom izlaganja dejstvu kavitacije primenom skenirajućeg elektronskog mikroskopa, pokazala se kao jednostavan, brz i ekonomičan metod, koji omogućava upoređenje svojstava otpornosti materijala i izbor materijala za konkretne praktične primene.

### **3.5. Ocena dostignutih sposobnosti kandidata za samostalni naučni rad**

Kandidat Marko D. Pavlović je tokom izrade doktorske disertacije pokazao samostalnost, sistematičnost i stručnost u sagledavanju problema istraživanja, kao i kritičku analizu dobijenih rezultata. Tokom realizacije eksperimenata, obrade rezultata i prezentacije rezultata u objavljenim radovima pokazao je da vlada određenim znanjima vezano za oblast istraživanja i metode naučnog rada. Komisija smatra da kandidat poseduje sve kvalitete koji su neophodni za samostalan naučni rad.

## **4. OSTARENI NAUČNI DOPRINOS**

### **4.1. Prikaz ostvarenih naučnih doprinosa**

Ostvareni naučni doprinosi ove disertacije su:

- Određena kvalitativna i kvantitativna ocena efekata delovanja kavitacije kroz praćenje relevantnih parametara nastajanja i razvoja oštećenja površine uzoraka na bazi bazalta primenom skenirajućeg elektronskog mikroskopa (analiza morfologije oštećenja površine), kao i kvantitativna mera intenziteta razaranja materijala (bazirana na vrednostima kavitacione brzine, odnosno merenju gubitka mase uzoraka u određenom vremenu izlaganja dejstvu kavitacije).
- Definisani elementi za procenu rizika i mere za kontrolu rizika nastajanja i razvoja oštećenja usled dejstva kavitacije koji mogu da se primene i u drugim istraživanjima iz predmetne oblasti.
- Definisani optimalni parametri dobijanja bazaltnog agregata procesima drobljenja, mlevenja i mehaničke aktivacije za sintezu livenih i sinterovanih uzoraka bazalta.
- Predložena optimizacija procesa sinteze livenog i sinterovanog bazalta u cilju postizanja zahtevane strukture i poboljšanih svojstava otpornosti na dejstvo kavitacije.
- Definisani sastavi i parametri sinteze novih Lost foam vatrostralnih premaza na bazi bazalta sa kontrolisanim reološkim svojstvima za primenu u livarstvu.
- Definisani sastavi i parametri sinteze vatrostralnih premaza na bazi bazalta za zaštitu i povećanje otpornosti na dejstvo kavitacije metalnih i nemetalnih konstrukcija.
- Definisane metode poređenja svojstava otpornosti zaštitnih vatrostralnih premaza na osnovu izračunatih kavitacionih brzina i analize morfologije oštećenja površine uzoraka.

### **4.2. Kritička analiza rezultata istraživanja**

Istraživanja koja su izvedena u ovoj disertaciji koncipirana su na osnovu predhodno definisanih ciljeva i na osnovu analize literature u predmetnoj oblasti. U disertaciji je delom primenjena metodologija istraživanja zastupljena u literaturi koja se većinom odnosi na metalne materijale. U cilju ispitivanja vatrostralnih materijala primenom ultrazvučne vibracione metode sa stacionarnim uzorkom primenjena je modifikacija pripreme uzoraka za ispitivanje s obzirom da

su vatrostalni materijali na bazi bazalta tvrdi i kruti i da ne može da se primeni na njima metoda pripreme kao kod metalnih materijala izradom navoja na uzorcima. Po prvi put je primenjena metoda određivanja otpornosti na dejstvo kavitacije za vatrostalne uzorke na bazi bazalta.

Na osnovu dobijenih rezultata, a istovremenim sagledavanjem ciljeva i postavljenih hipoteza, može da se konstatuje da prikazana istraživanja u potpunosti zadovoljavaju kriterijume jedne doktorske disertacije. Korišćene metode su u skladu sa savremenim metodama, a niz pozitivnih rezultata mogućnosti primene vatrostalnih materijala otvaraju mogućnost njihove šire primene u praksi kao zamena za do sada korišćene metalne materijale. Glavni doprinos ove disertacije je definisanje sinteze vatrostalnih materijala na bazi bazalta za primenu u uslovima dejstva kavitacionih opterećenja, kao i definisanje sastava i postupaka izrade vatrostalnih premaza na bazi bazalta za primenu u livarstvu i za zaštitu metalnih i nemetalnih konstrukcija.

### **4.3 Verifikacija naučnih doprinosa**

Kandidat Marko D. Pavlović, je iz doktorske disertacije objavio ili prezentirao 14 radova i to: 1 rad u istaknutom međunarodnom časopisu, 1 rad u međunarodnom časopisu, 2 rada u nacionalnom časopisu verifikovanom posebnom odlukom matičnog odbora, 8 saopštenja sa međunarodnog skupa štampanih u celini, 1 saopštenje sa međunarodnog skupa štampano u izvodu, 1 rad u vodećem nacionalnom časopisu, čime je verifikovao naučni doprinos svoje doktorske disertacije.

#### Rad u istaknutom međunarodnom časopisu (M22)

1. M. Pavlović, M. Dojčinović, R. Prokić-Cvetković, Lj. Andrić, Z. Ceganjac, Lj. Trumbulović: Cavitation wear of Basalt Glass Ceramic, *Materials*, 12 (9) (2019) 1552, IF (2018) = 2,972, doi:10.3390/ma12091552., (ISSN: 1996-1944; CODEN: MATEG9).

#### Rad u međunarodnom časopisu (M23)

- 1 M. Pavlović, M. Dojčinović, R. Prokić-Cvetković, Lj. Andrić: The Mechanisms of Cavitation Erosion of Raw and Sintered Basalt, *Science of Sintering*, (accepted for publication in Science of Sintering, 51 (2019) 409-419, IF (2018) = 0,885, ISSN: 1820-7413, doi:https://doi.org/10.2298/SOS1904409P

#### Rad u nacionalnom časopisu međunarodnog značaja verifikovanom posebnom odlukom matičnog odbora (M24)

1. M. Pavlović, M. Dojčinović, R. Prokić-Cvetković, Lj. Andrić: Nastajanje i razvoj oštećenja pod dejstvom kavitacije na uzorcima livenog bazalta, *Zaštita materijala*, 60 (2) (2019) 182-189, ISSN: 0351-9465.
2. M. Pavlović, M. Dojčinović, R. Prokić-Cvetković, Lj. Andrić: Cavitation resistance of composite polyester resin/basalt powder, *Structural integrity and life*, 19(1) (2019) 19–22, ISSN: 1451-3749.

#### Saopštenja sa međunarodnog skupa štampano u celini (M33)

1. M. Pavlović, M. Đuričić, A. Mumdić: Basalt application prospects for touristic facilities furnishing, SED 2015, Užice –Srbija, Proceedings, p. 53-60.
2. M. Pavlović, M. Sarvan, F. Klisura, Aćimović Z.: Bazalt – sirovina za proizvodnju agregata za moderne pokrove cesta i željezničkih pruga, Četvrta konferencija – Održavanje 2016, Proceedings, s. 175, 02-04. juni 2016, Zenica B&H, Godina 4, No1.

3. M. Pavlović, M. Dojčinović, Lj. Andrić, J. Stojanović, D. Radulović, M. Petrov, M. Blagojev: Influence of the basalt structure and properties on development the cavitation damage, 50<sup>th</sup> International October Conference on Mining and Metallurgy, IOC 2018, 30<sup>th</sup> September – 3<sup>rd</sup> October 2018, Hotel "Jezero" Bor Lake, Serbia, Proceedings, p.155-158.
4. M. Pavlović, M. Dojčinović, Lj. Andrić, F. Klisura, M. Sarvan, D. Radulović, M. Petrov: Characterization and determination of erosion resistance of refractory materials for application in metallurgy and minning, Congress "Engineering, Environment and Materials in Processing Industry" (EEM2019), Jahorina 2019, Proceedings, pp. 546-552
5. M. Pavlović, M. Dojčinović, Lj. Andrić, D. Radulović, M. Petrov: Determination of the cavitation resistance of glass-ceramic samples based on raw basalt and industrial waste raw materials for use in metallurgy, XIII IMPRC Belgrade, 8-10.May 2019, Proceedings, p. 423-429, 2019.
6. M. Pavlović, M. Dojčinović, R. Prokić-Cvetković, Lj. Andrić, M. Sarvan: Kontrola kvaliteta vatrostalnih premaza primenom ultrazvučne vibracione metode sa stacionarnim uzorkom, Quality 2019, Proceedings, p. 137-142, Neum 2019.
7. M. Pavlović, M. Dojčinović, R. Prokić-Cvetković, Lj. Andrić: Application of glass-ceramic based on basalt for the production of parts of equipment in metallurgy, 14th International Conference on Accomplishments in Mechanical and Industrial Engineering, DEMI 2019, Proceedings, pp. 687-690, Banja Luka 24-25. 5. 2019.
8. M. Pavlović, M. Dojčinović, Lj. Andrić, D. Radulović, Z. Čeganjac: Determination of cavitation resistance of sintered basalt samples, 51<sup>st</sup> International October Conference on Mining and Metallurgy, 16-19 October 2019, Bor Lake, Proceedings, pp. 215-218.

Saopštenje sa međunarodnog skupa štampano u izvodu (M34)

1. M. Pavlović, M. Dojčinović, R. Prokić-Cvetković, Lj. Andrić: Synthesis and characterization of new refractory coating based on basalt, 4<sup>th</sup> Metallurgical & Materials Engineering Congress of South-East Europe(MME SEE 2019) Belgrade, Serbia, June 5-7, Proceedings, P33, p.63, 2019.

Rad u vodećem nacionalnom časopisu (M51):

- 1.M. Pavlović, M. Dojčinović, Lj. Andrić, D. Radulović: Comparison of the formation and development of cavitation damage on cast and sintered samples based on basalt, Journal of Mining and Metallurgy, Section A: Mining, vol. 55 (1) A 2019 (accepted for publication).

## 5. ZAKLJUČAK I PREDLOG KOMISIJE

Na osnovu prethodno navedenog, mišljenje Komisije je da doktorska disertacija kandidata **Marka D. Pavlovića**, master inženjera metalurgije, pod nazivom "**Nastajanje i razvoj oštećenja vatrostalnih materijala na bazi bazalta pod dejstvom kavitacije**", predstavlja originalan naučni doprinos predmetne oblasti istraživanja. Originalnost doktorske disertacije kandidata je potvrđena objavljivanjem više radova u časopisima međunarodnog značaja. Postavljeni predmeti ciljevi doktorske disertacije u potpunosti su ostvareni, na osnovu čega Komisija iznosi svoje mišljenje da doktorska disertacija pod nazivom "**Nastajanje i razvoj oštećenja vatrostalnih materijala na bazi bazalta pod dejstvom kavitacije**", u potpunosti

ispunjava sve zahtevane kriterijume kao i da je kandidat tokom izrade disertacije pokazao samostalnost i originalnost u naučno – istraživačkom radu.

Imajući u vidu kvalitet, obim i naučni doprinos postignutih i prikazanih rezultata, Komisija predlaže Nastavno–naučnom veću Tehnološko–metalurškog fakulteta, Univerziteta u Beogradu, da prihvati ovaj Referat, pruži na uvid javnosti podnetu doktorsku disertaciju kandidata **Marka D. Pavlovića**, master inženjera metalurgije, u zakonom predviđenom roku, kao i da Referat uputi Veću naučnih oblasti tehničkih nauka Univerziteta u Beogradu i da nakon završetka procedure pozove kandidata na usmenu odbranu disertacije pred Komisijom u istom sastavu.

Beograd, 16.12.2019.godine

#### ČLANOVI KOMISIJE

.....  
Dr Marina Dojčinović, vanredni profesor  
Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

.....  
Dr Nenad Radović, redovni profesor  
Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

.....  
Dr Ljubiša Andrić, naučni savetnik  
Institut za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina, Beograd

.....  
Dr Radica Prokić–Cvetković, redovni profesor  
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

.....  
Dr Srećko Manasijević, viši naučni saradnik  
LOLA Institut, d.o.o., Beograd