

**NASTAVNO-NAUČNOM VEĆU  
TEHNOLOŠKO-METALURŠKOG FAKULTETA  
UNIVERZITETA U BEOGRADU**

**Predmet:** Referat o urađenoj doktorskoj disertaciji kandidata mr Marije Mihailović, dipl. inž. metalurgije.

Odlukom br. 35/539 od 03.12.2015. godine, imenovani smo za članove Komisije ocenu i odbranu doktorske disertacije kandidata **mr MARIJE MIHAILOVIĆ**, dipl. inž. metalurgije, pod naslovom:

**„Međufazni fenomeni na graničnoj površini tečni metal-keramika“.**

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

**R E F E R A T**

**1. UVOD**

1.1. Hronologija odobravanja i izrade disertacije

**24.06.2005.** – Kandidat mr Marija Mihailović, dipl. inž. metalurgije predložila je temu doktorske disertacije pod nazivom: „Međufazni fenomeni na graničnoj površini tečni metal-keramika“, a Nastavno-naučno veće Tehnološko-metalurškog fakulteta u Beogradu usvojilo je predlog teme i sastav Komisije za ocenu naučne zasnovanosti predložene teme (odluka br. 35/150 od 30.06.2005. godine).

**14.07.2005.**– Na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta, na osnovu podnetog izveštaja Komisije, doneta je Odluka br. 35/162 o prihvatanju predloga teme doktorske disertacije mr Marije Mihailović, dipl. inž. metalurgije, pod nazivom „Međufazni fenomeni na graničnoj površini tečni metal-keramika“ i za mentora ove doktorske disertacije imenovan je dr Karlo Raić, redovni profesor Tehnološko-metalurškog fakulteta.

**03.11.2005.**– Na sednici Stručnog veća za hemijsku tehnologiju, hemijsko inženjerstvo, biohemijsko inženjerstvo i metalurgiju, Univerziteta u Beogradu, Odlukom br.139/4 data je saglasnost na predlog teme doktorske disertacije mr Marije Mihailović, dipl. inž. metalurgije, pod nazivom: „Međufazni fenomeni na graničnoj površini tečni metal-keramika“.

**28.10.2010.** – Na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta, usvojen je zahtev mr Marije Mihailović, dipl. inž. metalurgije i Odlukom br.35/373 od 28.10.2011. produžen rok za odbranu doktorske disertacije pod nazivom: „Međufazni fenomeni na graničnoj površini tečni metal-keramika“ do 03.11.2011.godine.

**20.10.2011.** – Na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta, usvojen je zahtev mr Marije Mihailović, dipl. inž. metalurgije i Odlukom br.35/333 od 20.10.2011. produžen rok za odbranu doktorske disertacije pod nazivom: „Međufazni fenomeni na graničnoj površini tečni metal-keramika“ do 03.11.2012.godine.

**25.10.2012.** – Na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta, usvojen je zahtev mr Marije Mihailović, dipl. inž. metalurgije i Odlukom br.35/348 od 26.10.2012. produžen je rok za odbranu doktorske disertacije pod nazivom: „Međufazni fenomeni na graničnoj površini tečni metal-keramika“ do 03.11.2013.godine.

**21.11.2013.** – Na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta, usvojen je zahtev mr Marije Mihailović, dipl. inž. metalurgije i Odlukom br.35/375 od 21.11.2013. produžen je rok za odbranu doktorske disertacije pod nazivom: „Međufazni fenomeni na graničnoj površini tečni metal-keramika“ do 03.11.2014.godine.

**02.10.2014.** – Na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta, usvojen je zahtev mr Marije Mihailović, dipl. inž. metalurgije i Odlukom br.35/271 od 06.10.2014. produžen je rok za odbranu doktorske disertacije pod nazivom: „Međufazni fenomeni na graničnoj površini tečni metal-keramika“ do 03.11.2015.godine.

**17.09.2015.** – Na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta, usvojen je zahtev mr Marije Mihailović, dipl. inž. metalurgije i Odlukom br.35/433 od 17.09.2015. produžen je rok za odbranu doktorske disertacije pod nazivom: „Međufazni fenomeni na graničnoj površini tečni metal-keramika“ do 30.09.2016.godine.

**03.12.2015.** – Na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta doneta je Odluka br. 35/539 o imenovanju Komisije za ocenu i odbranu doktorske disertacije mr Marije Mihailović, dipl. inž. metalurgije, pod nazivom „Međufazni fenomeni na graničnoj površini tečni metal-keramika“.

**NAPOMENA:** Produženja roka za odbranu doktorske teze zahtevana su zbog bolovanja kandidata, kao i bolovanja i nege člana porodice u periodu 2010-2014. Poslednje produženje roka od oktobra 2015. usledilo je zbog očekivanja publikovanja rada iz kategorije M22, koji je proizašao iz teze.

## 1.2. Naučna oblast disertacije

Rad u okviru ove disertacije pripada naučnoj oblasti Metalurgija, za koju je za koju je matična ustanova Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu. Za mentora je izabran dr Karlo Raić, redovni profesor TMF-a koji je na osnovu oblasti istraživanja, objavljenih publikacija i iskustva kompetentan da rukovodi izradom ove doktorske disertacije.

## 1.3. Biografski podaci o kandidatu

Marija D. Mihailović, magistar tehničkih nauka, rođena je 1968. godine u Užicu, gde je završila osnovnu i srednju školu. Tehnološko-metalurški fakultet u Beogradu upisala je 1987. godine. U toku studija boravila je dva semestra na stručnoj praksi i radi izrade diplomskog rada na Tehničkom univerzitetu Klaustal (Chlausthal-Zellerfeld), Nemačka, u Institutu za opštu metalurgiju. Diplomirala je 1994. godine na Katedri za metalurgiju govžda i čelika, sa prosečnom ocenom u toku studija 8,65 i ocenom na diplomskom radu 10.

Magistarske studije upisala je 1994. godine na Tehnološko-metalurškom fakultetu, na Katedri za metalurgiju govžda i čelika i završila sa srednjom ocenom 10,00. Magistarsku tezu pod nazivom "Primena grafičke metode za stereološku rekonstrukciju ukupnog sadržaja

nemetalnih uključaka u čeliku” odbranila je aprila 2000. godine i na osnovu toga je stekla akademski naziv magistra tehničkih nauka.

Od oktobra 1994. je kao stipendista Ministarstva za nauku i tehnologiju Republike Srbije bila angažovana u Institutu za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina (ITNMS), gde dobija stalno zaposlenje u julu 1996. godine. Radi kao istraživač-saradnik u Centru za metaluške tehnologije.

Član je istraživačkog tima ITNMS-a na projektima u oblasti osnovnih istraživanja i tehnološkog razvoja koje finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, u periodu: 1994 (kao stipendista Ministarstva)-1996-2016.

Istraživački rad mr Marije Mihailović obuhvata: međufazne fenomene na spoju metala i keramike, biokompatibilne prevlake na superlegurama za implantate, livenje Al-legura u prisustvu elektomagnetnog polja, preradu sekundarnih sirovina Cu-Ni.

Mr Marija Mihailović je Lokalna kontakt osoba za ITNMS pri pan-evropskoj istraživačkoj inicijativi EURAXESS.

Član Saveza inženjera metalurgije Srbije.

Govori engleski i nemački jezik.

## 2. OPIS DISERTACIJE

### 2.1. Sadržaj disertacije

Doktorska disertacija mr Marije Mihailović napisana je na 106 stranica, sa ukupno 8 poglavlja, 37 slika, 7 tabela i 107 literaturnih navoda. Disertacija sadrži sledeća poglavlja: Uvod; Teorijske osnove i stanje istraživanja; Metode merenja; Materijali; Modeli, rezultati modelovanja i diskusija; Kvašenje biokompatibilne keramike; Zaključna razmatranja i Literatura; uz Rezime na srpskom i na engleskom jeziku i Listu sibmola, koji su dati pre prvog poglavlja, kao i biografiju autora i spisak radova proizašlih iz doktorske disertacije na samom kraju.

### 2.2. Kratak prikaz pojedinačnih poglavlja

U **Uvodu** disertacije ukazano je na odsustvo naučne saglasnosti kada su u pitanju fundamentalni principi kod fenomena na graničnoj površini između tečnog metala i keramike, što je prostor za nova naučna istraživanja. Kvašenje je prvi i neizostavni fenomen do koga dolazi pri ostvarivanju spojeva tečni metal-keramika i jednako je predmet osnovnih i primenjenih istraživanja. Navedene su suprotstavljene naučne teorije, sporenja oko mehanizma kontrole kinetike reakcije na graničnoj površini, raznolikost ispitivanih sistema, a samim tim i dobijenih rezultata i njihovih tumačenja. Na kraju Uvoda navedeni su dalji mogući pravci istraživanja u ovoj oblasti, kao i cilj rada u okviru ove disertacije.

U poglavlju **Teorijske osnove i stanje istraživanja** dat je detaljan prikaz različitih materijala – metala i keramike, koji se najčešće spajaju pomoću reaktivnog metala –lema, i to da na graničnoj površini koja nastaje spajanjem metala i keramike dolazi do raznih prelaznih stanja, struktura i tipova veze u delu *Granična površina tečni metal-keramika*. U delu *Fenomeni na graničnim površinama* naglašeno je da se mogu posmatrati dve različite grupe sistema – jedne u kojima na graničnoj površini dolazi do hemijske reakcije i druge gde ta reakcija izostaje. Objasnjen je koncept makroskopski merenog ugla kvašenja,  $\theta$ , prikazano stanje istraživanja do mikro- i nano-opsega i ukazano na fenomene kod neravnih površina. U okviru dela *Opšti principi kvašljivosti* izložene su razlike kod reaktivnog i nereaktivnog kvašenja, prelaz ova

dva stanja, a navedene su i specifičnosti kod pojedinih sistema tečni metal-keramika koje su dovele do razvoja različitih teorija o fenomenima koji vladaju na graničnoj površini tečni metal-keramika. Poseban deo odnosi se na *Kvašljivost neravnih površina*. Eksperimentalne studije fenomena kvašenja na neravnim, odnosno namerno strukturisanim površinama pokazuju veoma jak uticaj mikro- i nano- strukture, gde spadaju nano-šupljine, usekline, kanali, kao i cele oblasti mikroskopskih kanalića, na ponašanje pri adsorpciji. Ispod tečnog metala, na keramičkoj podlozi nastaju usekline po granicama zrna. U delu *Kvašenje i fenomeni u mikro-oblasti* pokazano je da u trojnoj tački čvrsto-tečno-gasovito, kod više sistema tečni metal/keramika dolazi do povećanog stvaranja useklina po granicama zrna ispod oblasti tečne faze. Ovaj fenomen objašnjen je u delu *Fenomeni u oblasti useklina na granicama zrna* i poslužiće u ovoj disertaciji kao osnova za razvoj originalnog matematičkog modela o delovanju useklina na prenos mase, a time i na mehanizam procesa u sistemu tečni metal-keramika.

U delu *Kvašenja na nano-nivou*, reč je o tečnom filmu koji prednjači prilikom kvašenja, razliva se ispred pokretne kapi tečnog metala. Pokazano je da klasična razmatranja u vezi sa uglom kvašenja više ne važe za sam vrh napredujućeg sloja tečne kapi. On u svom kretanju nailazi na neravnine u vidu hemijskih i strukturnih nehomogenosti, što znatno utiče na mehanizam kvašenja. Fenomeni na nano nivou znatno utiču na ukupni mehanizam kvašenja na međufaznoj granici.

U poglavlju **Metode merenja** dat je kratak pregled metoda koje se koriste za dobijanje rezultata koji su obrađeni po originalnim matematičkim modelima. Opisana je Sesil drop metoda, odnosno metoda nepokretne, sedeće kapi, jedna od najčešće korišćenih metoda za merenje ravnotežnog, statičkog ugla kvašenja, a prikazan je sistem koji je prilagođen za visokotemperaturna ispitivanja. Njenom modifikacijom moguće je meriti i dinamički ugao kvašenja. Ukratko su opisane metode elektronske mikroskopije: skenirajuća elektronska mikroskopija (SEM) i transmisiona elektronska mikroskopija (TEM), koje omogućavaju istraživanja strukture materijala. Mikroskopijom atomskih sila (AFM) dobijaju se informacije o morfološkom izgledu površine.

Poglavlje **Materijali** sadrži pregled, podelu i primenu *Tečnih metalnih materijala / Lemova*, ali i kratak deo koji se odnosi na *Telesne tečnosti u kontaktu sa biokompatibilnom keramikom*, jer je u posebnom poglavlju doktorske disertacije dat primer ponašanja biokompatibilne keramike u kontaktu sa telesnim tečnostima, kao deo šire slike fenomena kvašenja, pošto savremena literatura upućuje na neophodnost proširenja ugla gledanja na ove fenomene, a sama kandidatkinja je učestvujući na projektu MPNTR realizovala obimna eksperimentalna istraživanja ove keramike. U delu *Keramički materijali* date su samo karakteristike materijala za koje su korišćeni rezultati eksperimentalnih merenja – SiC i Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>., a opisan je postupak dobijanja i osobine sintetičkog hidroksiapatita – biokompatibilne keramike, a dato je ukratko i o materijalu za izradu implantata na koje se hidroksiapatit deponuje.

Dva matematička modela koja su razvijena u okviru ove doktorske disertacije izložena su u poglavlju **Modeli, rezultati modelovanja i diskusija**. *Model kvašenja keramike tečnim metalom u mikro oblasti* predstavlja matematički model baziran na ovde razvijenoj originalnoj teoriji koja polazi od analize uticaja geometrije useklina na prenos mase; i *Model kvašenja keramičke podloge tečnim metalom u nano oblasti* gde je dat u okviru ove disertacije razvijen originalni matematički pristup izračunavanju ugla kvašenja u nano-oblasti, sa ograničenjem analize na slučajeve kvašenja kada ne dolazi do reakcije na graničnoj površini.

*Model kvašenja keramike tečnim metalom u mikro oblasti* polazi od analize brzine reakcije na graničnoj površini tečni metal-keramika u svetlu useklina po granicama zrna. Uvodi se pojam efektivnog koeficijenta difuzije iz tečnog metala u poroznu čvrstu supstancu,  $D_{eff}$ . U

kinetičkoj analizi navedeni su i opisani mogući limitirajući stupnjevi kada je u pitanju kvašenje na graničnoj površini tečni metal-keramika. Prilikom modelovanja procesa u okolini useklina na granicama zrna (GBG), analizirane su usekline tri karakteristična poprečna preseka, na osnovu profila određenih metodom mikroskopije atomskih sila (AFM). Za karakteristične poprečne preseke odabrani su: trouglasti, parabolično-konkavni i parabolično-konveksni profil, a matematičko modelovanje perma teoriji fenomena prenosa, izvedeno je na osnovu analogija između prenosa mase i toplote. Efikasnost usekline je odnos stvarnog i idealnog prenosa mase, a njene vrednosti, proračunate prema originalnom matematičkom modelu, u zavisnosti od  $z/l$ -faktora, gde je  $z$  parametar delovanja usekline i  $l$  njena dubina, prikazane su uporedo za sva tri profila. Opšta diferencijalna jednačina i njeno partikularno rešenje za svaki tip usekline: trouglasti, parabolično-konveksni i parabolično-konkavni profil usekline dati su uporedo u tabelama. Prenos mase kroz useklinu, kao i efektivnost usekline povezani su sa parametrom delovanja usekline, koji direktno zavisi od geometrije same usekline. Pokazano je da se efektivnost trouglaste usekline na granici zrna nalazi aproksimativno između vrednosti za parabolično konkavnu i konveksnu useklinu. Kada su  $k'''$  (konstanta brzine reakcije na površini) i  $D_{eff}$  konstantne, na efektivnost usekline tj. Na prenos mase, a time i na proces na površini tečni metal-keramika može da se utiče preko geometrije usekline.

*Model kvašenja keramičke podloge tečnim metalom u nano-oblasti* - Koncept ugla kvašenja na nano-nivou potpuno je drugačiji od konvencionalnog pristupa jer ispred razlivajućeg sloja tečnosti postoji prednjačeći film, koji ima debljinu od svega nekoliko molekulskih prečnika, tako da dimenzije trojne linije dimenziono prevazilaze debljinu sloja, a ne postoji ni jasan kriterijum o kinetici kvašenja i kontroli reakcijom na graničnoj površini. Analiza u nano oblasti počinje od Jangove jednačine, osnovne jednačine u fenomenima kvašljivosti. Na atomskom nivou, uvode se novi parametri: površina atoma keramike koja je u kontaktu sa atomima metala i površina tečnog metala na graničnoj površini tečni metal-keramika, koja nije u kontaktu sa atomima kristalne rešetke. Proračuni su rađeni na primeru SiC, za koji u najnovijoj naučnoj i stručnoj literaturi postoji veliki broj eksperimentalnih rezultata merenja. Odabrane su dve karakteristične kristalne ravni iz dve kristalne rešetke, površinski-centrirane-kubne i gusto-složene-heksagonalne, koje su najčešće korišćene od svih preko 250 polimorfni tipova SiC. Po modelu, moguće je izračunati ugao kvašenja metala na tačno određenoj kristalnoj ravni keramike, za različite slučajeve karakterističnih napredujućih uglova kvašenja. Dobijene su vrednosti prividnog ugla kvašenja,  $\phi$ , u zavisnosti od napredujućeg ugla kvašenja,  $\alpha$  po primenjenom modelu u nano-oblasti. Pokazano je da kvašenje zavisi od strukture kristalne rešetke, ali i od orijentacije ravni duž koje se odvija proces kvašenja. Promenom hemijskog sastava može da se utiče na ugao kvašenja. Ova analiza ograničena je na slučajeve kvašenja kada ne dolazi do reakcije na graničnoj površini. Ukoliko se formira novi proizvod reakcije na graničnoj površini, neizbežna je distorzija kristalne rešetke supstrata i novi proračuni.

**Kvašenje biokompatibilne keramike** je poglavlje u kome je opisan način dobijanja prevlaka hidroksiapatita (HAp) na metalnoj osnovi i prikazana je morfologija površine dobijenih prevlaka hidroksiapatita, sinterovanih u struji Ar – gde se pri odgovarajućem povećanju vide sinterovane nano čestice primarnog HAp praha. Kako su fenomeni kvašenja složeni i nepotpuno razjašnjeni u sistemima tečni metal-keramika, ideja kandidata, ali i naučnika na osnovu najnovijih literturnih izvora, je da treba da se objedine analize procesa u raznim sistemima, obuhvatajući povišene, ali i niske temperature. Kvašenje biokompatibilne keramike, (HAp), telesnim tečnostima ananlogno je po o vrednostima viskoziteta i po tome što su u pitanju nenjutnovske tečnosti, sa kvašenjem u sistemima tečni metal-keramika. U toku istraživanja kvašljivosti osnovnog materijala implantata (Ti), zatim Ti prevučenog

hidroksiapatitom i selenijumskom prevlakom, korišćena je metodologija kao kod ispitivanja kvašljivosti u sistemima tečni metal-čvrsta keramika. I u ovim sistemima uočene su istovetne razlike u mehanizmima kvašenja u mikro i nano oblasti, kao što je to u sistemima tečni metal-keramika.

**Zaključna razmatranja** sumiraju rezultate modelovanja procesa kvašenja. Kvašenje i razlivanje na visokim temperaturama je skup složenih fenomena, a detaljna analiza ovih fenomena ne samo da treba da pomogne da se razviju novi tehnološki postupci, već da pruži jasniji uvid u fundamentalne fizičke procese do kojih dolazi između različitih materijala kao što su tečni metal i čvrsta keramika. Izazov je i dalje da se povežu procesi na nano- ili na atomskom nivou sa procesima koji se dešavaju na mikro ili makro nivou jer procesi na nano-nivou utiču na makroskopski izmeren ugao kvašenja, kako je to pokazao model, ali fenomeni koji se dešavaju u ovim različitim oblastima, međusobno su različiti. Proračuni po modelu za mikro-oblast pokazuju evidentne razlike između tri karakteristična profila usekline. Najvišu vrednost efektivnosti ima parabolčno-konkavni profil. Efektivnost parabolčno-konkavne usekline je oko 20% viša nego parabolčno-konveksne, a oko 10% viša nego efektivnost trouglaste usekline. Fenomeni kvašenja na graničnoj površini tečni metal-keramika u nano oblasti zavise od vrste kristalne rešetke i orijentacije ravni prema predloženom modelu koji je testiran izmerenim prividnim uglovima kvašenja.

### 3. OCENA DISERTACIJE

#### 3.1. Savremenost i originalnost

Prva značajnija istraživanja u oblasti fenomena na graničnoj površini tečni metal-keramika započela su u drugoj polovini dvadesetog veka, razvojem postupaka spajanja metala i keramike uz pomoć dodatog materijala, odnosno lema, koji se topi na temperaturama nižim od temperatura topljenja osnovnih materijala. Svoj nagli razvoj istraživanja su imala u dve etape, tokom devedesetih godina dvadesetog veka sa razvojem novih tehnika i u poslednjih pet godina zahvaljujući novom trendu u nauci i u razvoju tehnologije – minijaturizaciji, ali i novim mogućnostima merenja i snimanja na nano-nivou. Tema doktorske disertacije time, merena brojem publikovanih radova u svetu, postala je još aktuelnija u novije vreme.

Kada je reč o graničnoj površini metal-keramika glavni pravac minijaturizacije je razvoj u elektronici i razvoj u biomedicini (mikro-implantati za upotrebu u dijagnostičke svrhe ili nano-nosači za terapijske svrhe). Posle skoro decenije fokusiranja na istraživanja u drugim sistemima metal/keramika, razvoj elektronskih komponenti doveo je silicijum karbid, opet u centar pažnje istraživača. Osim superprovodljivosti, ovaj keramički materijal ima veoma nizak koeficijent termičkog širenja i nema fazne transformacije u oblasti radnih temperatura.

Poznata je situacija da se teorija i tehnološki napredak u ovoj oblasti ne prate i da se do velikog tehnološkog napretka dolazilo skupom i dugotajnom metodom probe i greške, pa je razvoj tehnologije inicirao potrebu za novim teorijskim konceptima. Do sada publikovane i delimično usaglašene teorije o fenomenima na graničnoj površini tečni metal-keramika nisu dovele do konačnog razjašnjenja fenomena. Naprotiv, postalo je jasno da mnogo delujućih parametara i sistema tečni metal-keramika zahteva nova kako eksperimentalna, tako i fundamentalna istraživanja.

Fenomeni u mikro oblasti u okviru ove doktorske disertacije predstavljeni su u vidu u ovoj disertaciji razvijene originalne teorije kvašenja na granicama zrna u sistemu tečni metal-keramika, koja polazi od analize uticaja geometrije useklina po granicama zrna na prenos mase. Prilikom postavke teorijskog modela, primenjene su analogije između prenosa mase i toplote, sa stanovišta fenomena prenosa. Matematička analiza bazirana je na analizi rebrastih površina. Model je proveren na rezultatima publikovanim u savremenoj naučnoj literaturi.

Originalan teorijski model kvašljivosti u nano-oblasti, koji je razvijen u ovoj disertaciji, predstavljen je na eksperimentalnim podacima kvašenja silicijum karbida tečnim metalom, dobijenim u referentnim naučno-istraživačkim laboratorijama, objavljenim u najnovijoj literaturi.

### 3.2. Osvrt na referentnu i korišćenu literaturu

U okviru doktorske disertacije citirano je 107 literaturnih navoda, od onih koji predstavljaju uvod u ovu oblast, do najnovijih naučnih istraživanja, koji prikazuju stanje u ispitivanoj oblasti, kao i aktuelnost problematike. Na osnovu preseka stanja u literaturi izložene su osnovne smernice za istraživanja koja su izvršena u ovoj doktorskoj disertaciji. Savremena istraživanja objavljena u navedenim naučnim radovima opisana su, analizirana i prodiskutovana i izvedeni su zaključci koji su omogućili postavljanje teorijskih osnova za matematičke modele koji su ovde originalno razvijeni. Iz obrazloženja predložene teme doktorske disertacije i objavljenih radova, kao i iz popisa literature koja je korišćena u istraživanju, može se zaključiti da kandidat adekvatno poznaje predmetnu oblast istraživanja i aktuelno stanje u ovoj oblasti u svetu.

### 3.3. Opis i adekvatnost primenjenih naučnih metoda

U disertaciji je prikazan originalni koncept i na osnovu njega je izvedena numerička procedura koja omogućuje praćenje fenomena na granici faza tečni metal-keramika. Dat je potpuno nov matematički pristup, na osnovu teorije fenomena u ispitivanim sistemima i publikovanih rezultata merenja, i to za dva nivoa analize - u mikro oblasti i u nano oblasti. Za osnovu teorijskog modela u mikro oblasti, primenjene su analogije između prenosa mase i toplote, sa stanovišta fenomena prenosa. Matematička analiza bazirana je na analizi rebrastih površina i dobijeni su adekvatni odgovori na koji način može da se utiče na prenos mase, a time i na proces na površini tečni metal-keramika. Teorijski model u nano oblasti dao je adekvatan odgovor na različite vrednosti u praksi izmerenih uglova kvašenja, kao i mogućnost da se utiče na mehanizam kvašenja u zavisnosti od vrste kristalne rešetke, odnosno orijentacije kristalne ravni koja je kvašena.

Obe ovde prikazane originalne numeričke procedure vrlo su primenljive, testirane su na podacima dobijenim eksperimentalnim merenjima. Dobijeni rezultati omogućavaju dalje usavršavanje modelovanja procesa na granici faza tečni metal-keramika, primenu u praksi i budućim ispitivanjima.

### 3.4. Primenljivost ostvarenih rezultata

Na osnovu pregleda do sada objavljenih radova i rezultata prikazanih u okviru ove doktorske disertacije ostvaren je značajan doprinos modelovanju fenomena na graničnoj površini tečni metal – keramika. Složenost ovih procesa zahteva razvoj novih teorijskih koncepata koji mogu da objasne fenomene koji vladaju u oblasti kontakta tri faze, sve do mikro- i nano-nivoa, ali i da omoguće predviđanje toka procesa kako bi bilo moguće automatizovati dalji razvoj i kontrolu procesa. Dat je potpuno nov pristup analizi fenomena na graničnoj površini tečni metal – keramika. Prvi put su prikazani novi teorijski koncepti koji mogu da objasne fenomene koji vladaju u mikro- i nano-oblasti, što je vrlo bitno jer je u modernoj nauci sve prisutniji takozvani multiskejlning pristup.

Eksperimentalni podaci, iako vremenom sve pouzdaniji usled razvoja mernih uređaja i eksperimentalnih tehnika, ne mogu da se dobiju sasvim tačno usled kompleksnosti fenomena i tehničkih ograničenja i zato je dobro da postoji matematički model koji može približnije da da odgovore o dešavanjima u oblasti granične površine tečni metal – keramika.

Uređaji za eksperimentalna merenja *in-situ* još uvek imaju brojna ograničenja ali originalni razvijeni matematički modeli mogu da daju podatke o uglu kvašenja u sistemima tečni metal – keramika. Modeli o okviru ove disertacije su predstavljeni kroz kompletan matematički princip, pogodan za razvoj softvera, koji bi mogao da se primeni u praksi.

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

Kandidat mr Marija Mihailović je diplomirani inženjer metalurgije i magistar tehničkih nauka. Tokom izrade doktorske disertacije ispoljila je izuzetnu istrajnost u pronalaženju novih rešenja, stručnost u pristupu tematici koja obuhvata više različitih naučnih oblasti i disciplina, dobro planiranje i izvođenje eksperimenata, analitičko razmišljanje, sistematičan pristup, a pri analizi rezultata pokazala je samostalnost i kreativnost. Na osnovu dosadašnjeg zalaganja i publikovanih rezultata, Komisija je mišljenja da Kandidat poseduje sve kvalitete neophodne za samostalni naučno-istraživački rad.

## **4. OSTVARENI NAUČNI DOPRINOS**

### 4.1. Prikaz ostvarenih naučnih doprinosa

Ostvareni naučni doprinos u okviru ove disertacije ogleda se u sledećem:

- Razvijen je matematički *Model kvašenja keramike tečnim metalom u mikro oblasti*, baziran na originalnoj teoriji analize uticaja geometrije useklina na prenos mase.
- Pokazano je kako na prenos mase, a time i na proces na površini tečni metal-keramika može da se utiče preko geometrije useklina na granicama zrna.
- Razvijen je originalni matematički *Model kvašenja keramičke podloge tečnim metalom u nano oblasti* gde je dat pristup izračunavanju ugla kvašenja u nano-oblasti na osnovu podataka dobijenih merenjem napredujućeg ugla kvašenja.
- Pokazano na koji način promenom hemijskog sastava može da se utiče na ugao kvašenja u zavisnosti od strukture kristalne rešetke, ali i od orijentacije ravni duž koje se odvija proces kvašenja.
- Dat je kompletan matematički princip za razvoj softvera modelovanjem fenomena u sistemima tečni metal-keramika, koji bi mogao da se primeni u praksi.
- Pokazano je da postoji analogija u fenomenima i mehanizmima kvašenja kod visokotemperaturnih procesa u višefaznim sistemima tečni metal-keramika sa onima koji se odvijaju na niskim temperaturama gde je keramika čvrsta faza, naročito u pogledu razlike mehanizama u mikro i nano oblasti.

### 4.2. Kritička analiza rezultata istraživanja

Predmet disertacije je razvoj matematičkih modela koji će opisivati fenomene na graničnoj površini tečni metal-keramika u mikro i nano oblasti. Uvidom u dostupnu literaturu iz ove oblasti istraživanja, primećuje se da do sada ne postoje matematički modeli koji obuhvataju sve oblasti. Publikovani radovi kandidata, mr Marije Mihailović, na međunarodnim



konferencijama bili su među prvima koji su u ovoj oblasti uveli multiskejlning koncept. Postoje u novije vreme modeli koji su razvijeni za samo određene sisteme, ali su ograničeni osobenostima modelovanih sistema.

U ovoj disertaciji razvijeni su originalni modeli koji značajno dopunjuju mogućnost primene postojećih rezultata. Na taj način, ova doktorska disertacija predstavlja važan korak ka praktičnoj primeni softvera na bazi modela fenomena u sistemima tečni metal-keramika, ali i otvara nove mogućnosti za dalja istraživanja.

#### 4.3. Verifikacija naučnih doprinosa

Kandidat mr Marija Mihailović, u svom istraživačkom radu, kao autor ili koautor objavila je 18 radova u međunarodnim časopisima iz kategorije M20, četiri poglavlja u u tematskom zborniku međunarodnog značaja iz kategorije M14, 43 rada na međunarodnim konferencijama, koji su štampani u celini, 2 rada po pozivu na međunarodnim konferencijama, 8 radova u vodećim časopisima nacionalnog značaja i 8 u nacionalnim časopisima, koautor je na 5 tehničkih rešenja koje je verifikovalo Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

Rezultate svog istraživanja tokom izrade ove disertacije potvrdila je objavljivanjem radova u časopisima međunarodnog i nacionalnog značaja i saopštavanjem radova na međunarodnim i nacionalnim skupovima. Rezultati dosadašnjeg naučno-istraživačkog rada kandidata u ovoj oblasti prikazani su u 4 (četiri) rada objavljena u naučnim časopisima međunarodnog značaja (iz kategorije M20: vrsta rezultata M22 -1 rad; M23 - 3 rada), 5 (pet) radova prezentovanih na međunarodnim savetovanjima i objavljenih u zbornicima radova sa skupova međunarodnog značaja, štampanih u celini (iz kategorije M30: vrsta rezultata M33), 1 (jedan) rad objavljen kao saopštenje sa međunarodnog skupa štampano u izvodu (vrsta rezultata M34) i 1 (jedan) rad u vodećem časopisu nacionalnog značaja celini (iz kategorije M50: vrsta rezultata M51) koji je u trenutku slanja bio časopis na SCI-listi, ali je prestao da izlazi u štampanom izdanju.

Bibliografija koja se odnosi na doktorsku disertaciju

#### Kategorija M22 Rad u istaknutom međunarodnom časopisu

1. Marija Mihailović, Aleksandra Patarić, Karlo Raić, Zvonko Gulišija, *Wetting phenomena of grooves at liquid metal/ceramics interface*, Journal Metalurgija, vol 55, No 3 (2016) p. *potvrda*. ISSN 0543-5846 , IF(2014) 0,959, 29/74 Metallurgy & Metallurgical Engineering

#### Kategorija M23 Rad u međunarodnom časopisu

1. Marija Mihailović, Karlo Raić, Aleksandra Patarić, Tatjana Volkov-Husović, *Nano-Wetting Aspect at the Liquid Metal/ SiC Interface*, Materials and Technology, vol. 49, 3 (2015) p. 413-416. ISSN 1580-2949, IF(2014) 0,548; 224/260 Materials Science, Multidisciplinary, doi:10.17222/mit.2014.111
2. Marija D. Mihailović, Aleksandra S. Patarić, Zvonko P. Gulišija, Zoran V. Janjušević, Miroslav D. Sokić, *Mogućnosti primene atmosferskog plazma-sprej postupka za dobijanje prevlaka hidroksiapatita na uzorcima od nerđajućeg čelika*, Hem Ind vol.67, no.5 (2013) p.753-757. ISSN 0367-598X IF(2013) 0,562; 103/133 Engineering, Chemical . DOI:10.2298/HEMIND120910001M.

3. Marija Mihailović, Aleksandra Patarić, Zvonko Gulišija, Djordje Veljović, Djordje Janačković, *Electrophoretically deposited nanosized hydroxyapatite coatings on 316LVM stainless steel for orthopaedic implants*, Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly / CI&CEQ, 17, 1 (2011)p. 45-52. ISSN 1451-9372 IF(2011) 0,610; 91/133 Engineering, Chemical

M33 Saopštenje sa međunarodnog skupa štampano u celini

1. Marija Mihailović, Tatjana Volkov-Husović, Karlo Raić, *Micro- and Nano- Scale Wetting of Reactive Metal at Metal/Ceramic Interface*, Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Ceramics Congress CIMTEC 2006, Acireale, Sicily, Italy, June 4-9, (2006), H-1, L10
2. M. Mihailovic, S. Mesarovic, K. Raic, T. Volkov-Husovic, *Multiscale modelling of wetting during metal-ceramic joining*, Proceedings: 10th International Conference and Exhibition of the European Ceramic Society ECERS, ed. J.G.Heinrich and C. Aneziris, Goeller Verlag, Baden-Baden, (2007), June 17-21, 2007, Berlin, Germany, p. 101-105 ISBN: 3-87264-022-4
3. Marija Mihailović, Sinisa Dj.Mesarovic, Karlo T.Raić, Tatjana Volkov-Husović, *Modeling of Wetting Phenomena at Grain Boundary Grooves of Metal/Ceramic Joints*, 3rd Int. Conf. Deformation Processing and Structure of Materilas, 20-22nd September, Belgrade 2007, p.39-46
4. Marija Mihailović, Aleksandra Patarić, Zvonko Gulišija, Zoran Janjušević, Miroslav Sokić, *Nanostructured Hydroxyapatite Coatings on Stainless Steel for Orthopaedic Implants*, XVIII YUCOR, Tara -8. April 2011 Proceedings Exchanging Experiences in the fields of Corrosion, Materials and Environmental Protection, Ed. Miomir Pavlović, Časlav Lačnjevac, (2011) p.423-429, ISBN 978-86-82343-14-1
5. Marija Mihailović, Aleksandra Patarić, Tatjana Volkov-Husović, Karlo T. Raić, *An atomic-scale wetting model of the liquid metal/ceramic interface*, Proceedings of the First Metallurgical & Materials Engineering Congress of South-East Europe (MME SEE), Ed. E. Romhanji, M.Jovanović, N. Radović, May 23-25, Belgrade, Serbia (2013), p.362-367 ISBN 987-86-87183-24-7

M34 Saopštenje sa međunarodnog skupa štampano u izvodu

1. Marija Mihailović, Aleksandra Patarić, Karlo Raić, *The influence of the metal/ceramic interface type on the wetting process*, IV International Congress "Engineering, Environment and Materials in Processing Industry", Jahorina, BiH, March 4-6. (2015) M23-E p. 346-347 ISBN 978-99955-81-00

M51 Rad u vodećem časopisu nacionalnog značaja

1. M. Mihailović, T.Volkov-Husović, K.Raić, *Micro- and Nano- Scale Wetting of Reactive Metal at Metal/Ceramic Interface*, Advances in Science and Technology, Vol.45 (2006) p.1526-1531. ISSN: 1662-0356,  
DOI:10.4028/www.scientific.net/AST.45.1526

## 5. ZAKLJUČAK I PREDLOG

Na osnovu prethodno iznetih razmatranja rezultata doktorske disertacije mr Marije Mihailović, dipl. inž. metalurgije, pod nazivom „Međufazni fenomeni na graničnoj površini tečni metal-keramika“ smatramo da su ispunjeni svi ciljevi i zadaci rada na ovoj tezi i da ona svojim sadržajem i kvalitetom značajno doprinosi oblasti Metalurgija, što je i potvrđeno objavljivanjem radova u međunarodnim časopisima i publikovanjem rezultata na međunarodnim konferencijama. Takođe, komisija je mišljenja da je kandidatkinja ispoljila izuzetnu naučno-istraživačku sposobnost u svim fazama izrade ove doktorske disertacije.

Imajući u vidu obim i kvalitet dobijenih rezultata, mogućnost njihove primene u praksi, kao i sposobnosti koje je kandidatkinja pokazala, Komisija predlaže Nastavno-naučnom veću Tehnološko-metalurškog fakulteta da prihvati ovaj izveštaj, da se doktorska disertacija pod nazivom „Međufazni fenomeni na graničnoj površini tečni metal-keramika“ kandidata mr Marije Mihailović prihvati, izloži na uvid javnosti i uputi na konačno usvajanje Veću naučnih oblasti tehničkih nauka Univerziteta u Beogradu. Takođe, Komisija predlaže da se nakon završetka ove procedure, kandidat pozove na usmenu odbranu doktorske disertacije pred Komisijom u istom sastavu:

U Beogradu,

19.02.2016.

### ČLANOVI KOMISIJE

---

prof.dr Karlo Raić, redovni profesor  
Univerzitet u Beogradu,  
Tehnološko-metalurški fakultet

---

prof.dr Tatjana Volkov-Husović, redovni profesor  
Univerzitet u Beogradu,  
Tehnološko-metalurški fakultet

---

dr Zoran Odanović, naučni savetnik  
Institut za ispitivanje materijala  
Beograd