

Optimizacija laserskog čišćenja metalnih artifakata

SUZANA R. POLIĆ, Centralni institut za konzervaciju, Beograd

SLAVICA S. RISTIĆ, Centralni institut za konzervaciju, Beograd

BOJANA M. RADOJKOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Mašinski fakultet, Inovacioni centar, Beograd

BORE V. JEGDIĆ, Institut za hemiju, tehnologiju i metalurgiju, Beograd

MILOVAN M. JANIČIJEVIĆ, Metalac posuđe d.o.o, Gornji Milanovac

Originalni naučni rad

UDC: 7.025.4:621.375.826

DOI: 10.5937/tehnika1706834P

Laserske tehnike su postale nezamenjive u rešavanju najrazličitijih konzervatorskih problema. Zadnjih tridesetak godina koriste se u procesu dijagnostike stanja, u procesu uklanjanja nepoželjnih slojeva, kao i u sanaciji oštećenja na predmetima kulturnog nasleđa. Zbog složenosti artefakata, tradicionalne metode čišćenja, u velikom broju slučajeva, imaju delimičnog uspeha. Lasersko čišćenje pokazuje određene prednosti kao što su: velika selektivnost, preciznost, efikasnost i pouzdanost u primeni kod različitih vrsta materijala. Postoje i određeni rizici po predmete čišćenja, te je optimizacija procesa predmet velikog broja istraživanja. U ovom radu su prikazani metodologija i rezultati primene infracrvene termografije za kontinualni monitoring raspodele temperature na površini metalnih objekta za vreme ozračavanja laserom. Izvršen je veliki broj eksperimenata, u kojima se Nd:YAG laser koristi za čišćenje. Dobijeni rezultati termografijom su verifikovani rezultatima numeričke simulacije širenja toplote u osnovnom materijalu. Pokazano je da se primenom infracrvene termografije mogu eliminisati oštećenja na osnovnom materijalu, što je od posebnog značaja kod artefakata neprocenjive vrednosti.

Ključne reči: lasersko čišćenje, artefakti, IC termografija, numerička simulacija

1. UVOD

U konzervatorskoj praksi, danas, postoje dva pristupa: tradicionalna konzervacija, koja označava praksu aktuelnu do kraja osamdesetih godina prošlog veka i savremena konzervacija, koja je inovativna, tehnološki i naučno zasnovana multidisciplinarna oblast, u kojoj, priprema i nadzor kompletnog postupka konzervacije podležu naučnoj valorizaciji.

Zahvaljujući snažnom i dinamičnom razvoju moderne tehnologije i nauke u drugoj polovini 20. i početkom 21. veka, laseri su se na više načina uključili u proces zaštite kulturnog nasleđa. Koriste se kao izvori zračenja u dijagnostičkim metodama, u digitalizaciji, konzervaciji i restauraciji predmeta kulturnog nasleđa.

Proces konzervacije obuhvata sve mere izvedene na objektu koje saniraju oštećenja i produžavaju vek trajanja dragocenog predmeta, usporavaju njegovo dalje propadanje ili ga štite od raznih vrsta oštećenja.

Konzervacija može biti preventivna i sanaciona i podrazumeva više aktivnosti kao što su: specijalno čišćenje, sastavljanje i zaštita od daljeg uništenja. Njen cilj je da se na predmetu sprovedu tretmani koji će omogućiti sigurno čuvanje ili izlaganje bez daljeg rizika od oštećenja [1-3]. Čišćenje je najčešće primenjivani konzervatorski tretman na artifaktima. Kod predmeta kulturnog nasleđa ono se najčešće odnosi na uklanjanje nepoželjnih čestica ili slojeva nataloženih na površini koji se sastoje od materijala različitog porekla (organskog ili neorganskog) pomešanog u skupine (na primer slojeve nečistoća i slojeve zemlje nakupljene na arheološkim predmetima) ili u slojeve (na primer višestruki zaštitni, metalni, zaprljani i/ili slojevi farbe) na originalnoj podlozi koja je bila izložena različitim uticajima. U većini slučajeva granice između slojeva nisu jasno definisane i zbog toga čišćenje može biti komplikovano i rizično [4].

Zbog složenosti artefakata, tradicionalne metode čišćenja u velikom broju slučajeva imaju delimično uspeha. Mehaničke metode (npr: abrazivi, skalpel ili mlazno prskanje) ne daju mogućnost potpuno kontrolisanog čišćenja. Sa druge strane rastvarači mogu da prodru u materijal i da izazovu nepovratna oštećenja. Zbog sve većih efekata zagađenja životne sredine,

Adresa autora: Suzana Polić, Centralni institut za konzervaciju, Beograd, Terazije 26

e-mail: suzanapolic64@gmail.com

Rad primljen: 02.11.2017.

Rad prihvaćen: 16.11.2017.

javlja se potreba za tehnikama koje omogućavaju ekološki prihvatljive procese [5].

Primenu laserskog čišćenja (rubinski laser) u konzervaciji predmeta i objekata kulturnog nasleđa prvi je predložio J. F. Asmus početkom sedamdesetih godina prošlog veka kroz niz ispitivanja na kamenim artefaktima prekrivenim nečistoćama [6]. Novi pristup čišćenju nekoliko godina je ostao samo u okvirima eksperimenta, najviše zbog tehnoloških ograničenja laserskih izvora koji su bili dostupni u to vreme. Tokom osamdesetih godina tehnološki nivo laserskih uređaja značajno je usavršen, ali su cene laserskog čišćenja još uvek bile visoke s obzirom na relativno malu produktivnost u poređenju sa tradicionalnim hemijskim i mehaničkim tehnikama čišćenja. Može se smatrati da je primena laserskog čišćenja artefakata započela tokom devedesetih godina prošlog veka, korišćenjem lasera različite talasne dužine, snage i dužine impulsa, a da se značajno proširila početkom 21. veka.

Laserima je moguće sprovesti čišćenje različitih vrsta materijala: kamenih površina, keramike, metala, biomaterijala kao što je recimo slonovača, starih slika, papira i pergamenta [5-12].

U dostupnoj literaturi nije pronađena metoda koja će obezbediti maksimalno efikasno i bezbedno čišćenje laserom.

Istraživanje je sprovedeno sa ciljem da se unapredi bezbednost i efikasnost laserskog čišćenja artefakata izrađenih od metala, uvođenjem infracrvene termografije za monitoring temperaturnog polja na površini artefakta koji se čisti. Ovo predstavlja bitno poboljšanje tehničko-tehnološkog procesa i neophodno je da se koristi u svim laboratorijama i konzervatorskim radionicama gde se koristi lasersko čišćenje.

2. MEHANIZMI LASERSKOG ČIŠĆENJA

Laserske metode čišćenja objekata i predmeta kulturnog nasleđa su postale nezamenjive u rešavanju najrazličitijih konzervatorskih problema. One pokazuju prednosti u odnosu na tradicionalne metode. Osobine laserske svetlosti kao što su monohromatičnost, usmerenost i koherentnost omogućile su razvoj metoda za čišćenje različitih materijala sa visokim stepenom kontrole [5-15]. Lasersko čišćenje pokazuje veliku selektivnost, preciznost i pouzdanost kod različitih vrsta materijala. Neke od prednosti laserskog čišćenja su: preciznost, selektivnost, beskontaktnost, kontrolabilnost, pouzdanost, bezbednost.

Uklanjanje nepoželjnog materijala ozračavanjem površine laserom zasniva se na razlici u apsorpciji laserskog zračenja od strane neželjenog sloja i osnovnog materijala artefakata. Ova razlika treba da bude tolika da prilikom ozračavanja površine, sloj nečistoće apsorbira lasersko zračenje i usled toga bude odstranjen,

dok podloga treba da što manje apsorbira ovo zračenje nakon uklanjanja sloja nečistoća.

Zavisno od parametara lasera i osobina materijala, debljina uklonjenog sloja može iznositi od nekoliko desetina nm do nekoliko μm . Povećavanjem fluence lasera i vremena ozračavanja generalno se povećava i količina uklonjenog materijala [13].

Jedan od najvažnijih efekata koji se može javiti na laserski ozračenim površinama, a koji dovodi do izbacivanja materijala je laserska ablacija. To je nelinearan proces koji se javlja kada fluencia (energija impulsa po jedinici površine: $F_0 = E/A$) ili u nekim slučajevima intenzitet (snaga impulsa po jedinici površine: $I_0 = P/A$) laserskog zračenja pređe prag ablacije koji je karakteristika svakog materijala.

Kada, pri delovanju lasera velike snage na materijal, fluencia lasera pređe prag ablacije, može da dođe do zagrevanja, topljenja i isparavanja materijala (topla ablacija) ili do raskidanja hemijskih veza i razbijanja materijala na manje delove (hladna ablacija). Izbačeni materijal je mešavina atoma, molekula i jona, koji se kreću velikim brzinama. Budući da materijal napušta zonu kao mešavina plazme, gasa i čvrstih čestica materijala, proces ablacije izgleda kao eksplozivno isparavanje materijala.

Specifična karakteristika procesa ablacije je da je većina apsorbovane energije raspodeljena u materijal koji se uklanja sa površine, tako da su termička oštećenja u okolini ozračene zone minimalna. Lasersko čišćenje je veoma selektivan proces. Ako je fluencia zračenja relativno niska i polako raste onda se deo materijala zagreva, topi i dolazi do isparavanja, što se može razmatrati kao linearan proces. Pri višim fluencama, mehanizam čišćenja postaje složeniji i uključuje formiranje plazme odmah iznad površine i stvaranje udarnih talasa. Ovaj mehanizam je složen i sastoji se iz brojnih termičkih, fotohemijskih i fotomehaničkih procesa [15].

Lasersko čišćenje se koristi u različitim oblastima industrije, medicine. Tako na primer, oni se koriste i u brojnim industrijskim aplikacijama kao što su čišćenje poluprovodnika u mikroelektronici, čišćenje boja kod livenja plastike pod pritiskom, čišćenje boja kod održavanja aviona, uklanjanje tetovaža i drugo.

Pored nabrojanih prednosti koje lasersko čišćenje ima u odnosu na klasične, mehaničke ili hemijske postupke, postoje i određeni nedostaci koji mogu da nanesu neprocenjive štete na artefaktima. Zbog toga su veoma aktuelna istraživanja koja doprinose da se rizici smanje i omogući efikasno i bezbedno čišćenje ovih predmeta. Najveća oštećenja su rezultat nekontrolisanog zagrevanja osnovnog materijala ozračene zone sa snažnim laserima, ili pojave udarnih talasa koji uzrokuju mehanička naprezanja, prsline i slično.

Metalni artefakti su česti muzejski eksponati. Arheološka nalazišta su izvor brojnih metalnih predmeta, najčešće su to predmeti od gvožđa, ali ima dosta mesinganih, bakarnih, srebrenih, zlatnih, bronzanih i predmeta izrađenih od različitih legura. Ovi predmeti su najčešće prekriveni slojem korozivnih produkata [16, 17].

Veoma često predmeti kulturnog nasleđa imaju složenu strukturu i izrađeni su od kombinacije različitih materijala, metal-staklo, metal-keramika, metal-tekstil [17] itd. Takvi predmeti zahtevaju poseban tretman, jer je veoma teško izabrati parametre laserskog zračenja, tako da se ukloni nepoželjan sloj, a da se ne oštete osnovni materijali koji imaju različiti koeficijent apsorpcije zračenja. Da bi se izvršilo odstranjivanje nepoželjnih slojeva, najčešće se koristi metod postupnog povećavanja snage lasera, uz promenu talasne dužine i vreme ozračavanja, dok se ne dostigne prag oštećenja. Takav pristup zahteva dosta sredstava i vremena, kao i primerke iz arheoloških studijskih zbirki, koji mogu biti uništeni dok se izaberu odgovarajući parametri.

3. MONITORING ŠIRENJA TOPLOTE

Podizanje stepena bezbednosti laserskog čišćenja artefakata integracijom infracrvene termografije za kontinualni monitoring raspodele temperature na površini objekta, za vreme ozračavanja laserom, je predloženo kao veoma efikasan metod zaštite i prevencije mogućih oštećenja.

Termografijom se mogu ispitivati termostatičke i termodinamičke pojave generisane u objektu na različite načine. Cilj termografskih ispitivanja, je da prati dinamiku termičkih efekata na površini različitih materijala koji su izloženi laserskom zračenju, s ciljem da se detaljnije ispita fenomen interakcije laserskog zračenja sa materijalima i modeliraju parametri procesa.

Merenje temperature u realnom vremenu je neophodno kako bi se obezbedili uslovi za bezbedno i efikasno uklanjanje nepoželjnih slojeva laserskim zračenjem i eliminisalo zagrevanje osnovnog materijala do stepena trajnog oštećenja.

Infracrvena (IC) termografija je tehnika pomoću koje se može snimiti toplotno zračenje objekta i vizuelizirati temperaturna raspodela po površini objekta u vidu termograma. Izvodi se pomoću infracrvene kamere. Toplotno zračenje spada u elektromagnetno zračenje koje se emituje kao posledica oscilovanja čestica koje ulaze u sastav materijala objekta. Ovo zračenje emituje svaki objekat čija je temperatura viša od apsolutne nule ($-273,15^{\circ}\text{C}$), a količina zračenja raste sa porastom temperature. Generisanje toplote u telu može biti rezultat različitih spoljnih i unutrašnjih procesa, a brzina prenosa toplote kroz telo zavisi od

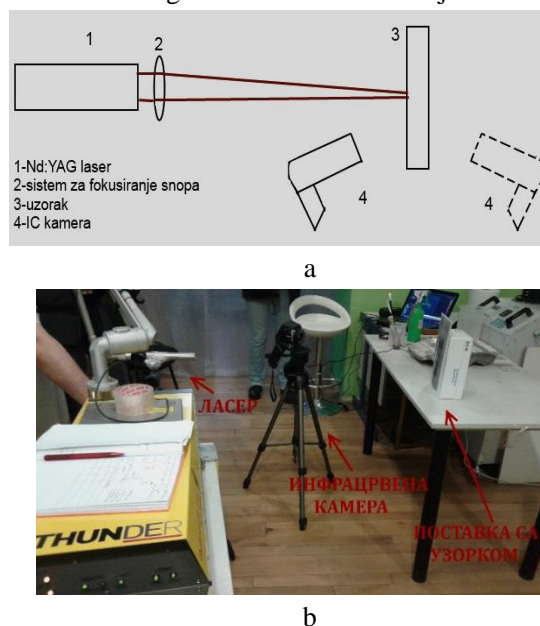
veliĉine i mase pojedinih molekula kao i sila koje meĊu njima vladaju i karakteristiĉna je za svako telo [18-21].

Termogram daje jasnu termiĉku sliku predmeta. Slika je najĉešće u boji (u nijansama boja) ili skali sivih tonova. Razliĉitim temperaturama pri tome odgovaraju razliĉite boje i nijanse boja. Sa snimka se mogu kvantitativno odrediti i temperature u izabranim taĉkama, pomoću alata koji su ugraĊeni u softver za obradu termograma.

Termografska ispitivanja primenjuju se svuda gde je odreĊivanje temperaturne raspodele korisno za procenu ili predviĊanje odreĊenih fenomena ili za otkrivanje karakteristika ispitivanih objekata. IC termografija je od velikog znaĉaja u ispitivanjima koja se vrše u okviru kulturnog nasleĊa. Ona se moĝe koristiti kod ispitivanja strukture istorijskih objekata, njihove termiĉke izolacije, za otkrivanje sakrivenih defekata ispod gipsa ili mozaika, za mapiranje prisutnog raslojavanja, u ispitivanju elektriĉnih instalacija na objektima, otkrivanju sadrĝaja slojeva na slikama i freskama, koji su prekriveni itd. [19-21].

4. EKSPERIMENT

Na slici 1a i 1b su prikazani šema i fotografija eksperimentalne postavke laserskog čišćenja u laboratorijama Centralnog instituta za konzervaciju.



Slika 1 - Eksperimentalna postavka termografskog ispitivanja uzorka tokom ozračavanja laserom u Centralnom institutu za konzervaciju u Beogradu, a-šematski prikaz, b-fotografija

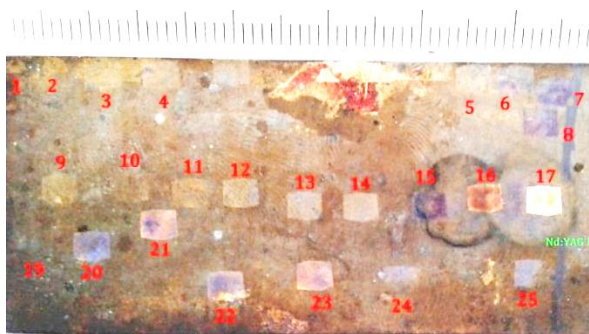
Komercijalni Nd:YAG laser, Thunder Art Laser, proizvod firme Quanta System je korišćen za uklanjanje nepoželjnih slojeva na uzorcima razliĉitog sastava. Karakteristike ovog lasera su: $\lambda=1054, 532$ i

355 nm; dužina impulsa <8 ns; Energija impulsa se može menjati do vrednosti koja zavisi od talasne dužine laserskog snopa: do 1000 mJ (za $\lambda=1054$ nm), do 550 mJ ($\lambda=532$ nm) i do 200 mJ za ($\lambda=355$ nm). Repetitivnost može da se menja od 1 do 20 Hz, prečnik laserskog snopa je 10 mm. Laser radi u Q-switch režimu sa Gausovom raspodelom energije. Ovaj laser ima pokretnu ručicu kroz koju se pomoću 7 ogledala laserski snop usmerava na površinu uzorka. Ovim je omogućeno usmeravanje snopa na površini uzorka pod različitim uglovima i sa različite udaljenosti. Repetitivnost lasera je menjana od 1-20 Hz, kako bi se ispitala zavisnost stepena uklanjanja površinskih slojeva od frekvencije laserskih impulsa. Korištene su tri talasne dužine, a energija je menjana od 100 do 750 mJ.

Infracrvena kamera se postavlja, ispred uzorka kada se snima promena temperature na površini uzorka na koju dolazi snop lasera, ili iza uzorka, kada se detektuje raspodela temperature na suprotnoj (zadnjoj) strani uzorka. Snimani su termogrami kao pojedine sekvence (singl shot mode) i kontinuirani zapisi kako bi se pratila promena temperature u vremenu. Iz kontinuiranog zapisa izdvojeni su termogrami i analizirani odgovarajućim softverom.

Termografski su snimani tokom laserskog čišćenja uzorci od metala, keramike i tekstila. Izabrani materijali su različitih termalnih karakteristika i veoma često se sreću u izradi predmeta kulturne baštine.

Mesingana pločica, nepoznate starosti, sa vidljivim korozionim naslagama, čišćena Nd:YAG laserom je prikazana na slici 2, a eksperimentalni uslovi u tabeli 1.



Slika 2 - Mesingana pločica sa zonama čišćenim laserom

U eksperimentalnim istraživanjima je korišćena infracrvena kamera marke FLIR E40. Karakteristike kamere FLIR E40 su: rezolucija 160 x 120, ukupan broj piksela 19.200, termalna osetljivost < 0.07°C, tačnost merenja +/- 2% ili 2°C, temperaturni opseg od -20°C do 650°C, optika standardna 25° x 19°, nehlađeni bolometar, frekvencija snimanja 30Hz, fokus ručni, digitalni zum 1-2x kontinuirani, kolor LCD „tač ekran“. Moguće je snimanje radiometrijskih slika u JPG formatu na SD karticu i MPEG4 video snimanje. Kamera

može da snimke prikazuje u sledećim režimima: Thermal MSX (Multispektralna slika), Thermal, Picture in picture ili Digital camera.

Softverom, koji se koristi uz IC kameru, obuhvaćeni su akvizicija, obrada i prezentacija rezultata termografskih ispitivanja. Jedan od najjednostavnijih softverskih paketa je FLIR Tools 5.0, koji je korišćen za brzi pregled rezultata i ResearchIR max 4.3 za detaljniju analizu termografskih snimaka. Osnovna namena ovog programa je za obradu termograma u realnom vremenu, međutim, program može da radi obradu termograma i sa drugih medija kao što je PC hard disk.

Termogrami se mogu obrađivati na nekoliko načina. Na raspolaganju su različiti alati. Na uzorku mogu da se identifikuju tačke sa istom temperaturom (izoterme), dvostruke izoterme, temperaturne raspodele u okviru zadanog područja (area) pomoću linija ili tačaka. Rezultati dobijeni primenom ovih alata mogu se na ekranu prikazati zajedno sa termogramom i to: prozor u kom je prikazan termogram sa traženim profilom temperatura, prozor u kom je prikazan histogram, tabela u kojoj su navedeni osnovni rezultati, te prozor u kom je prikazan vremenski dijagram. Rezultati merenja mogu se takođe povezati ili obraditi različitim podprogramima.

Preliminarna istraživanja su pokazala da se dobri rezultati postižu ako se snima kontinuirani termografski zapis, koji može u realnom vremenu da prati promenu temperature sa izabranim alatima softvera ResearchIR. Postojeća postavka omogućava analizu pojava u odnosu na vreme koje pokazuje kamera u trenutku prvog laserskog impulsa, snimak koji je uzet u trenutku uključenja lasera. Uslovno se uzima da je to vreme $t=0$ s.

5. REZULTATI TERMOGRAFSKOG MONITORINGA TEMPERATURE TOKOM LASERSKOG ČIŠĆENJA

Termografija je uključena sa ciljem da se odredi temperatura na osnovnom materijalu uzorka koji se laserski čisti, a ne na sloju koji se uklanja. Sinhronizacija nije uključena, jer je zapis temperaturne raspodele kontinuirano sniman pre, za vreme i posle delovanja laserom. Određivanje maksimalne temperature u ozračenoj zoni je od bitnog značaja za predikcije mehaničkih, morfoloških i hemijskih promena koji mogu nastati tokom delovanja laserom.

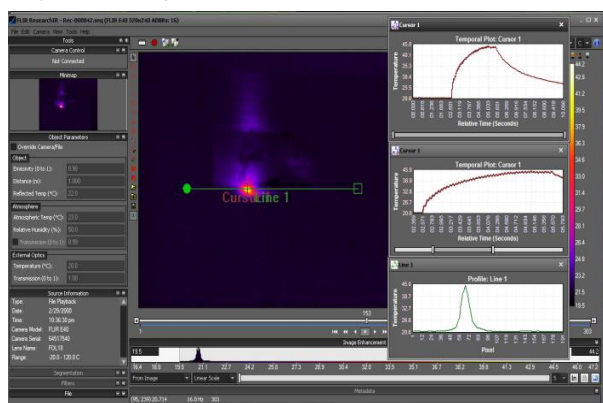
Rezultati eksperimentalnih ispitivanja su prikazani pomoću termograma, dijagrama zavisnosti promene temperatura u izabranom delu snimka (alatka box, linija ili tačka) i vremenska zavisnost temperature u izabranoj tački (plot funkcija). U tabeli 1 su date vrednosti maksimalne temperature za deo snimljenih termograma.

Tabela 1. Parametri eksperimenta

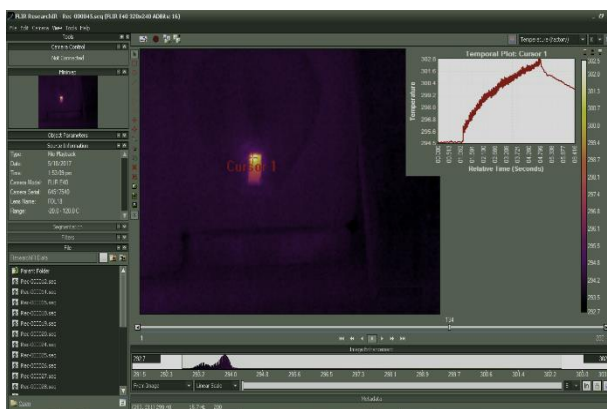
Pozicija kamere	λ (nm)	E (mJ)	N (Hz)	t(s)	Tmax (K)	Broj termograma
Mp prednja	1064	750	15	3	317.3	000042
Mp zadnja	1064	750	15	3	299.3	000043
Mp prednja	1064	450	15	3	297.2	000044
Mp prednja	532	375	15	3	302.5	000045
Mp prednja	532	190	15	3	295.4	000047
Mp prednja	355	200	15	3	295.5	000048

Analiza termograma snimljenih termovizijskom kamerom je vršena ResearchIR softverom. Kao primer su prikazane analize termograma 000042 (slika 3), i termogram 000045 (slika 4).

Prikazani su i dijagrami koji opisuju vremensku zavisnost u tački gde je postignuta maksimalna temperatura, kao i raspodela temperature po izabranoj liniji za termogram 00042.



Slika 3 - Analiza termograma 00042 ResearchIR softverom



Slika 4 - Analiza termograma 00045 ResearchIR softverom

Do većeg zagrevanja osnovnog materijala je došlo u zoni očišćenju sa talasnom dužinom $\lambda = 1064$ nm.

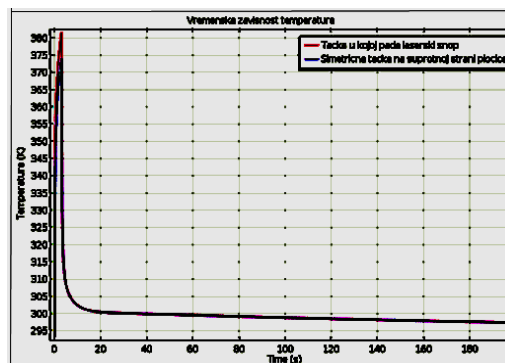
6. VERIFIKACIJA REZULTATA NUMERIČKOM METODOM

Opravdanost uvođenja termografije u monitoring raspodele temperature na površini objekta koji se laserski čisti je verifikovana numeričkom metodom simulacije raspodele temperature za parametre eksperimenta. U simulaciji je korišćena metoda konačnih elemenata (eng. FEM) i modul Heat Transfer in Solid, tj. modul za transport toplote u čvrstim telima. Ovaj modul obuhvata razmenu toplote kondukcijom [22, 23]. 3D model prostorne raspodele je simuliran za četvrtaste pločice od mesinga dimenzija 7,5x3x0,05 cm.

Osobine materijala koje su korišćene u modelu obuhvataju koeficijent absorpcije, refleksije, specifični toplotni kapacitet, koeficijent toplotne provodljivosti za talasnu dužinu laserskog zračenja u infracrvenoj oblasti (1064 nm). Karakteristike za mesing leguru C2600 su: gustina $\rho=8530$, kg/m³, koeficijent toplotne provodljivosti 121.2W/mK, specifični toplotni kapacitet $C_p=377.1$, J/kgK, temperatura topljenja, $T_t=916^\circ\text{C}$ i koeficijent refleksije $R=0.89$. Mreža konačnih elemenata sastoji se od 8945 tetraedarskih elemenata i 320 ivičnih elemenata. Modelovan laserski snop ima energiju prostornog oblika Gausove krive i standardne devijacije.

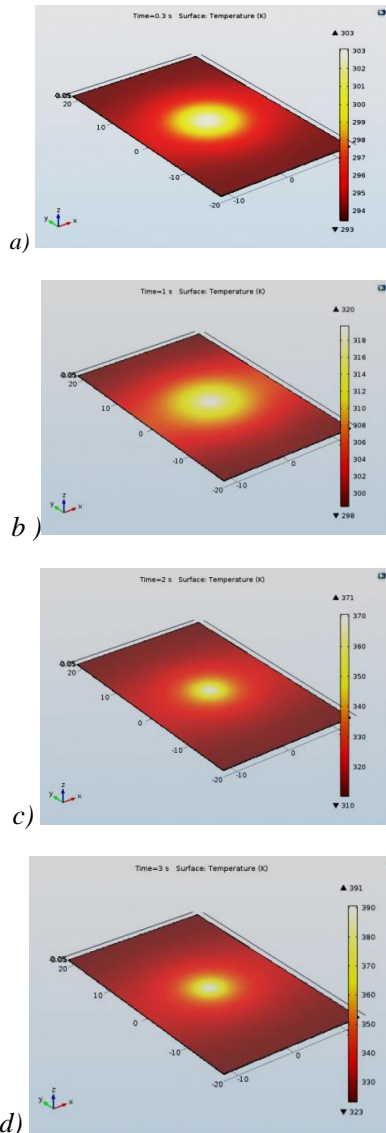
Prema dostupnoj literaturi [5, 7, 9, 22] smatra se da do površine koja se laserski čisti, stigne između 10-20% ukupne energije. Parametri lasera koji su korišćeni u simulaciji su: talasna dužina $\lambda=1064$ nm, energija laserskog snopa $E=750$ mJ, repeticija 15 Hz, vreme ozračavanja 3 s, trajanje impulsa 8 ns. Rezultati su predstavljeni na slikama 5-7.

Maksimalna temperatura, dobijena numeričkom simulacijom, koja se postiže delovanjem laserskog snopa na pločicu od mesinga je 386 K (slika 5). Toplota se ravnomerno širi od centra ozračenog zone ka periferiji (slika 6). Promena temperature površine mesingane pločice u toku ozračavanja, u tački u kojoj se dostiže maksimalna temperatura, predstavljena je na slici 6.

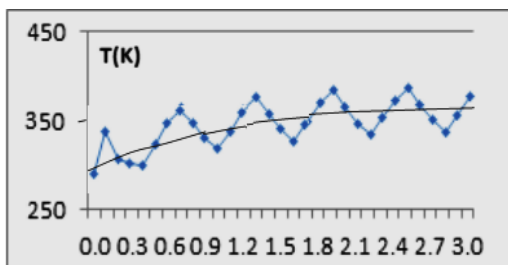


Slika 5 - Vremenski dijagram promene T tokom delovanja laserskim impulsima i u periodu hlađenja

Temperatura postepeno raste do maksimalne vrednosti, na taj način da sa svakim impulsom raste i opada da bi sa sledećim impulsom dostigla još veću vrednost (slika 7).

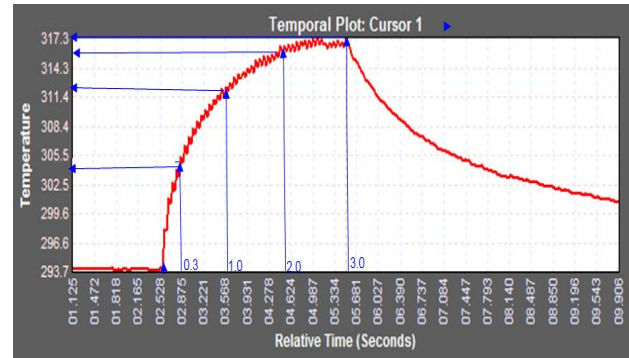


Slika 6 - Numerička simulacija širenja toplote u i oko zone delovanja laserskim zračenjem u vremenu $t=0.3(a), 1(b), 2(c)$ i $3s(d)$.



Slika 7 - Numerička simulacija vremenske promene temperature u centru zone na površini pločice u funkciji vremena (momentalna i usrednjena vrednost)

Na slici 8 je prikazana vremenska zavisnost porasta temperature zabeležena termografskom kamerom. U tabeli 2 su date eksperimentalne vrednosti maksimalne temperature T_{term} pročitane sa dijagrama na slici 8 i vrednosti dobijene numeričkom simulacijom za mesinganu pločicu T_{num} . U prvoj sekundi postoji idealno podudaranje eksperimentalnih i numeričkih vrednosti, jer je razlika ispod 3%.



Slika 8 - Porast temperature osnovnog materijala tokom ozračavanja (termogram 00042)

Tabela 3. Eksperimentalno i numerički dobijene vrednosti temperatura za vreme delovanja laserom

Vreme (s)	0.0	0.3	1.0	2.0	3.0
T					
T_{num}	294	303.0	320.0	371.0	386.0
T_{term}	293.7	304.2	312.2	315.8	317.3
$\Delta T, K$	0	1.2	7.8	55.2	68.7
$\Delta T \%$	0	0.4	2.5	17.5	21.7

Veće razlike u eksperimentalnim i numeričkim rezultatima se dobijaju u nastavku procesa čišćenja laserom i na kraju treće sekunde iznose preko 20%. Ova razlika je rezultat modelovanja numeričke simulacije, u kojoj se proces razmatra sa fiksnim, početno definisanim parametrima, a u realnom eksperimentu, karakteristike materijala se menjaju, kao i procenat apsorbovane energije laserskog snopa u oblaku plazme ispred zone čišćenja.

Pri komparativnoj analizi rezultata eksperimenta i numeričkih simulacija treba da se ima u vidu da je proces interakcije materijala i laserskog snopa sa velikom energijom nelinearan i da se obrazuje plazma u neposrednoj blizini površine ozračen laserom, koja takođe utiče na porast temperature.

7. ZAKLJUČAK

Istraživanja koja su sprovedena eksperimentalnim i numeričkim metodama pokazuju da je optimizacija

bezbednosti laserskog čišćenja objekata kulturnog nasleđa izrađenih od različitog materijala moguća uvođenjem infracrvene termografije. U ovom radu su prikazani rezultati monitoringa temperature tokom čišćenja korozivnih naslaga na metalnoj, mesinganoj pločici.

Imajući u vidu da je termografija korišćena sa ciljem da se odredi temperatura na osnovnom materijalu uzorka koji se laserski čisti, a ne na sloju koji se uklanja, nedostatak sinhronizacije nije uticao na određivanje maksimalnih temperatura na uzorku i na određivanje širine zone uticaja toplote koja se generiše u materijalu. IC kamera, koja je uključena u eksperiment, sa prikazanim karakteristikama je zadovoljila postavljene zahteve. Za praćenje procesa ablacije neophodno je uključiti brze kamere, sa širim temperaturnim opsegom i sinhronizovane sa laserom.

Monitoring i merenje maksimalne temperature u ozračenju zoni je od bitnog značaja za određivanje praga ablacije i praga oštećenja. Rezultati ispitivanja pokazuju prednosti termografije kao beskontaktna, nedestruktivne metode ispitivanja širenja toplote u realnom vremenu. Posebno je važno određivanje opsega bezbednog čišćenja za predmete koji su kombinacija različitih materijala.

8. ZAHVALNICA

Autori se zahvaljuju MPNTR RS za finansijsku podršku kroz projekat TR 34028.

LITERATURA

- [1] Tornari V. et al, Modern technology in artwork conservation: a laser-based approach for process control and evaluation, *Optics and Lasers in Engineering* 34, pp. 309 – 325, 2000.
- [2] Polić S, Ristić S, Jegdić B, Nikolić Z, *Metodološki i tehnički aspekti primene novih tehnika u zaštiti kulturne baštine*, Institut GOŠA i Centralni institut za konzervaciju, Beograd, 2010.
- [3] Rogerio-Candelera, M. A. Lazzari, M. Cano E, *Science and Technology for the Conservation of Cultural Heritage*, CRC Press, Taylor and Francis Group, London, UK, 2013.
- [4] May E, Jones M. (Eds), *Conservation Science Heritage Materials*, The Royal Society of Chemistry, Cambridge CB4 0WF, UK, 2005.
- [5] Fotakis C. et al, *Lasers in the Preservation of Cultural Heritage: Principles and Applications*, CRC Press, 2005.
- [6] Asmus J, Seracini M, Zetler M. J, *Surface morphology of laser-cleaned stone*, Lithoclastia Vol. 1975, Issue 1, pp23-45, 1975,.
- [7] Cooper M, *Laser Cleaning in Conservation: An Introduction*, Butterworth-Heinemann, Oxford, 1998.
- [8] Polić-Radovanović S, *Primena lasera u obradi, zaštiti i dijagnostiranju materijala predmeta kulturne baštine*, Beograd, Univerzitet u Beogradu, doktorska disertacija, 2007.
- [9] Koh Y. S, *Laser Cleaning as a Conservation Technique for Corroded Metal Artifacts*, Doctoral Thesis, Luleå, Sweden, December 2005.
- [10] Polić-Radovanović S, Ristić S, Stasić J, Trtica M, A study of Roman glass from Mala Barutana/Belgrade irradiated with pulsed CO₂, Nd:YAG and ruby laser – comparison, *Journal of Non-Crystalline Solids*, Vol. 358, 22, pp. 3048-3056, 2012.
- [11] Degriygn C, Tanguy Le Gall R, Zafiropulos V, Marakis G, Laser E. cleaning of tarnished silver and copper threads in museum textiles, *Journal of Cultural Heritage*, Elsevier, pp.152-155, 2003.
- [12] Polić S, Ristić S, Stasić 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, 1, pp 85–100, 2015.
- [13] Gaspar P, Kearns A, Vilar R, Watkins K, Malhoa Gomes M. M, A Study of the Effect of Wavelength on Q-Switched Nd:YAG Laser Cleaning of Eighteenth-Century Portuguese Tiles, *Studies in Conservation*, Vol. 45, No. 3, pp. 189-200, 2000.
- [14] 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, pp. 128-137, 2017.
- [15] Schreiner M, M. Strlic (Eds.), *Handbook on the Use of Lasers in Conservation and Conservation Science*, Brussels, Belgium: COST Office, 2008, <http://www.science4heritage.org/COSTG7/booklet/>, on web 1st august, 2015.
- [16] Jegdić B, Polić-Radovanović S, Ristić S, Alil A, Corrosion stability of corrosion products on an archaeological iron artifact, *International Journal Of Conservation science*, Vol. 3, 4, pp.241-248, 2012.
- [17] 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, , pp.157s–161s, 2003.
- [18] Chapman A. J, *Fundamentals of Heat Transfer*. First ed., New York, Macmillan Publishing Company, pp.745, 1987.

- [19] Siegel R. and Howell J. R., *Thermal radiation heat transfer. Second ed. Series in thermal and fluids engineering*, ed. J.P. Hartnett., Washington, Hemisphere Publishing Corporation, 1992.
- [20] Ristić S, Polić-Radovanović S, Termografija u zaštiti kulturne baštine, Institut Goša, Beograd, 2013.
- [21] Carlomagno G. M, Di Maio R, Fedi M, Meola C, Integration of infrared thermography and high-frequency electromagnetic methods in archaeological surveys, *Journal of Geophysics and Engineering*, Vol.8, 3, S93, 2011.
- [22] Radojković B, Fizičko-mehaničke i mikrohemijske promene na površinama keramičkih i metalnih artefakata tretiranih laserom, doktorska disertacija TMF, Univerzitet u Beogradu, 2017.
- [23] Janićijević M. i dr. Characterization of laser beam interaction with carbon materials, *LASER PHYSICS*, Vol. 23 br. 5, pp. 1-12, 2013.

SUMMARY

SECURITY OPTIMIZATION OF ARTEFACTS LASER CLEANING

Laser techniques have become irreplaceable in solving a wide variety of conservation problems. For the last thirty years, lasers have been used in the diagnostic process, in the process of removing undesirable layers, as well as in repairing damages of cultural heritage objects. Because of the complexity of artifacts, traditional cleaning methods in many cases have partial success. Laser cleaning shows certain advantages such as: high selectivity, precision, efficiency and reliability in application in different types of materials. There are also certain risks for cleaning objects, and the studies of process optimization are the subject of a number of researches. This paper presents the methodology and results of the application of infrared thermography for the continuous monitoring of temperature distribution on the surface of metal objects during laser irradiation. A large number of experiments were performed using Nd: YAG laser for cleaning. The obtained results were verified by the results of the numerical simulation of heat propagation in the base material. It has been shown that infrared thermography can eliminate damage to the base material, which is of special importance in the laser cleaning of priceless value artifact.

Key words: *laser cleaning, artefact, IR thermography, numerical simulation*