

UNIVERZITET U BEOGRADU
TEHNOLOŠKO-METALURŠKI FAKULTET

NASTAVNO-NAUČNOM VEĆU

Predmet: Podobnost teme i kandidata Bojane Radojković, dipl. inž. tehnologije za izradu doktorske disertacije

Odlukom br. 35/347 Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu od 18.12.2014. godine, imenovani smo za članove Komisije za ocenu podobnosti teme i kandidata Bojane Radojković, dipl. inž. tehnologije, za izradu doktorske disertacije i naučne zasnovanosti teme „FIZIČKO-MEHANIČKA SVOJSTVA MATERIJALA TRETIRANIH LASEROM”.

Komisija smatra da je naslov teme potrebno izmeniti i predlaže Nastavno-naučnom veću Tehnološko-metalurškog fakulteta izmenjeni naslov teme:

**„FIZIČKO-MEHANIČKE I MIKROHEMIJSKE PROMENE NA POVRŠINAMA
KERAMIČKIH I METALNIH ARTEFAKATA TRETIRANIH LASEROM“**

Na osnovu materijala priloženog uz Zahtev kandidata, Komisija podnosi sledeći

R E F E R A T

1.Podaci o kandidatu

1.1. Biografski podaci

Bojana Radojković, diplomirani inženjer tehnologije, rođena je 14.06.1982. godine u Gornjem Milanovcu. Nakon završene srednje škole u Gornjem Milanovcu upisala je Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu. Diplomirala je 2008. godine na odseku “Organska hemijska tehnologija i polimerno inženjerstvo” sa temom “Uticaj rastvarača na korelaciju strukture i aktivnosti 5-alkil-5-fenilhidantoina” pod mentorstvom prof. Dr. Gordane Ušćumlić.

Bojana Radojković je od 2009. godine zaposlena u Institutu Goša u Centru za opšta i primenjena istraživanja i u Međunarodnom centru za zaštitu kulturne baštine. Godine 2009. upisala je doktorske studije na Tehnološko-metalurškom fakultetu Univerziteta u Beogradu, studijski program Inženjerstvo materijala. Od 2010. godine ima zvanje istraživač saradnik.

Kandidatkinja je bila angažovana na realizaciji sledećih projekata:

Istraživački projekti:

- U period 2009-2011. na projektu TR11026 "Istraživanje u oblasti filtara sa površinskim akustičkim talasom (PAT) optimizacija projektovanja, izbor materijala i tehnologije proizvodnje" koji je finansiralo Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije.
- U periodu 2011-2014. na projektu TR34022 "Sinteza dijamantskih prevlaka iz plamena ugljovodonika tehnikom ravnog plamena." koji je bio finansiran od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.
- Od 2014. radi na projektu TR34028-"Istraživanje i optimizacija tehnoloških i funkcionalnih performansi ventilacionog mlina termoelektrane Kostolac B" koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije. Jedan deo ovog projekta se bavi problemima zaštite objekata kulturne baštine u neposrednoj okolini Termoelektrane.

Medjunarodni projekti:

- U period od 2010-2013. kandidatkinja je bila angažovana na realizaciji međunarodnog projekta -"W-tech, Technology transfer and Innovation centre for advanced welding Technologies, Material Science and Application of Engineering software" finansiranog od strane Evropske Unije.

U okviru ovog projekta kandidatkinja je prošla kurs "Karakterizacija strukture metalnih materijala primenom skenirajuće elektronske mikroskopije".

- U period od 2013-2015. kandidatkinja je angažovana na realizaciji međunarodnog projekta - „PARTECH- Partnership and technological support for cooperation between R&D and SMEs in the border region“ koji je finansiran od strane Evropske Unije.

2011. godine kandidatkinja je pohađala seminar i okrugli sto "Priprema predloga projekta" organizovanog od strane Privredne Komore Srbije i Privredne komore Češke.

Pored toga kandidatkinja je pohađala kurs "Savremeni pristupi u konzervaciji nasleđa: spoj umetnosti, nauke i tehnologije", u organizaciji Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, Ministarstva kulture i informisanja Republike Srbije i Centralnog instituta za konzervaciju u Beogradu koji je održan 15. i 16. decembar 2014. u Beogradu.

U dosadašnjem radu kandidatkinja se bavila istraživanjima koja su se odnosila na senzore na bazi površinskih akustičkih talasa i njihovu primenu u detekciji gasova i ispitivanjima u oblasti sinteze dijamantskih prevlaka iz plamena ugljovodonika metodom ravnog plamena.

Takođe je bila uključena u istraživanja u oblasti interakcije laserske svetlosti sa materijalima kao što su keramika, staklo i metal u okviru kojih je publikovala više radova.

1.2. Stečeno naučno-istraživačko iskustvo

Bojana Radojković je od 2009. godine zaposlena u Institutu Goša u Centru za opšta i primenjena istraživanja i u Međunarodnom centru za zaštitu kulturne baštine. U periodu od 2010. godine do danas bila je uključena u realizaciju dva projekata vezanih za primenu novih tehnologija u zaštiti kulturne baštine, koji su realizovani u saradnji sa Centrom za multidisciplinarna istraživanja, Centralnog Instituta za Konzervaciju iz Beograda.

Kandidatkinja je, 2012. godine, pohađala kurs “Karakterizacija strukture metalnih materijala primenom skenirajuće elektronske mikroskopije” u okviru međunarodnog projekta „W-techTechnology transfer and Innovation centre for advanced welding Technologies, Material Science and Application of Engineering software”, a u organizaciji Instituta Goša iz Beograda, Instituta Jožef Stefan iz Ljubljane i Rudarsko-Geološkog fakulteta Univerziteta u Beogradu.

Bojana Radojković je školske 2009/10 godine upisala doktorske studije na Tehnološko-metalurškom fakultetu Univerziteta u Beogradu na studijskom programu Inženjerstvo materijala. Uspešno je položila sve ispite predviđene planom i programom doktorskih studija sa prosečnom ocenom 9,46 i ocenom 10,00 na Završnom ispitu sa temom „Određivanje parametara optimizacije bezbednog i efikasnog čišćenja predmeta kulturne baštine primenom lasera“.

Naziv predmeta	Ocena	ESPB
Biokompozitni materijali	10	4
Kvantifikacija vizuelnih informacija u ispitivanju materijala	10	4
Struktura i svojstva kompozitnih materijala	10	5
Metal, ugljenični i keramički kompoziti	10	3
Mehanika laminarnih kompozitnih ploča i ljuski	10	3
Procesiranje i rast monokristala materijala za elektroniku	10	4
Fizičko-mehanička ispitivanja materijala (viši kurs)	9	4
Ambalaža za specijalne namene	10	4
Hemijska kinetika	8	5
Termodinamika čvrstog stanja	8	5
Matematička obrada eksperimentalnih podataka	8	5
Nauka o materijalima i inženjerstvo materijala	10	6
Završni ispit	10	30

Rezultati istraživanja prikazani u završnom radu predstavljaju polaznu osnovu za istraživanja obuhvaćena u doktorskoj disertaciji.

U saradnji sa drugim autorima kandidatkinja je objavila 25 naučnih radova prema kategorizaciji datoj u tabeli:

Broj i kategorije radova koje je kandidatkinja objavila									
Kategorija rada	M21	M23	M24	M33	M34	M51	M52	M63	M64
Broj radova	1	3	2	3	7	5	2	1	1

Spisak objavljenih naučnih i stručnih radova:

M21 Rad u vrhunskom međunarodnom časopisu

1. Polić S., Ristić S., Stašić J., Trtica M., Radojković B.: *Studies of the Iranian Medieval Ceramics Surface Modified by Pulsed Tea CO₂ and Nd:YAG Lasers*, -Ceramics International Vol 41, No 1, 2015, pp. 85-100. DOI: 10.1016/j.ceramint.2014.08.036 (ISSN 0272-8842, IF 2,086 Materials Science, Ceramics (3/25))
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884214012735>

M23 Rad u međunarodnom časopisu

2. Hribšek M., Ristić S., Radojković B.: *Diamond in Surface acoustic wave sensors*, -Acta Physica Polonica A, Vol 117, No 5, 2010, pp. 794-798. (ISSN 0587-4246, IF 0,604 Physics, Multidisciplinary 65/78) <http://przyrbwn.icm.edu.pl/APP/PDF/117/a117z516.pdf>
3. Radojković B., Hribšek M., Ristić S.: *Polianilinski tanki filmovi u senzorima za detekciju štetnih agenasa kod zavarivanja*, -Hemijska Industrija Vol 64, No 3, 2010, pp. 233-237. DOI:10.2298/HEMIND091221027R (ISSN 0367-598X, IF 0,137 Engineering, Chemical (123/135))
<http://www.doiserbia.nb.rs/img/doi/0367-598X/2010/0367-598X1000027R.pdf>
4. Hribšek M., Ristić S., Radojković B., Filipović Z. and Ristić O.: *Modelling of chemical surface acoustic wave sensors and comparative analysis of new sensing materials*, - International Journal Of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices And Fields, Int. J. Numer. Model. Vol 26, No 3, 2013, pp. 263-274. Published online in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com). DOI: 10.1002/jnm.1870 (ISSN 0894-3370 IF 0,629 Engineering, Electrical & Electronic (187/248))
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jnm.1870/abstract>

M24 Rad u časopisu međunarodnog značaja verifikovanog posebnom odlukom

5. Radojković B., Ristić S., Polić-Radovanović S.: *Study of ruby laser beam interaction with glass*, -FME Transactions Vol 41, No 2, 2013, pp. 109-113. (ISSN 1451-2092)
http://www.mas.bg.ac.rs/transactions/Vol_41_No2.html
6. Ristić S., Polić S., Radojković B., Striber J.: *Analysis of ceramics surface modification induced by pulsed laser treatment*, -Processing and Application of Ceramics Vol 8, No 1, 2014, pp. 15-23. DOI: 10.2298/PAC1401015R, (ISSN: 1820-6131)
<http://www.tf.uns.ac.rs/publikacije/PAC/tablescontents.html>

M33 Saopštenje sa međunarodnog skupa štampano u celini:

7. Ristić S., Polić-Radovanović S., Popović-Živančević M., Jegdić B., Radojković B.: *Application of thermography in detection of moisture in aeronautical museum depot*, Proceeding of 4th International scientific conference on defensive technologies OTEH 2011, 6-7 October 2011, pp. 171-176
<http://www.vti.mod.gov.rs/oteh11/index.htm>
8. Radojković B., Hribšek M., Ristić S.: *Saw Sensors For Explosive Parameters Detection*, - Proceedings of the 5th International scientific conference on defensive technologies OTEH 2012, Beograd 2012., pp. 640-644,

<http://www.vti.mod.gov.rs/oteh/elementi/rad/6-08.html>

9. Ristić S., Polić S., Radojković B.: *Laser cleaning of textile artifacts with corroded metal threads*, -Proceedings of the 6th International Scientific Conference On Defensive Technologies OTEH 2014, Vojno-tehnički institut, Beograd 9-10. oktobar 2014.

<http://www.vti.mod.gov.rs/oteh/elementi/rad/024.html>

M34 Saopštenje sa međunarodnog skupa štampano u izvodu:

10. Hribšek M., Ristić S., Radojković B.: *Diamond in Surface acoustic wave sensors*, Zbornik radova sa konferencije YUCOMAT 2009, Herceg Novi 2009, str. 132,
<http://www.mrs-serbia.org.rs/images/2009-1.pdf>
11. Hribšek M., Ristić S., Radojković B.: *Savremeni materijali u PAT hemijskim senzorima*, - Zbornik radova sa međunarodnog naučnog skupa „Savremeni Materijali 2010“, Banja Luka 2010, str. 87-88,
12. Hribšek M., Radojković B., Ristić S.: *Comparative analysis of new sensing materials in chemical SAW sensors*. - Proceedings of the Twelfth annual conference YUCOMAT 2010, Herceg Novi 2010, pp. 131,
<http://www.mrs-serbia.org.rs/images/2010-3.pdf>
13. Radojković B., Ristić S., Polić-Radovanović S.: *Ruby laser beam interaction with glass*, - Proceedings of the the 12th International Young Scientists Conference Optics and High Technology Material Science SPO 2011, Kyiv 2011, 166-168,
14. Radojković B., Krmar M., Vilotijević M., Gligorijević B. and Alil A.: *Deposition Of The DLC Structures In The Lowpressure Oxyacetylene Flat Flame*, - Proceedings of the Eleventh Young Researchers' Conference Materials Science and Engineering and The First European Early Stage Researchers' Conference on Hydrogen Storage, Belgrade 2012, pp. 62, http://www.mrs-serbia.org.rs/images/book_of_abstracts.pdf
15. Radojković B., Ristić S., Polić-Radovanović S.: *Studies of pulsed TEA CO₂ and ND:YAG lasers application in the ceramics surface conservation*, -Proceedings of the ECOLOGICA-International Scientific Conference on Sustainable Economy and Environment, Belgrade 2014, pp. 162-163,
16. Radojković B., Ristić S., Zrilić M., Polić S.: *Determination of Nd-Yag laser parameters for metal threads cleaning in textile artefacts*, -Proceedings of the Thirteenth Young Researchers' Conference Materials Science And Engineering, Serbian Academy of Sciences and Arts, Belgrade 2014, pp. 57.

M51 Rad u vodećem časopisu nacionalnog značaja

17. Ristić S., Polić-Radovanović S., Jegdić B., Ristić R., Radojković B.: *Moisture Mapping of Aeronautical Museum Depot and Galleries by IR Thermography*, -Scientific Technical Review, Vol62, no 2, 2012, pp. 84-90.
<http://www.vti.mod.gov.rs/ntp/rad2012/2-12/9/9.pdf>
18. Polić-Radovanović S., Ristić S., Mirko Kozić, Radojković B.: *Valorizacija uticaja termoenergetskih kompleksa na monumentalne objekte kulturne baštine*, -Energija-ekonomija-ekologija, Vol 2012, No 5, pp. 22-29. (ISSN 0354-8651)

19. Radojković B., Ristić S., Polić S.: *Studies of pulsed tea CO₂ and Nd:YAG lasers application in the ceramics surface conservation*, -ECOLOGICA Vol 21, No 75, 2014, pp. 556-562. (ISSN 0354 – 3285)
http://www.ecologica.org.rs/?page_id=243
20. Ristić S., Polić S., Radojković B., Zrilić M.: *Optimization Of Laser Parameters For Textile Artifacts With Corroded Metal Threads Cleaning*, -Scientific Technical Review, No 3, 2014, u štampi
21. Ristić S., Polić S., Radojković B., Zrilić M., Jančić-Heinemann R.: *Laser Cleaning of Textile Artifacts with Metal Threads: Process Parameter Optimization*, -Scientific Technical Review, Vol 64, No 4, 2014.

M52 Rad u časopisu nacionalnog značaja:

22. Hribšek M., Ristić S., Radojković B., Filipović Z.: *Modelovanje i projektovanje filtara sa površinskim talasima i njihova primena u vojne svrhe*, -Vojnotehnički glasnik, Vol. LIX, No. 3, 2011, pp. 45-70.
<http://www.vtg.mod.gov.rs/arhiva/2011/vojnotehnicki-glasnik-3-2011-1.pdf>
23. Ristić S., Polić S., Radovanović D., Striber J., Radojković B.: *Čišćenje metalnih niti na tekstilnim muzejskim eksponatima Nd-YAG laserom*, -Glasnik Etnografskog muzeja u Beogradu, No 77, 2013, pp. 265-282. (ISSN 0350-0322)

M63 Saopštenje sa skupa nacionalnog značaja štampano u celini:

24. Hribšek M., Ristić S., Radojković B.: *Senzori za bojne otrove sa površinskim akustičkim talasom*, -Zbornik radova sa naučno-stručni skupa sa međunarodnim učešćem OTEH 2009 iz oblasti odbrambenih tehnologija, Beograd 2009, str. 463-468.
<http://www.vti.mod.gov.rs/oteh09/index.htm>

M64 Saopštenje sa skupa nacionalnog značaja štampano u izvodu:

25. Radojković B., Hribšek M., Ristić S.: *Polianilinski tanki filmovi u senzorima za detekciju štetnih agenasa kod zavarivanja*, -Osma konferencija mladih istraživača-nauka i inženjerstvo novih materijala, SANU, Beograd 2009., str. 35.
http://books.google.rs/books?id=d8nxpuH6AiQC&printsec=frontcover&hl=sr&source=gs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false

1.3 Ocena podobnosti

Kandidatkinja ima široka poznavanja iz oblasti interakcije laserske svetlosti sa različitim materijalima, posebno sa materijalima koji su se koristili za izradu različitih predmeta kulturne baštine. Kandidatkinja je objavila 12 radova iz ove oblasti: od čega su 1 u vrhunskom međunarodnom časopisu (M21) i 2 u časopisima međunarodnog značaja (M24). Radeći na projektima MPNTR kandidatkinja je stekla značajno iskustvo vezano za izbor materijal za izradu osetljivih slojeva senzora sa površinskim, akustičkim talasima i u oblasti sinteze dijamantskih prevlaka iz plamena ugljevodonika tehnikom ravnog plamena.

Kandidatkinja ima solidno znanje iz oblasti informacionih tehnologija, SEM i OM analize.

Na osnovu biografskih podataka, rezultata tokom doktorskih studija, dosadašnjeg iskustva u naučno-istraživačkom radu, kao i objavljenih naučnih radova iz oblasti teme disertacije, Komisija ocenjuje da Bojana Radojković, ispunjava sve neophodne uslove za rad na predloženoj temi doktorske disertacije.

2. Predmet i cilj istraživanja

Istraživanja u oblasti interakcije laserske svetlosti sa materijalima su veoma interesantna i spadaju u domen multidisciplinarnih problema za čije je uspešno rešavanje potrebna integracija znanja iz više oblasti: inženjerstva materijala, ispitivanja materijala, optoelektronike, posebno laserska tehnika [1-3].

Poslednjih četrdesetak godina razvijaju se novi laserski sistemi i istražuju se nova područja njihove primene. U fokusu interesovanja su razvoj novih materijala, pogodnih za izradu lasera i proučavanje mehanizama i efekata interakcije laserske svetlosti sa različitim materijalima. Laseri se koriste kao izvori svetlosti u različitim metodama za dijagnostiku karakteristika materijala, kao i za obradu istog, nezaobilazna su oprema u naučnim laboratorijama i alati u pogonima savremene industrije, u medicini, i mnogim drugim delatnostima [3, 4]. Jedan značajan segment primene lasera je u zaštiti kulturne baštine [4-9].

Zaštita kulturne baštine je predmet mnogobrojnih istraživanja [10-16]. Jedan od glavnih zadataka u ovoj oblasti je konzervacija, koja obuhvata analizu oštećenja predmeta, čišćenje (uklanjanje nepoželjnih materijala i materijala koji ne pripadaju originalnom uzorku), sastavljanje (stabilizacija i pričvršćivanje) i preventivna zaštita od daljeg uništenja. Konvencionalne metode konzervacijskog čišćenja površina koriste mehaničke tretmane, ultrazvučnu tehnologiju i organske rastvarače tako da mogu oštetiti površinu uzorka, promeniti njegov sastav i izgled, a u nekim slučajevima biti opasne po zdravlje konzervatora.

Laseri, u preventivnoj i sanacionoj konzervaciji kulturne i istorijske baštine, se koriste za ispitivanje, čišćenje i reparaciju arheoloških i umetničkih predmeta, u stvaranju nove vizuelne dokumentacije, za pravljenje nekontaktnih replika, za utvrđivanje autentičnosti umetničkih dela, kao i u drugim, brojnim oblastima zaštite [16]. Istraživanje delovanja laserskog zračenja na materijale, od kojih su izrađeni različiti predmeti kulturne baštine, veoma je važno jer rezultati mogu da unaprede zaštitu nasleđa neprocenjive vrednosti.

Lasersko čišćenje je kompleksna pojava koju prate efekti formiranja plazme, udarni talasi, unutrašnja naprezanja u materijalu, zagrevanje materijala, topljenje, isparavanje, hemijske modifikacije itd. Ovi procesi su veoma složeni i zavisni od niza faktora [17-30]. Osnovni uticaj imaju: karakteristike laserskog snopa, fizička i hemijska svojstva materijala i okolina. Lasersko čišćenje u konzervaciji predstavlja interakciju laserskog snopa sa slojevima nečistoća, crne skrame, korozije, organskih naslaga i nečistoća koje su posledica prethodnih tretmana.

Lasersko čišćenje je metoda koja daje najbolje rezultate kada se radi o predmetima složene geometrije i složenog sastava [17, 23]. Selektivna i precizna interakcija laserskog snopa je osnovna prednost ove metode čišćenja. Posebnu pažnju zahteva optimizacija radnih parametara lasera kako bi se obezbedilo efikasno i bezbedno čišćenje bez bilo kakvih negativnih efekata na osnovnom materijalu.

Laserske tehnike se danas široko koriste u restauraciji i čišćenju arhitektonskih, kamenih površina. U tu svrhu se najčešće koriste Nd:YAG laseri sa tri talasne dužine i dužina impulsa od nekoliko ns do nekoliko μ s. Kod drugih predmeta kulturne baštine, slika, višebojnih papirnih

dokumenata, keramičkih predmeta, metala [6, 20, 23, 24], tekstila [27, 28], stakla [17, 29] i ostalo, njihova primena se još uvek razvija zbog kompleksnog procesa delovanja laserskog snopa na ove heterogene i veoma osetljive materijale [25, 26]. Najnovija istraživanja pokazuju da se najbolji rezultati dobijaju ako se kao izvori zračenja upotrebe laseri sa subnano sekundnim impulsima.

Lasersko čišćenje je specifičan proces sa brojnim, potencijalnim komplikacijama. Za svaki poseban slučaj interakcije laser-materijal potrebno je odrediti najpogodniju metodologiju, što podrazumeva optimizaciju laserskih parametara (gustina energije laserskog snopa, fluena, trajanje delovanja, odnosno dužina pulsa, talasna dužina, broj pulsa u sekundi i raspodela energije unutar snopa) u skladu sa osobinama materijala (koeficijenti refleksije i apsorpcije, hemijske i fizičke osobine površine, njena topologija na mikro i nano nivou, homogenost, temperaturni koeficijent, temperatura topljenja, i temperatura ključanja). U ovom kontekstu veoma su važna sistematska ispitivanja interakcije, kao i modifikacije materijala koji nastaju na makro i mikro nivou, potencijalnih oštećenja ili sporednih efekata do kojih dolazi tokom čišćenja, primenom najsavremenijih dijagnostičkih metoda i namenskih softverskih paketa [6, 17, 21, 23].

Predmet disertacije biće istraživanje mehanizama delovanja laserskog zračenja na predmete iz studijskih zbirki kulturne baštine, kao i morfološke, mikrohemijske i mikromehaničke promene materijala tretiranih laserom. Istraživanje će obuhvatiti primenu četiri tipa lasera na više vrsta materijala: keramika, metal i kombinacije metal-tekstil. Eksperimenti će se realizovati primenom različitog broja pulseva i različitih energija, različite talasne dužine i vremena delovanja, ugla pod kojim laserski snop dolazi do tretirane površine, vlažnosti materijala i atmosfere u kojoj se izvodi eksperiment. Na taj način će se uticati na efekte interakcije i promene na materijalima, što će omogućiti izbor optimalnih parametara.

Cilj ove disertacije je da dâ doprinos primeni novih tehnika i tehnologija u oblasti zaštite kulturne baštine. Istraživanja u okviru ove disertacije doprineće rasvetljavanju mehanizma i rezultata delovanja lasera na metalnim i keramičkim materijalima i omogućiti optimizaciju laserskih parametara za bezbedno i efikasno čišćenje predmeta kulturne baštine.

Naučni ciljevi ove disertacije su:

- detaljno proučavanja fenomena interakcije laserske svetlosti sa materijalima, posebno sa pikosekundnim laserima, koji su najmanje proučeni i najznačajniji za primenu u procesu bezbednog i efikasnog čišćenja osetljivih materijala. Primena ovih lasera u zaštiti kulturne baštine je skorijeg datuma i otvara nove mogućnosti za bezbedno i efikasno čišćenje produkata korozije i sedimentiranih, nepoželjnih slojeva na površini objekata izrađenih od različitih materijala
- određivanje praga oštećenja za izabrane materijale
- ispitivanje zavisnosti ablacije materijala sa površine predmeta u funkciji talasne dužine, energije i dužine impulsa korišćenih lasera
- ispitivanje mikro hemijskih i mikro mehaničkih promena materijala tretiranih laserom ispod praga oštećenja, na slojevima koji se čiste
- optimizacija parametara lasera za bezbedno i efikasno čišćenje prljavštine i drugih naslaga na površini različitih arheoloških materijala
- određivanje modifikacija (hemijskih, strukturnih, promene u mikro i nano tvrdoći, zaostali naponi) na materijalima, koji su izloženi delovanju laserskog zračenja iznad granice bezbednog čišćenja, s ciljem primene lasera u restauraciji, sanaciji i preventivnoj zaštiti od daljeg uništenja.

- popularizacija primene lasera u konzervaciji predmeta kulturne baštine kroz publikovanje radova i prezentovanje rezultata istraživanja.
- stvaranje baze podataka koja će dati prikaz-sintezu različitih parametara (broj impulsa, različito vreme trajanja impulsa, energija...) najčešće korišćenih lasera i materijala u kulturnoj baštini u cilju bezbedne primene ovih metoda u praksi (čišćenje, dijagnostika, skeniranje, digitalizacija, prepoznavanje oblika nastalih promena i sanacija oštećenja na predmetima).

Spisak stručne literature:

1. Milonni P., Eberly J.H.: *Lasers*, John Wiley & sons, New York, 1988.
2. Bass M.: *Laser Material Processing*, North Holland, Amsterdam, 1983.
3. Thyagarajan K., Ghatak A. K.: *Lasers, theory and application*, Plenum Press, New York, 1982.
4. Cooper I., *Laser Cleaning in Conservation: An Introduction*, Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, 1998
5. Fotakis C., Angelos D., Zafiropoulos V., Georgiou S., Tornari V., *Lasers in the Preservation of Cultural Heritage: Principles and Applications*, CRC Press, 2006, 336 pages.
6. Siano S., *Principles of laser cleaning in conservation*, -Handbook on the Use of Lasers in Conservation and Conservation Science, M. Schreiner and M. Strlic, Editors. 2006, <http://www.science4heritage.org/COSTG7/booklet/>.
7. Siano S., Agresti J., Cacciari I., Ciofini D., Mascacchi M., Osticioli I. and Mencaglia A.A. *Laser cleaning in conservation of stone, metal, and painted artifacts: state of the art and new insights on the use of the Nd:YAG lasers*, -Applied Physics A: Materials Science & Processing Vol 106, 2012, pp. 419–446.
8. Baraldi P., Giulia Barberini M., Fodaro D., Martino L. P. M., Pelosi C. and Sforzini L., *Use of laser technology for the conservation project of an eighteenth-century terracotta sculpture by Gaspare Sibilla*, -Proceeding of the conference Lasers in the Conservation of Artworks IX, London 2011, pp.75-83.
9. Polić-Radovanović S., *Primena lasera u obradi, zaštiti i dijagnostiranju materijala predmeta kulturne baštine*, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, 2007
10. «Конвенции ЮНЕСКО в области охраны культурного наследия и национальное законодательство государств-участников СНГ», Международной конференции, Институт государства и права Национальной академии наук Беларуси. – Минск: Право и экономика (Минск, 26-28 апреля 2007 г.), ISBN 978-985-442-419-4
11. Watt J., *The Effects Of Air Pollution On Cultural Heritage*, editors: Johan Tidblad, Jovan Kucera, Ron Hamilton, -Springer science + Business media LLC New York, 2009, 299 pages.
12. Sokolović Z., *Metode preventivne zaštite tekstilnih predmeta u muzeju*, Glasnik Etnografskog muzeja u Beogradu, Vol 72, 2008, pp. 159-164.
13. Radovanović D.: *Degradacija metalne niti na tekstilnim predmetima u etnografskom muzeju u Beogradu*, -Etnografski muzej u Beogradu, 2008.

14. Režić I., Ćurković L., Ujević M.: *Simple methods for characterization of metals in historical textile threads*, -Talenta Vol 82, No 1, 2010, pp. 237–244.
15. Sebenji F., Hakl L., *Korozija metala*, Tehnička knjiga, Beograd, 1980
16. Полић-Радовановић С., Ристић С., Јегдић Б., Николић З.: *Методолошки и Технички Аспекти Примене Нових Техника У Заштити Културне Баштине*, Институт ГОША, Београд, 2010, 300 стр.
17. Asmus, J.: *Serendipity, punctuated*, -Proceedings of LACONA VI, Vienna 2005, Springer-Verlag, Heidelberg 2006, pp 1-9.
18. Siano S. and Salimbeni R.: *Lasers in Conservation of Cultural Heritage*, -Proceedings of the Italian - Serbian Bilateral Workshop on “Science for Cultural Heritage”, 2013, Belgrade, pp. 153-159.
19. Marczak J., Koss A., Targowski P., Góra M., Strzelec M., Sarzyński A., Skrzeczanowski W., Ostrowski R. and Rycyk A.: *Characterization of Laser Cleaning of Artworks*, -Sensors Vol 8, No 10, 2008, 6507-6548, DOI: 10.3390/s8106507
20. Sook Koh Y.: *Laser Cleaning as a Conservation Technique for Corroded Metal Artifacts*, - Doctoral Thesis, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden, 2005, 114 pages.
21. Barberio M., Barone P., Stranges F., Renzelli D., Xu F. and Bonanno A.: *Effect of Laser Ablation Cleaning Process on Ceramic Artifacts*, -Journal of Physical Science and Application Vol 3, No 4, 2013, pp. 224-228.
22. Nikolov I., Popmintchev T., Todorova T., Buchvarov I., Surtchev M., Tzaneva S.: *Laser Restoration of Ceramic Artifacts with Archeological Value*, Proc. SPIE 4397, -Proceedings of the conference 11th International School on Quantum Electronics: Laser Physics and Applications, Varna 2000, pp. 343. doi:10.1117/12.425162
23. Brown M. S. and Arnold C. B.: *Fundamentals of Laser-Material Interaction, and Application to Multiscale Surface Modification*, K. Sugioka et al. (eds.), -Springer Series in Materials Science 135, Laser Precision Microfabrication, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010, pp. 91-120, DOI 10.1007/978-3-642-10523-4__4
24. Lorusso A., Nassisi V., Buccolieri A., Buccolieri G., Castellano A., Leo L.S., Di Giulio M., Torrisi L., Caridi F. and Borrielli A.: *Laser ablation threshold of cultural heritage metals*, - Radiation Effects & Defects in Solids, Vol 163, No 4–6, 2008, pp. 325–329.
25. Dickmann K., Hildenhagen J., Studer J., and M^usch E.: *Archaeological Ironwork: Removal of Corrosion Layers by Nd:YAG-Laser*. -Proceedings of the conference Lasers in the Conservation of Artworks, LACONA V Proceedings, Osnabr^uck 2003, pp. 71-77,
26. Hildenhagen J., Dickmann K. Hartke H.-G.: *Removal of strong sinter layers on Archaeological Artworks with Nd:ZAG laser*, -Proceedings of the conference Lasers in the Conservation of Artworks, LACONA VI, Vienna 2005, pp. 177-183,
27. Degriigny C., Tanguy E., Le Gall R., Zafiropulos V.: Marakis G.: *Laser cleaning of tarnished silver and copper threads in museum textiles*, -Journal of Cultural Heritage Vol 4, 2003, pp.152s–156s.

28. Lee J., Yu J., Koh Y.: *Experimental study on the effect of wavelength in the laser cleaning of silver threads*, -Journal of Cultural Heritage Vol 4, 2003, pp.157s–161s.
29. Chmel E.: *Cumulative effect in laser-induced damage of optical glasses: a review*, -Glass Physics and Chemistry, Vol 26 No 1, 2000, pp.49-58.
30. Siano S., Agresti J., Cacciari I., Ciofini D., Mascalchi M., Osticioli I., Mencaglia A. A.: *Laser cleaning in conservation of stone, metal, and painted artifacts: state of the art and new insights on the use of the Nd:YAG lasers*, - Applied Physics A, Vol 106, No 2, 2012, pp. 419–446. DOI 10.1007/s00339-011-6690-8

3. Polazne hipoteze

Na osnovu detaljnog proučavanja literature posvećene primeni lasera u oblasti kulturne baštine, odnosno u čišćenju predmeta i objekata kulturne baštine, može se zaključiti da nisu dovoljno proučeni efekti delovanja lasera na predmete koji imaju složen sastav i predstavljaju kombinaciju materijala, primer metala i tekstila, glazirane i ne glazirane keramike.

Lasersko zračenje može u velikoj meri da promeni fizičke, hemijske i mehaničke karakteristike materijala. Te promene nekada su ciljane i poželjne, a nekada mogu biti veoma štetne. Poznavanje mehanizama i posledica delovanja laserskog zračenja su preduslov za uspešnu primenu u zaštiti kulturne baštine.

Delovanjem laserskog zračenja na materijal, unosi se velika količina toplote u veoma kratkom vremenskom intervalu. Kao rezultat toga nastaje skup složenih procesa koji dovode do topljenja, isparavanja i ablacije površinskih slojeva. Usled toga nastaje promena morfologije i sastava materijala, a unose se i unutrašnja naprezanja. Ispitivanje intrakcije laserske svetlosti sa različitim materijalima je prvi korak u procesu raznovrsnih primena lasera u zaštiti objekata kulturne baštine.

Istraživanja u okviru ove disertacije polaze od pretpostavke da je primena lasera u induciranju projektovanih modifikacija na površini materijala omogućena zahvaljujući mogućnosti precizne kontrole parametara u modeliranju interakcije, koja će dovesti do željenih modifikacija. Ova polazna pretpostavka biće dokazivana kroz analizu rezultata velikog broja eksperimenata koji obuhvataju promenu talasne dužine, fluence, vreme trajanja laserskog impulsa, broja impulsa, kao i kombinacije materijala različitog koeficijenta refleksije i apsorpcije laserskog zračenja.

Uvođenje novih tehnoloških postupaka, korišćenje savremenih dijagnostičkih metoda i izbor odgovarajućeg materijala u preventivnoj i sanacionoj konzervaciji predmeta kulturne baštine je imperativ u zaštiti kulturne baštine kako u svetu tako i kod nas. Ova pretpostavka biće dokazivana prezentacijom rezultata dobijenih u okviru eksperimentalnih i numeričkih istraživanja fenomenologije delovanja lasera na izabranim materijalima, kao i nastalih mikromehaničkih i mikrohemijskih promena.

4. Naučne metode istraživanja

Istraživanja u okviru ove disertacije su pretežno eksperimentalne prirode i obuhvataju interakciju nekoliko tipova lasera sa materijalima i dijagnostiku dobijenih efekata. Biće korišćeni sledeći laserski sistemi:

- Nd:YAG laser (dva tipa)

- TEA CO₂ laser

- Rubinski (Ruby) lasers

Efekti delovanja lasera na materijalima biće ispitivani pomoću sledećih metoda:

- Optička mikroskopija

- Skenirajuća elektronska mikroskopija

- EDX analiza

- XRF spektrometrija

- XRD analiza

- Merenje mikro i nano tvrdoće

- Profilometrija

Analiza naponskog stanja u materijalu izloženom dejstvu lasera biće izvedena korišćenjem metode konačnih elemenata. Usled dejstva lasera na materijal dolazi do promene temperature koja izaziva promene u toplotnom širenju materijala izloženog laseru i okolnog materijala. Ove promene mogu se pratiti termovizijskom kamerom i rezultati mogu biti korišćeni kao početni i granični uslovi u postavljanju numeričkog modela za analizu stanja napona u materijalu.

Snimanje uzoraka različitim tehnikama daje vizuelne informacije koje se mogu kvantifikovati analizom slike. Rezultati ove kvantifikacije mogu da se porede sa rezultatima numeričke analize.

Softverski paketi koji će se koristiti za obradu slike su:

- Softver za obradu slika iz optičke i SEM mikroskopije

- Alati softverskog paketa Image Pro Plus ver. 6.2, Media Cybernetics, Silver Spring.

5. Očekivani naučni doprinos

Rezultati ispitivanja su pokazali da se laseri uspešno primenjuju u čišćenju kamenih i mermernih skulptura i drugih istorijskih zdanja. Dostupno je nekoliko tipova komercijalnih lasera koji se koriste za ovu namenu.

Međutim, postoje velike mogućnosti za dalja ispitivanja jer je široka paleta materijala koji su zastupljeni u muzejskim eksponatima. Upotreba lasera u konzervaciji zahteva razumevanje mehanizma interakcije laser-materijal. Ona zahteva određivanje odgovarajućih parametara lasera koji se koriste, kako bi se obezbedilo efikasno i bezbedno čišćenje predmeta neprocenjive vrednosti. Primena lasera nije dovoljno osvetljena sa svih aspekata. Osim za čišćenje laseri se koriste kao izvori svetlosti u različitim dijagnostičkim metodama, kao i za sanaciju nastalih oštećenja. Različiti materijali u kulturnoj baštini traže različiti pristup u primeni ove tehnike što otvara brojne mogućnosti za naučna istraživanja.

Naučni doprinos ove disertacije očekuje se, pre svega, u:

- osvetljavanju mehanizma delovanja lasera na predmete koji imaju složen sastav i predstavljaju kombinaciju materijala sa različitim koeficijentima refleksije i apsorpcije laserskog zračenja, toplotne provodljivosti, hemijskih i mehaničkih osobina.

- optimizaciji i primeni parametarske analize procesa

- razvoju metoda praćenja i kvantifikaciji interakcije lasera sa materijalima

- definisanju efekata delovanja laserske svetlosti sa subnano sekundnim impulsima

- određivanju morfoloških, hemijskih i fizičko mehaničkih promena na materijalima tretiranih laserom
- određivanju praga oštećenja ispitivanih materijala, što predstavlja kako naučni tako i praktični doprinos
- definisanju parametara koji će obezbediti očekivane interakcije materijala sa laserom i garantovati bezbednu i efikasnu primenu lasera
- izradi matematičkog modela interakcije lasera sa materijalom, odnosno matematičkog modela širenja toplote i naprezanja unetih laserskim snopom
- afirmaciji primene savremenih, analitičkih metoda i metoda analize slike u ispitivanju efekata delovanja laserskog zračenja
- popularizaciji primena lasera u zaštiti kulturne baštine, odnosno njihovo uvođenje u praksu, u našim konzervatorskim laboratorijama

6. Plan istraživanja i struktura rada

Predloženi plan istraživanja obuhvata sledeće faze i aktivnosti:

- detaljno proučavanje dostupne literature iz ove oblasti u svetu
- izbor materijala i priprema uzoraka za eksperimentalna ispitivanja
- eksperiment koji uključuje variranje više parametara interakcije i primenu lasera različitog režima rada, talasne dužine i energije, na seriju uzoraka od metala, keramike, tekstila, stakla i njihovih kombinacija
- ispitivanje efekata delovanja laserske svetlosti na izabranim materijalima optičkom mikroskopijom
- ispitivanje efekata delovanja laserske svetlosti na izabranim materijalima SEM-om
- određivanje geometrijskih parametara modifikacija ozračenih zona profilometrijom
- određivanje morfoloških promena u zoni delovanja laserom
- ispitivanje mikrohemijskih promena EDX analizom
- ispitivanje mikromehaničkih promena u zonama delovanja laserom merenjem tvrdoće
- analiza termografskih snimaka i izračunavanje zone širenja toplote indukovane laserom
- izračunavanje praga oštećenja
- numerička simulacija širenja toplote indukovane laserom
- numerička simulacija uticaja oblika oštećenja na zaostali napon u uzorcima koji su izloženi delovanju laserskog snopa.
- komparativna analiza numeričkih i eksperimentalnih rezultata

Planirana poglavlja u doktorskoj disertaciji biće sledeća: Uvod, Teorijski deo, Eksperimentalni deo, Rezultati i diskusija, Zaključak, Literatura.

U prvom poglavlju biće reči o značaju zaštite kulturne baštine. Biće prikazane aktuelne tendencije razvoja i primene laserskih metoda u konzervatorskim postupcima, najnovija saznanja o procesu delovanja lasera na materijalima i mogućnosti savremenih dijagnostičkih metoda koje se koriste u ispitivanju rezultata interakcije lasera sa materijalom.

Teorijski deo obuhvatiće opis procesa delovanja lasera na materijalima, sa posebnim osvrtom na očekivane rezultate u funkciji parametara interakcije. Tu će biti predstavljene i osnove metoda numeričkih simulacija izabranih fenomena.

Eksperimentalni deo je kombinacija dve celine, laserska interakcija sa materijalima i dijagnostika dobijenih efekata na izabranim materijalima. U eksperimentalnom delu biće detaljno opisani oprema, uslovi i tok eksperimenta kao i postupak ispitivanja nastalih promena.

Numeričke simulacije će se izvršiti za proces širenja toplote i raspodelu naprezanja indukovanih laserskim zračenjem.

U okviru Rezultata i diskusije biće prikazani i diskutovani eksperimentalni i numerički rezultati koji se odnose na morfološke, mikromehaničke i mikrohemijske promene u zonama koje su tretirane laserom. Biće analizirani pragovi oštećenja za izabrane materijale i kombinacije materijala. Posebna pažnja biće posvećena analizi prednosti i nedostataka primene laserske metode u čišćenju predmeta iz fundusa kulturne i istorijske baštine.

U Zaključku će biti sumirani rezultati dobijeni u okviru istraživanja, sa osvrtom na njihovu inovativnost, važnost i primenu.

7. Zaključak i predlog

Na osnovu iznetih podataka o dosadašnjem radu i postignutim rezultatima može se zaključiti da kandidatkinja Bojana Radojković, dipl. inž. tehnologije, ispunjava sve potrebne uslove za rad na predloženoj temi doktorske disertacije. Takođe na osnovu iznetih podataka, Komisija smatra da je tema predložene doktorske disertacije naučno zasnovana i predlaže Nastavno-naučnom veću Tehnološko-metalurškog fakulteta da je prihvati. Istraživanja u okviru ove doktorske disertacije pripadaju naučnoj oblasti Tehnološko inženjerstvo, za koju je matičan Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu. Za mentora se predlaže dr Radmila Jančić-Hajnemann, vanredni profesor Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu.

U Beogradu,
30.03.2015

Članovi komisije

Prof. Dr Radmila Jančić-Hainemann, vanr. prof.
Univerziteta u Beogradu, Tehnološko-metalurškog fakulteta

Prof. Dr Vesna Radojević, vanr. prof.
Univerziteta u Beogradu, Tehnološko-metalurškog fakulteta

Prof. Dr Milorad Zrilić, vanr. prof. u penziji
Univerziteta u Beogradu, Tehnološko-metalurškog fakulteta

Dr Slavica Ristić,
Naučni savetnik, Instituta Goša, Beograd

Dr Dušica Stojanović, naučni saradnik
Univerziteta u Beogradu, Tehnološko-metalurškog fakulteta