

## **НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ**

**Предмет:** Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Бојане Радојковић, дипл. инж. технол.

Одлуком бр. 35/195 од 2017. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Бојане Радојковић под насловом

**ФИЗИЧКО-МЕХАНИЧКЕ И МИКРОХЕМИЈСКЕ ПРОМЕНЕ НА ПОВРШИНАМА КЕРАМИЧКИХ И МЕТАЛНИХ АРТЕФАКАТА ТРЕТИРАНИХ ЛАСЕРОМ**

После прегледа достављене Дисертације и других пратећих материјала и разговора са Кандидатом, Комисија је сачинила следећи

### **РЕФЕРАТ**

#### **1. УВОД**

##### 1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

- Школске 2009-2010 кандидат Бојана Радојковић је уписала докторске студије на Технолошко-металуршком факултету Универзитета у Београду, одсек Инжењерство материјала. Све предмете предвиђене планом и програмом је положила са оценом 9,46.
- 08.12.2014.. – Кандидат Бојана Радојковић је пријавила тему докторске дисертације под насловом: „Физичко-механичка својства материјала третираних ласером”.
- 18.12.2014. – На седници Наставно-научно већа Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду, донета је одлука (бр. 35/347) о именовању чланова комисије за оцену подобности теме и кандидата Бојане Радојковић, дипл. инж. технологије за израду докторске дисертације и научне заснованости теме под називом: „Физичко-механичке и микрохемијске промене на површинама керамичких и металних артефаката третираних ласером”.
- Због одласка професора др Милорада Зрилића у пензију за ментора тезе именована је порфесор др Радмила Јанчић Хајнеман.
- 09.04.2015. – На седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду, донета је одлука (бр. 35/95) о прихватању Реферата Комисије за оцену подобности теме и кандидата Бојане Радојковић, дипл. инж. технологије и одобрава се израда докторске дисертације под измењеним називом: „Физичко-механичке и микрохемијске промене на површинама керамичких и металних артефаката третираних ласером”.
- 11.5.2015. – На седници Већа научних области техничких наука Универзитета у Београду, дата је сагласност (по одлуци бр. 61206-1811/2-15) на предлог теме под називом „Физичко-механичке и микрохемијске промене на површинама керамичких и металних артефаката третираних ласером”.

- 17.9.2015. одобрен захтев Бојане Радојковић за продужење рока завршетка докторских студија за додатна два семестра (одлука бр. 35/424)
- 29.9.2016 одобрен захтев Бојане Радојковић за продужење рока завршетка докторских студија за додатна два семестра (одлука бр. 35/485)
- 01.06.2017. – На седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду, донета је одлука бр. 35/195 о именовану Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације под називом: „Физичко-механичке и микрохемијске промене на површинама керамичких и металних артефаката третираних ласером”.

## 1.2. Научна област дисертације

Истраживања у оквиру ове докторске дисертације припадају научној области Технолошко инжењерство (ужа научна област Инжењерство материјала), за коју је Технолошко-металуршки факултет Универзитета у Београду матична установа. Ментор ове докторске дисертације је др Радмила Јанчић-Хајнеман, редовни професор Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду, која је објавила преко 30 радова у међународним научним часописима.

## 1.3. Биографски подаци о кандидату

Бојана М. Радојковић, дипломирани инжењер технологије, рођена је 1982. године. Дипломирала је 2008. године на Технолошко-металуршком факултету Универзитета у Београду на одсеку “Органска хемијска технологија и полимерно инжењерство” са темом “Утицај растварача на корелацију структуре и активности 5-алкил-5-фенилхидантоина”.

Уписала је докторске студије на Технолошко-металуршком факултету Универзитета у Београду, студијски програм Инжењерство материјала, школске 2009-2010. Све предмете предвиђене планом и програмом је положила са оценом 9,46. У оквиру свог истраживачког рада бави се испитивањима интеракције ласерске светлости са различитим материјалима, посебно са материјалима који су се користили за израду различитих предмета културне баштине. Похађала је семинар и округли сто “Припрема предлога пројекта” организованог од стране Привредне Коморе Србије и Привредне коморе Чешке. Похађала је курс “Савремени приступи у конзервацији наслеђа: спој уметности, науке и технологије”, у организацији Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије, Министарства културе и информисања Републике Србије и Централног института за конзервацију у Београду. Поседује сертификат уводне обуке за рад са Инфрацрвеном камером FLIR и пратећим софтвером. Има значајно искуство везано за избор материјала за израду осетљивих слојева сензора са површинским, акустичким таласима и у области синтезе дијамантских превлака из пламена угљеводоника техником равног пламена.

Од 2014. Укључена је у пројекат TR34028-“Истраживање и оптимизација технолошких и функционалних перформанси вентилационог млина термоелектране Костолац Б”. који финансира Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије. Један део овог пројекта се бави проблемима заштите објеката културне баштине у непосредној околини термоелектране.

## **2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ**

### 2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација Бојане Радојковић, дипломираног инжењера технологије, под називом „Физичко-механичке и микрохемијске промене на површинама керамичких и металних артефаката третираних ласером ” представљена је на 327 страна и укључује 88 табела, 186 слика, као и 240 литературна навода. После Резимеа на српском и енглеском језику следи текст организован у десет поглавља: Увод, Заштита културне баштине и

технолошке иновације, Ласери и ласерски системи, Интеракција ласер-материјал, Методе испитивања ефеката деловања ласерског зрачења на површини материјала, Експериментални део, Анализа физичко механичких и микрохемијских промена на металним предметима третираним ласером, Анализа физичко механичких и микрохемијских промена на керамичким предметима третираним ласером, Анализа физичко механичких и микрохемијских промена на предметима сложеног састава (метал-текстил) третираних ласером, Закључци и даља истраживања, Литература. Поред наведених поглавља, докторска дисертација садржи и додатке прописане правилима Универзитета о подношењу докторских теза на одобравање. По форми и садржају, написана дисертација задовољава све стандарде Универзитета у Београду за докторску дисертацију.

## 2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У *Уводу* дисертације образложени су предмет и методе као и циљ, очекивани резултати и допринос истраживања. Приказана је важност испитивања деловања ласерског зрачења на различите материјале ради њихове примене у различитим областима обраде материјала са посебним освртом на примену у области заштите културне баштине и конзервацију као њен значајан сегмент. Указано је на комплексност интеракције ласер-материјал и на потребу обједињавања знања из више области ради њиховог успешног решавања. Посебно је истакнута могућност примене ласерског зрачења код чишћења површина различитих материјала који се срећу у конзервацији предмета културне баштине и указано је на предности ове методе у односу на конвенционалне методе чишћења. Значајна пажња је посвећена испитивањима модификације материјала који настају на макро и микро нивоу, потенцијалних оштећења или споредних ефеката до којих долази током чишћења, применом најсавременијих дијагностичких метода и наменских софтверских пакета, с циљем да се развију процедуре безбедног и ефикасног чишћења предмета непроцењива вредности.

У поглављу *Заштита културне баштине и технолошке иновације* разматран је значај заштите културне баштине. Указано је на потребу пажљивог извођења интервенција на сваком предмету ради очувања његове целовитости. Представљени су основни принципи конзерваторско-рестаураторске етике. Указано је на потребу за примену савремених метода које обезбеђују ефикасну и безбедну конзервацију. Приказане су актуелне тенденције развоја и примене ласерских метода у конзерваторским поступцима, и могућности савремених дијагностичких метода које се користе у испитивању резултата интеракције ласера са материјалом. Примена ласера у заштити културне баштине обухвата широки спектар метода где се ласери користе као изворе светлости (аналитичке методе, структурна дијагностика, дигитализација културне баштине и рестаурација и чишћење). Представљене су предности и недостаци примене ласера у конзервацији. Дат је преглед ласера који се најчешће користе у конзервацијском чишћењу. Приказан је историјски развој примене ласера у чишћењу предмета културне баштине и представљени су резултати најзначајнијих истраживања у свету и у земљи из ове области.

У трећем поглављу *Ласери и ласерски системи* описан је принцип рада ласера, основни параметри и врсте ласера. Дат је историјски преглед развоја ласера. Представљене су теоријске основе на којима се заснива рад ласера и основне конструкцијске поставке. Детаљно је описан феномен стимулисане емисије као основни постулат ласерирања, описана је природа електромагнетног зрачења и специфичне особине овог зрачења које одређују параметре ласера: интензитет снопа, таласна дужина ласерског зрачења, дужина импулса, усмереност и поларизација. Ови параметри су значајни јер од њих зависе карактеристике интеракције ласерског снопа са материјалима. Представљене су врсте ласера које постоје и које се користе у културној баштини: са чврстом активном средином, течни и гасни ласери и дат је детаљан опис оних врста ласера који су коришћени у испитивањима у оквиру дисертације: Nd:YAG, CO<sub>2</sub> ласер и Er:стакло (Er:Glass) ласера.

Четврто поглавље *Интеракције ласер-материјал* обухвата опис процеса деловања ласера на материјале. Разумевања основних процеса интеракције ласер-материјал је предуслов за успешну примену ласерских техника у различитим областима конзервације. Описана је сложеност ове интеракције која обухвата оптичке, механичке, термичке и хемијске феномене. Ово су основне појаве на којима се заснива техника чишћења ласерским методама. Детаљно је описан механизам интеракције ласер-материјал. Описана је зависност природе интеракције од параметара ласера (густина енергије ласерског снопа (флуенца), трајање озрачавања или дужина импулса  $t$ , број и фреквенција импулса, таласна дужина  $\lambda$ , и расподела енергије унутар снопа) и карактеристика материјала који је озрачен (коэффициент рефлексије, трансмисије и апсорпције зрачења, хемијске и физичке особине површине, њена топологија на микро и нано нивоу, хомогеност, коэффициент ширења топлоте, температура топљења, и температура кључања). Приказан је механизам апсорпције енергије од стране материјала и интеракције електрон-електрон и фонон-електрон. Представљене су основне једначине размене енергије између ласерског снопа и материјала и параметри који описују продирање зрачења у материјал (коэффициент апсорпције, дубина апсорпције). Представљене су топлотне једначине које описују проток топлоте у материјалу добијене из Фуријеовог (Fourier) закона. Детаљно су описани механизми ласерског чишћења кроз процесе испаравања, процесе удара и процесе вибрације и описани су радни параметри код који се сваки од ових процеса јавља. Детаљно је описан и феномен ласерске аблације као основни процес на коме се заснива ласерског чишћење. Представљена су три карактеристична режима аблације са различитим механизмима (Фемтосекундска, пикосекундна и наносекундна ласерска аблација). У овом поглављу посебно је описан механизам чишћења предмета од метала, керамике и предмета сложеног састава. Описани су феномени интеракције ласерског снопа са овим врстама материјала и представљени су резултати из литературе, добијени у испитивањима ласерског чишћења на овим врстама материјала као полазна основа за оптимизацију методе кроз истраживања реализовани у оквиру ове докторске дисертације.

Поглавље *Методe испитивања ефеката деловања ласерског зрачења на површини материјала* даје приказ метода које су коришћене за дијагностику добијених ефеката на изабраним материјалима насталих након деловања ласерског озрачавања. Ту су укратко представљени принципи рада оптичке микроскопије и скенирајуће електронске микроскопије (SEM) које су коришћене за посматрање микросруктуре и микроморфологије испитиваних узорака. Описан је принцип рада енергетско-дисперзивне спектрометрије (EDX) која је коришћена за одређивање прелиминарног хемијског састава узорака и промена састава које, услед деловања ласера, настају у саставу материјала на зонама третираним ласером. Спектроскопија ласерски произведене плазме (LIBS) је коришћена за одређивање хемијског састава материјала у зони деловања ласера. Ренгенско флуоресцентна спектрометрија (XRF) коришћена је за потврђивање присуства основних и пратећих елемената у материјалу. Рентгенска дифракција (XRD) је такође коришћена за анализу хемијског састава и кристалографске структуре изабраних узорака. Метода профилометрије коришћена је за одређивање геометријских параметара и морфолошких промена у зони деловања ласером. Мерењем микро и нано тврдоће испитане су микромеханичке промене у зонама деловања ласером. Анализа слике зоне деловања ласерског зрачења, је спроведена алатима софтверског пакета Image Pro Plus ver. 6.2, Media Cybernetics, Silver Spring. Нумеричке симулације су извршене за процес ширења топлоте индуковане ласерским зрачењем помоћу софтверског пакета COMSOL Multiphysics. Термографском камером снимљена је зона ширења топлоте индуковане ласером. Добијени резултати коришћењем набројаних метода су омогућили избор методе и параметара за оптимизацију ефикасног и безбедног чишћење испитиваних узорака.

У поглављу *Експериментални део* описани су услови и ток експеримента који се састојао из два дела. Први део се односио на ласерско озрачавање узорака. Током ласерског третирања

код савремених узорака било је укључено и упоредно термографско снимање ширења топлоте на узорку. Други део експеримента је обухватио дијагностику добијених ефеката на изабраним материјалима, као и нумеричко моделовање ширења топлоте на узорку услед деловања ласерског снопа. У овом поглављу је дат преглед коришћених ласера. Описане су две врсте узорака (укупно 13) на којима су спроведена испитивања: савремени узорци (савремени метал и керамика) и оригинални археолошки узорци (археолошки керамички узорци и узорци текстила са металним везом).

У поглављу *Анализа физичко механичких и микрохемијских промена на металним предметима третираним ласером*, описани су експериментални услови испитивања металних узорака. У испитивањима је коришћено 5 савремених металних узорака : плочица од месинга, плочица од бакра и 3 посребрене бакарне плочице на којима је вештачки изазвана корозија у различитим корозионим срединама ради добијања наслага које се срећу у реалности. Ови метални узорци су коришћени ради прелиминарних испитивања оптимизације параметара за чишћење предмета из културне баштине сачињених од сличних или истих материјала. Испитивања су вршена са Nd:YAG и Er:стакло (Er:Glass) ласерима на тај начин што су мењане таласне дужине ласера, енергије ласерског снопа и број импулса са циљем добијања оптималне комбинације параметара за безбедно чишћење испитиваних површина. Поред тога испитивања су спроведена и са параметрима који доводе до оштећења површине са циљем да се размотре промене до којих долази при условима озрачавања изнад прага оштећења. Ефекати деловања ласерског зрачења на површини материјала испитивани су различитим дијагностичким методама (OM, SEM, EDX, LIBS, XRF, XRD, профилометрија, мерења микротврдоће, термографија и др.). Испитиване су физичко-механичке и микро-хемијске промене настале у озарченим зонама на површини на тај начин што су испитивања вршена на неозраченим површинама и на зонама третираним ласером. Резултати су представљени у облику графика и снимака. Од посебног значаја су информације термографских снимања којим је детектована максимална температура која се достиже на узорку и .Математичко моеловање COMSOL Multiphysics (верзија 5.2) софтверским пакетом спроведено је за узорак плочице од месинга и посребрене бакарне плочице. Моделовање је указало на интеракцију материјала и ласерског импулса и добијана је температурна расподела која је последица апсорбовања енергије ласерског снопа од стране материјала и топлотних процеса у самом материјалу. Резултати нумерике су упоређивани са резултатима термографских испитивања. Резултати испитивања су представљени у облику табела уз кратак коментар за сваку испитивану комбинацију параметара ласера који указује на ефекте који та комбинација изазива на материјалу. Створена је слика о опсегу параметара ласера која би била погодна за безбедно чишћење сличних металних површина.

У поглављу *Анализа физичко механичких и микрохемијских промена на керамичким предметима третираним ласером* описана су испитивања спроведена на једном узорку савремене глазиране керамике и 5 узорака узорака из археолошких, студијских збирки и збирки Етнолошког музеја у Београду. Ово значајно поглавље обухвата узорке са налазишта Стублине, код Обреноцва, Јазда у Ирану, Тира и Сидона у Либану.. Испитивања на савременој керамици (на глазираној и неглазираној страни) су спроведена са циљем сагледавања експерименталних услова који би били примењиви за безбедно чишћење археолошких узорака. Испитивања су спроведена Nd:YAG, CO<sub>2</sub> и Er:стакло (Er:Glass) ласерима различитима таласним дужинама, енергијама ласера и бројем импулса. И у овом случају као код метала испитивани су ефекти изазвани деловањем ласерског снопа са параметрима већим од прага оштећења ради описивања промена на површинама које настају у том случају. Физичко-механичке и микро-хемијске промене настале у озарченим зонама испитиване су са више дијагностичких метода (OM, SEM, EDX, LIBS, XRF, XRD, профилометрија, мерења микротврдоће, термографија и др.) и њихови резултати су представљени у облику табела и графика. Термографска испитивања и математичко моделовање спроведени су за узорак савремене керамике. Добијени резултати представљају

малу базу података која даје опис ефеката деловања примењених ласера као и податке који указују на праг оштећења узорака.

Посебно је интересантно поглавље *Анализа физичко механичких и микрохемијских промена на предметима сложеног састава (метал-текстил) третираних ласером*, које обухвата анализу резултата деловања ласерског зрачења на предмете сложеног састава, пример метал-текстил, који имају сасвим различите параметре у односу на ласерског зрачења. Свако искуство из ове области је веома значајно, јер постоје веома мали број истраживања из ове области, а велики број предмета непроцењива вредности. Експеримент је обухватао уклањање корозионих продуката два музејска узорка текстила са везом од металних нити (кошуља и сукња) Nd:YAG ласерима различитих таласних дужина, енергије снопа, дужине импулса и броја импулса. Морфолошке промене на површинама металних нити услед деловања ласерског снопа испитиване су ОМ и SEM микроскопијом а микрохемијске EDX анализом. Чишћење металних нити на историјским текстилним предметима је компликован процес јер материјали и методе који су погодни за чишћење металних нити могу бити штетне за органско влакно у језгру металне нити, платно основе или вез од конца. Добијени резултати указали су на опсег оптималних параметара за безбедно чишћење металних нити као и на ефекте који настају услед деловања параметар ласера који су изнад прага оштећења.

У оквиру Резултата и дискусије приказани су и дискутовани експериментални и нумерички резултати који се односе на морфолошке, микромеханичке и микрохемијске промене у зонама које су третиране ласером. Одређени су прагови оштећења за изабране материјале и комбинације материјала.

У Закључку су сумирани резултати добијени у оквиру истраживања, са освртом на њихову иновативност, важност и примену у заштити културне баштине. У овом поглављу су назначени и правци даљих истраживања и очекивани резултати.

### **3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ**

#### **3.1. Савременост и оригиналност**

Примена ласера у конзервацији предмета културне баштине је значајна мултидисциплинарна научна област. Досадашњи резултати испитивања су показали да се ласери успешно примењују у овој области. Доступно је неколико типова комерцијалних ласера који се користе у конзервацији, постоје и многе успешне примене ласерског чишћења различитих врста камена. Међутим, и поред тога постоје велике могућности за даља испитивања. Употреба ласера у конзервацији захтева разумевање механизма деловања ласера на одређену површину. Она захтева одређивање одговарајућих параметара ласера који се користе, како би се обезбедило ефикасно и безбедно чишћење предмета непроцењиве вредности.

Постоји пуно параметара који могу да се испитују: таласна дужина, ширина импулса, енергија снопа, број импулса, атмосфера у којој се ради, да ли са системом за издувавање и др. Резултати примене ласера за ову намену такође зависе и од карактеристике основног материјала и материјала слојева које се скидају. Предности над осталим техникама су видљиве. Оптимизација ласерског чишћења је веома битна и предмет је многобројних истраживања у свету.

Примена ласера није довољно осветљена са свих аспеката. Како је приказано у раду различити материјали у културној баштини траже различити приступ у примени ове технике што отвара широку лезу могућности за научна истраживања.

Математичко моделовање расподеле температуре на површини озраченог материјала даје могућност сагледавања процеса и разматрања последица које евентуално могу настати, чиме се испитивања и сам процес чишћења могу усмерити у жељеном правцу. На основу добијених резултата могуће је успешно пројектовати оптималну комбинацију параметара ласера за безбедно и ефикасно чишћење материјала одређених карактеристика. Тиме се у

многоне скраћују и олакшавају експериментална испитивања која су неопходна пре сваког приступа чишћењу јединствених предмета културне баштине.

Резултати математичког моделовања поређени су са увек актуелним термовизијским испитивањима са циљем усмеравања процеса моделовања за добијање што ефикаснијег модела.

Сваки успешан резултат доприноси успешној примени ове методе у процесу конзервације и очувања културне баштине. Створена је мала база података која се односи на параметре ласера и резултате њиховог деловања на оригиналним узорцима. Ови подаци се могу придодати досадашњим испитивањима на сличним материјалима и дати смернице ка што бољем разумевању и решавању проблематике конзервацијског чишћења. Докторска дисертација бави веома актуелним, савременим и изузетно значајном проблематиком, која ће омогућити увођење нове, савремене методе у конзерваторској пракси код нас, засноване на научним истраживањима.

Дисертација садржи резултате оригиналних експерименталних истраживања, који се по први пут у овом обиму реализују код нас и који представљају оригинални допринос истраживањима у овој области у свету, а посебно код нас.

### 3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У докторској дисертације је наведено укупно 240 референци, од чега је највећи број објављен у претходних 15 година. Највећи број наведених референци чине радови из врхунских међународних часописа, са тематиком значајном за израду докторске дисертације. Литература обухвата радове који су везани за конзервацију предмета културне баштине конзервацијску етику, процес рада ласера и механизме његове интеракције са површином материјала, примену ласера уопште у заштити културне баштине, примену различитих врста ласера за чишћење различитих врста материјала. Поред овога литература се односила на све врсте метода које су коришћене у току испитивања озрачених узорака (SEM, EDX, LIBS, XRF, XRD, профилометрија, мерења микротврдоће, термографија и др.) и њихову примену код испитивања ефеката ласерског деловања на површину материјала што је потпомогло доношењу закључака и анализи резултата. У оквиру литературних навода налазе се и референце кандидата дип. инж. технол. Бојане Радојковић, који су проистекли у току израде ове дисертације и који су објављени у врхунским међународним часописима, водећим домаћим часописима и саопштењима на међународним скуповима (9 аутоцитата)..

### 3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Истраживања у оквиру ове дисертације су експерименталне природе и обухватају деловање неколико типова ласера и дијагностику ефеката деловања.

За испитивање деловања ласерског зрачења и оптимизације параметара коришћени су ласерски системи:

- комерцијални Nd:YAG ласер, Thunder Art Laser, производ фирме Quanta System., таласних дужина  $\lambda=1064, 532$  и  $355$  nm; дужине импулса  $<8$  ns; код кога се може мењати енергија импулса до вредности која зависи од таласне дужине ласерског снопа: до 1000 mJ (за  $\lambda=1064$  nm), до 550 mJ ( $\lambda=532$  nm) и до 200 mJ за ( $\lambda=355$  nm). Овај ласер има покретну ручицу кроз коју се помоћу 7 огледала ласерски снап усмерава на површину узорка. Овиме је омогућено усмеравање снопа под различитим угловима и са различите удаљености.
- некомерцијални Nd:YAG ласер развијен у Центру за фотонику Института за Физику у Београду, таласне дужине  $\lambda=1064$  и  $\lambda=532$  nm; дужине импулса око 80 ns и енергије импулса до 20 mJ (за таласну дужину 1064 nm) и до 10,2 mJ ( $\lambda=532$  nm).

- комерцијални Nd:YAG ласер развијен у EKSPLA Company, модел SL212/SH/FH. Ласер може радити на две таласне дужине ( $\lambda=1064\text{ nm}$  и  $\lambda=532\text{ nm}$ ). Дужина трајања пулса код овог ласера је  $150\text{ ps}$  (FWHM); а енергија по пулсу до  $150\text{ mJ}$  за  $\lambda=1064\text{ nm}$  и  $50\text{ mJ}$  за  $\lambda=532\text{ nm}$ .
- некомерцијални Er:Glass ласер развијен у Центру за фотонику Института за Физику у Београду. Карактеристике ласера су:  $\lambda=1540\text{ nm}$ ; дужина импулса око  $50\text{ ns}$ ; Енергија импулса до  $8\text{ mJ}$ .
- комерцијални TEA CO<sub>2</sub> ласер развијен у Институту Винча. То је минијатурни компактни систем таласне дужине  $\lambda=10,6\text{ }\mu\text{m}$ . Дужина импулса око  $100\text{ ns}$ . Излазна енергија пулса је највише  $200\text{ mJ}$ .

За дијагностику ефеката деловања ласера коришћене су:

- Оптичка микроскопија (ОМ) и скенирајућа електронска микроскопија (СЕМ) за посматрање микросруктуре и микроморфологије испитиваних узорака пре и након озрачавања ласером.
- Енергетско-дисперзивни спектрометар (EDX) за одређивање прелиминарног хемијског састава узорака и промена састава које, услед деловања ласера, настају у саставу материјала на зонама третираним ласером.
- Спектроскопија ласерски произведене плазме (LIBS) за одређивање хемијског састава материјала у зони деловања ласера.
- Ренгенско флуоресцентна спектрометрија (XRF) за потврђивање присуства основних и пратећих елемената у испитиваном материјалу.
- за поједине узорке Рентгенска дифракција (XRD) за анализу хемијског састава и кристалографске структуре изабраних узорака.
- Мерење микро и нано тврдоће за испитивање промене микротврдоће узорка након деловања ласером на површину. Приликом конзервације уметничких дела потребно је да ове промене буду минималне.
- Профилометрија-за испитивања храпавости озрачених површина узорака пре и након озрачавања, што је важно да би се установило стање површине, да се одреде промене настале било услед интервенција током рестаурације било услед старења и хабања.
- Алати софтверског пакета ImageProPlus ver. 6.2, Media Cybernetics, Silver Spring за анализу слика микроснимака добијених оптичким микроскопом чиме се даје могућност одређивања степена чишћења површина као и промена овог степена у односу на промену параметара чишћења.
- Математичко моделовање COMSOL Multiphysics (верзија 5.2) софтверским пакетом за моделовање интеракције материјала и ласерског импулса и добијање температурне расподеле која је последица апсорбовања енергије ласерског снопа од стране материјала и топлотних процеса у самом материјалу.
- Термографска снимања инфрацрвеном камером марке FLIR E40 за снимање зона ширења топлоте индуковане ласером која може бити узрок промена у структури основног материјала објекта који се ласерски чисти.

Из претходно приказаног може се закључити да је кандидат у докторској дисертацији користио савремену, адекватну опрему у експерименталној фази, да је анализирао обимни експериментални материјал, да је на основу анализе правило синтезу и доносио закључке које даље могу бити основа за надоградњу научних истраживања и за примену у пракси.

Све научне методе у експерименталној фази, обраду података и презентацији резултата су адекватни, савремени и научни.

#### 3.4. Применљивост остварених резултата



На основу анализе експерименталних резултата прикупљених кроз реализацију програма истраживања у оквиру тезе може се закључити да је остварен значајан допринос унапређењу и оптимизацији методе ласерског чишћења предмета културне баштине. Из спроведених експерименталних испитивања добијени су подаци који се могу употребити у одређивању параметара за безбедно чишћење истих и сличних материјала како из области културне баштине тако и шире. Такође дате су смернице за дефинисање параметара математичког модела који би се ефикасно могао користити за прелиминарну оптимизацију параметара ласера за примену на различитим материјалима. Верификација остварених експерименталних резултата у оквиру ове дисертације постигнута је и објављивањем радова који из ње проистичу у врхунским, међународним часописима из ове области.

### 3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат Бојана Радојковић је у оквиру истраживачког рада показала склоност ка истраживачком раду и способности за проналажење решења за добијање одговора на постављена истраживачка питања у оквиру научне заједнице. Током израде тезе показала је способности анализе експерименталних резултата и способности за коришћење савремених техника испитивања материјала како би се на адекватан начин објаснила запажања и сагледала ограничења и могућности примењених метода чишћења предмета културне баштине. На основу ових истраживања из области теме предложене дисертације, кандидаткиња је до сада објавила 5 радова са SCI листе од којих је у 2 први аутор. Поред тога објавила је 7 радова у часописима националног значаја, и 12 саопштења на међународним скуповима.

## **4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС**

### 4.1. Приказ остварених научних доприноса

Истраживања реализована у оквиру ове дисертације су показала да наука, технологија и култура, дивергентне области људског живота, чине хармонијску целину са аспекта историјског и савременог, материјалног и духовног.

Примена савремених научних метода у очувању културне баштине огледа се у сагледавању нових начина уклањања нечистоћа са предмета непроцењивог значаја. При томе је потребно остварити услове сигурног рада са гледишта очувања интегритета предмета, али и минимизовати утицај конзерватора на стање предмета. Допринос ове докторске дисертације огледа се у:

- Сагледавању међудејства ласерског снопа са материјалом артефакта са гледишта физичке интеракције и промена које дејство ласерског снопа производи у површинском слоју материјала на који делује.
- Испитивање интеракције ласерског снопа са металним материјалом који је подвргнут корозији како би се симулирало понашање ове класе материјала у условима ласерског чишћења што је представљало основу за постављање математичког модела преноса топлоте током интеракције ласерског снопа са металним материјалом.
- Анализа сагласности резултата нумеричке симулације са експерименталним резултатима како би се сагледало понашање металног материјала при дејству ласерског зрачења.
- Испитивање ласерског снопа са савременим керамичким материјалом и постављање математичког модела који показује промену температуре у материјалу услед дејства ласерског зрачења на материјал.
- Анализом резултата нумеричке симулације показало се који су елементи контроле ласерског снопа погодни за утицај на сигурност поступка чишћења артефаката.
- Примена добијених резултата на чишћење металних нити на традиционалној одећи.
- Анализа ризика који се појављују када се прекораче задати услови ласерског чишћења.

- Осветљавање механизма и ефеката деловања ласера на предмете који имају сложен састав и представљају комбинацију метал-текстил, глазиране и неглазиране керамике. Развој методологије чишћења, њено унапређење и увођење у праксу у нашим конзерваторским лабораторијама је још један допринос, јер сваки резултат истраживања је корак више успешној примени ове методе у процесу конзервације и очувања културне баштине.
- Примена добијених резултата на чишћење керамичких артефаката при чему су одређени услови у којима долази до уклањања нечистоћа при истовременом задржавању интегритета материјала који се чисти. Одређивање параметара ласера за безбедно чишћење непожељних наслага на површини објеката културне баштине израђених од метала (сребро, месинг, бакар), керамике и комбинације метал-текстил, односно одређивање прага оштећења за изабране материјале који постоје у културној баштини је такође научни допринос ове дисертације.
- Стварање базе података која даје приказ-синтезу различитих параметара ласера (број импулса, различито време трајања пуласа, енергија...) најчешће коришћених ласера и материјала у циљу безбедног коришћења ласерског чишћења предмета културне баштине у пракси. Ово је веома важно због тога што до сада у конзерваторској пракси у нашој земљи, ласерско чишћење још није нашло место које му са правом припада.
- Одређивање модификација на основним материјалима предмета културне баштине, који су изложени деловању ласерског зрачења изнад границе безбедног чишћења, с циљем примене ласера у рестаурацији и превентивној заштити од даљег уништења. При томе су коришћене различите методе дијагностиковања насталих промена, што даје широке могућности за спознавање механизма деловања ласера на металима и керамици.
- Кроз анализу резултата испитивања показано је да ова метода задовољава еколошке критеријуме и прихватљивија је у односу на друге методе чишћења у конзервацији.

#### 4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Истраживања у оквиру ове дисертације била су усмерена у правцу разумевања процеса који прате уклањање нечистоћа са површине керамичких и металних артефаката. Претходна испитивања изведена су на савременим материјалима како би се омогућило успостављање математичког модела који омогућава сагледавање критичких параметара ласерског снопа у погледу сигурности рада са гледишта локалног загревања материјала на месту дејства ласерског снопа. Загревање мора да буде довољно да би се уклониле нечистоће, али са друге стране мора се очувати интегритет предмета који се чисти. Експериментално су испитани услови уклањања нечистоћа и одређени су параметри сигурног рада ласера. На овај начин нечистоће се уклањају без контакта са предметом, а са гледишта сигурности рада избегава се коришћење штетних растварача који се користе при контактним методама чишћења. Први пут у овом обиму спроведена су опсежна истраживања на материјалима који су се користиле у изради предмета културне баштине. Са посебном пажњом су испитивани физичко-механичке и микрохемијске промене на површинама керамичких и металних артефаката третираних ласерским зрачењем са флуенцом испод и изнад прага оштећења. Треба истаћи значај испитивања деловања ласера на узорцима текстила везаним металним нитима. Ова проблематика је веома мало заступљена у светској литератури, а код нас и у свету постоји огроман број етнографских предмета који су изложени пропадању због корозије металних нити.

#### 4.3. Верификација научних доприноса

Током израде тезе кандидат Бојана Радоковић објавила је више научних радова и учествовала је на више конференција са резултатима свог истраживања. Из тезе је

непосредно произашао један рад категорије M22 један рад категорије M23 и два рада категорије M24 и више научних саопштења у којима је кандидат први аутор. Из резултата дисертације произашао је и један рад категорије M21 у коме је учествовао кандидат али није потписан као први аутор.

#### Категорија M21:

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, pp. 85-100, 2015, (**IF=2.758**) (ISSN 0272-8842)

#### Категорија M22:

1. **Radojković B.**, Ristić S., Polić S., Jančić-Heinemann R., Radovanović D.: Preliminary investigation on the use of the Q-switched Nd:YAG laser to clean corrosion products on museum embroidered textiles with metallic yarns, *Journal of Cultural Heritage*, vol. 23, January–February, pp. 128–137, 2017, (**IF=1.838**) (ISSN: 1296-2074) (doi.org/10.1016/j.culher.2016.07.001.)

#### Категорија M23:

1. **Radojković B.**, Ristić S., Polić S. and Jančić-Heinemann R.: Surface Modification of Aqueduct Ceramics Induced by Nd:Yag Pulsed Laser Treatment, *Lasers in Engineering*, vol. 36, no. 4-6, pp. 373-390, 2017 (**IF=0.214**) (ISSN: 0898-1507)

#### Категорија M24:

1. **Radojković B.**, Ristić S., Polić-Radovanović S.: Study of ruby laser beam interaction with glass, *FME Transactions*, vol.41, no.2, pp. 109-113, 2013, (**CEON/CEES Impact Factor 5: 1.350**) (ISSN: 1451-2092)  
[http://www.mas.bg.ac.rs/transactions/Vol\\_41\\_No2.html](http://www.mas.bg.ac.rs/transactions/Vol_41_No2.html)
2. 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, pp. 15-23, 2014, (**IF=0.944**) (ISSN: 1820-6131) (DOI: 10.2298/PAC1401015R)  
<http://www.tf.uns.ac.rs/publikacije/PAC/tablescontents.html>

## 5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Докторска дисертација Бојане Радојковић, дипломираног инжењера технологије, под називом „**ФИЗИЧКО-МЕХАНИЧКЕ И МИКРОХЕМИЈСКЕ ПРОМЕНЕ НА ПОВРШИНАМА КЕРАМИЧКИХ И МЕТАЛНИХ АРТЕФАКАТА ТРЕТИРАНИХ ЛАСЕРОМ**“ сагледава процес уклањања нечистоћа са металних и керамичких предмета културне баштине коришћењем ласера као и сагледавање услова под којима се остварује сигуран рад са ласером са гледишта очувања целовитости артефакта. Да би се сагледао процес уклањања нечистоћа са површине предмета културне баштине сагледани су процеси који су пратили уклањање оштећења на савременим материјалима како би се поставио модел који показује интеракцију посматраног материјала са ласерским зрачењем. У оквиру овог дела испитивања развијен је математички модел преноса топлоте кроз посматране материјале како би се сагледало температурно поље у материјалу и како би се сагледале интеракције одабраних материјала са ласерским зрачењем. На основи резултата ових испитивања резултати су примењени на неколико керамичких предмета културне баштине као и на веома

осетљиве металне нити које се налазе као декоративни елемент на неким значајним предметима етнолошких експоната. Показало се да се на основу ових истраживања могу одредити сигурни услови за рад са ласерским уређајима за уклањање нечистоћа са површине ових предмета. Применом ласерског зрачења за уклањање нечистоћа са површине музејских предмета постиже се уклањање нежељених слојева уз истовремено очување интегритета предмета са минималним утицајем на околину у поређењу са класичним методама чишћења ових предмета. Осим одређивања прага оштећења за сагледане процедуре чишћења материјала сагледани су и могући ризици неадекватне употребе ласерских уређаја. На основу прегледа дисертације и сагледавања научних резултата остварених и презентованих у оквиру тезе Комисија предлаже Наставно-научном већу Технолошко-металуршког факултета да се докторска дисертација под називом **„ФИЗИЧКО-МЕХАНИЧКЕ И МИКРОХЕМИЈСКЕ ПРОМЕНЕ НА ПОВРШИНАМА КЕРАМИЧКИХ И МЕТАЛНИХ АРТЕФАКАТА ТРЕТИРАНИХ ЛАСЕРОМ“** кандидата Бојане Радојовић, прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

#### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

.....  
Др Радмила Јанчић Хајнеман, редовни професор  
Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет

.....  
Др Весна Радојевић, редовни професор  
Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет

.....  
Др Татјана Волков -Хусовић, ред. проф.  
Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет

.....  
Др Славица Ристић, научни саветник, у пензији,  
Институт Гоша Београд

.....  
Др Душица Стојановић, виши научни сарадник  
Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет

.....  
Др Боре Јегдић, виши научни сарадник  
Универзитета у Београду, Институт за хемију, технологију и металургију

У Београду, 26.06.2017.