

Termografija u kontroli efikasnosti i bezbednosti laserskog čišćenja

SLAVICA R. RISTIĆ, Centralni institut za konzervaciju, Beograd

SUZANA R. POLIĆ, Centralni institut za konzervaciju, Beograd

DRAGAN M. KNJEŽEVIĆ, Vojnotehnički institut, Beograd

BOJANA M. RADOJKOVIĆ, Institut za hemiju, tehnologiju i metalurgiju, Beograd

SUZANA LJ. LINIĆ, Univerzitet u Beogradu, Inovacioni centar Mašinskog fakulteta, Beograd

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

Originalni naučni rad

UDC: 621.375.826

DOI: 10.5937/tehnika1905623R

Inovativna tehnologija laserskog čišćenja različitih površina u industriji, uključuje integrisani pristup kontrole procesa interakcije laser-materijal i ispitivanja rezultata laserskog delovanja. Lasersko čišćenje ima značajne prednosti u odnosu na klasične metode čišćenja: ima veliku selektivnost, preciznost, efikasnost i pouzdanost u primeni kod različitih vrsta materijala. Termalna priroda procesa laserskog čišćenja unosi određeni rizik po predmete čišćenja, te su istraživanja optimizacije procesa u fokusu interesovanja velikog broja naučnika. U radu su prikazani rezultati laserskog čišćenja boje na bakarnoj površini i zaštitnog sloja na štampanoj pločici. Kontrola procesa laserskog čišćenja u realnom vremenu je vršena pomoću infracrvene kamere. Mikromorfološke promene čišćene površine su ispitivani optičkom mikroskopijom.

Ključne reči: lasersko čišćenje, Nd:YAG laser, bakar, štampana pločica, IC termografija, optička mikroskopija

1. UVOD

Lasери, kao izvori snažnog, koherentnog i monohromatskog zračenja, našli su široku primenu u industriji. Koriste se u dijagnostičkim metodama, ali i kao alati u proizvodnim pogonima [1, 2].

Značajna oblast primene lasera je čišćenje i uklanjanje nepoželjnih slojeva sa površina različitih objekata (od nanometarskih do većih dimenzija). Lasersko čišćenje odlikuje se jedinstvenom karakteristikom: uklanjanje nečistoću sa površine bez kontakta sa osnovnim materijalom. Uklanjanje nepoželjnog materijala sa površine laserom zasniva se na razlici u apsorpciji laserskog zračenja.

Lasersko odstranjivanje površinskih slojeva je ekološki prihvatljivije u poređenju sa konvencionalnim metodama [3]. Iako je primena lasera u ovoj oblasti počela pre nekoliko decenija, neophodna su dalja ispitivanja s ciljem optimizacije procesa laserskog čišćenja. Upotreba lasera u čišćenju površinskih slojeva zahteva izbor odgovarajućih parametara lasera

kako bi se obezbedilo efikasno, precizno, selektivno, kontrolisano i bezbedno čišćenje predmeta [4-22].

Bakar je metal koji se milenijumima koristi u najrazličitije svrhe, a danas je nezamenjiv u elektronici, kompjuterskoj industriji, energetici, građevinarstvu i medicini.

Mnogobrojni predmeti kulturnog nasleđa su izrađeni od bakra ili njegovih legura, bronzе i mesinga. Lasersko čišćenje bakarnih površina je veoma značajno sa više aspekata, a kod nas je veoma malo ili uopšte nije zastupljeno [11, 13, 15, 19].

Jedan od najvažnijih parametara koji treba da se prati u toku interakcije laserskog zračenja sa materijalima je temperatura koja se generiše u osnovnom materijalu i širina zone uticaja toplote.

Od toga zavisi da li će biti uticaja na osnovni materijal i da li će laser uzrokovati neželjene promene. Postoje različite metode monitoringa laserskog čišćenja metalnih uzoraka [2, 8, 10, 19-22].

U ovom radu su prikazani rezultati termografskog praćenja temperature uzorka (bakarna pločica sa crnom farbom i štampane pločice) tokom laserskog čišćenja. Korišćene su dve kamere Flir E40 i SC7200. Karakterizacija mikrostrukturnih promena na površinama čišćenih laserom vršena je optičkom mikroskopijom.

Adresa autora: Slavica Ristić, Centralni institut za konzervaciju, Beograd, Terazije 26

e-mail: slavce@yahoo.com

Rad primljen: 06.08.2019.

Rad prihvaćen: 10.09.2019.

2. MEHANIZMI INTERAKCIJE LASER-MATERIJAL

Razumevanje osnovnih procesa interakcije laser-materijal neophodno je za uspešnu primenu laserskih metoda. To je veoma složen proces kod kojeg istovremeno učestvuju optički, mehanički, termički i hemijski fenomeni. Koji tip interakcije će se pojaviti zavisi od velikog broja faktora vezanih za laserske parametre i za karakteristike materijala koji je ozračen [1, 2, 5, 15]. Najznačajniji parametri lasera su: gustina energije laserskog snopa (fluencia), trajanje ozračavanja ili dužina impulsa t , frekvencija impulsa, talasna dužina λ , i raspodela energije unutar snopa, dok su koeficijenti refleksije i absorpcije zračenja, hemijske i fizičke osobine površine, njena topologija na mikro i nano nivou, homogenost, temperaturni koeficijent, temperatura topljenja i temperatura ključanja karakteristike koje se odnose na materijal. Između drugih parametara značajan uticaj na absorpciju laserskog zračenja imaju temperatura površine, upadni ugao laserskog snopa u odnosu na površinu predmeta, kao i atmosfera u kojoj se vrši interakcija.

Ukoliko laserska svetlost ne bude absorbovana od strane materijala neće doći ni do promena u materijalu. Ukoliko se lasersko zračenje absorbuje, dolazi do pojave različitih promena u materijalu (na primer može da dođe do povećanja temperature ozračenog površine kada toplotni talasi prodiru unutar materijala). U zavisnosti od absorpcije i vrednosti temperature ozračenog sloja, dolazi do nekoliko fizičkih mehanizama koji mogu dovesti do uklanjanja sloja nečistoća. Zagrevanje može biti nehomogeno što dovodi do neravnog širenja i pucanja krto materijala. Temperatura površine može dostići vrednost temperature topljenja pri čemu se stvara tanak sloj rastopljenog materijala, ili temperaturu raskidanja molekulskih veza, te se menja hemijski sastav, a može doći i do isparavanja materijala.

Tehnike čišćenja laserskim metodama temelje se na razlici između koeficijentata absorpcije (laserskog zračenja) sloja koji se želi odstraniti i podloge. Absorpcija zračenja u sloju koji se odstranjuje dovodi do brzog porasta temperature i trenutnog zagrevanja. Zagrejan sloj se termički širi i stvara se napon koji je dovoljan da dovede do odvajanja i uklanjanja površinskog sloja objekta, odnosno do ablacije.

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 doći do tople ablacije (zagrevanja, topljenja i isparavanja materijala) ili do hladne ablacije (raskidanja hemijskih

veza i razbijanja materijala na manje delove). Izbačeni delovi materijala se kreću velikim brzinama i dovode do eksplozivnog isparavanja materijala. Pri tom postoji mogućnost formiranja plazme neposredno uz površinu uzorka i stvaranja udarnog talasa usled nagle ekspanzije. Ovaj proces traje veoma kratko i reda je veličine trajanja laserskog impulsa (fs do μ s). Najveći deo apsorbovane energije laserskih impulsa se troši u procesu ablacije. S obzirom na to da je vreme indukovanja i širenja toplotne energije u osnovni materijal kratko, zona uticaja toplote je mala i ne bi trebalo da se pojave oštećenja u osnovnom materijalu [1, 2, 11, 15].

Međutim, kada se laser koristi za površinsku obradu ili za čišćenje mikro regija, pogotovo kada su predmeti složenog sastava, onda je neophodna stroga kontrola i monitoring zone uticaja toplote indukovane laserom.

3. TERMOGRAFSKI MONITORING ŠIRENJA LASERSKI INDUKOVANE TOPLOTE

U literaturi se mogu naći podaci o primeni različitih metoda za praćenje procesa laserskog čišćenja [4, 11, 20, 22]. Autori ovog rada su koristili termografiju za praćenje procesa čišćenja savremene i arheološke keramike [11, 15], kao i korozivnih produkata na mesinganoj pločici [19].

Infracrvena (IC) termografija je bezkontaktna metoda ispitivanja, koja ima sve veću primenu u naučnim laboratorijama, industriji, građevinarstvu, medicini. Najjednostavnije se može definisati kao tehnika pomoću koje se registruje IC zračenje, karakteristično za svaki objekat, čija temperatura je iznad apsolutne nule [21]. Ovom tehnikom toplotno zračenje objekta se vizuelizira i prikazuje u vidu termograma. Termogram daje jasnu termičku sliku predmeta. Slika je najčešće u boji ili skali sivih tonova. Pomoću alata koji su ugrađeni u softver za obradu termograma, sa snimka se može kvantitativno odrediti temperatura u izabranim tačkama ili pratiti promena temperature u vremenu.

4. EKSPERIMENT

Na slici 1 prikazana je fotografija eksperimentalne postavke laserskog čišćenja. Koristi se komercijalni Nd:YAG laser (sl 1, oznaka 1), Thunder Art Laser, proizvod firme Quanta System. Karakteristike ovog lasera su: $\lambda = 1064, 532$ 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 $\lambda=1064$ nm), do 550 mJ ($\lambda=532$ nm) i do 200 mJ za ($\lambda=355$ nm). Repeticija 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. Laser ima pokretnu ručicu sa sistemom ogledala i sočiva za usmeravanje i fokusiranje laserskog snopa. Korištene su tri talasne dužine, a energija je menjana od 100 do 750 mJ.

Infracrvene kamere se postavljaju, ispred uzorka (slika 1, oznaka 2) 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.

Uzorak je postavljen ispred fokusa laserskog snopa, u ravni gde laserski spot ima prečnik od 3 mm. Snimani su termogrami kao pojedine sekvence (singl shot mode) i kontinuirani zapisi, kako bi se pratila promena temperature u vremenu. Iz kontinualnog zapisa izdvojeni su i analizirani termogrami.

U eksperimentalnim istraživanjima je korišćena infracrvena kamera marke FLIR E40 laser (sl 1, oznaka 3). Karakteristike kamere FLIR E40 su opisane u citiranoj literaturi [11, 19, 21].

Softverski paket ResearchIR max 4.3 se koristio za detaljniju analizu i prezentaciju termografskih snimaka.



Slika 1 - Eksperimentalna postavka

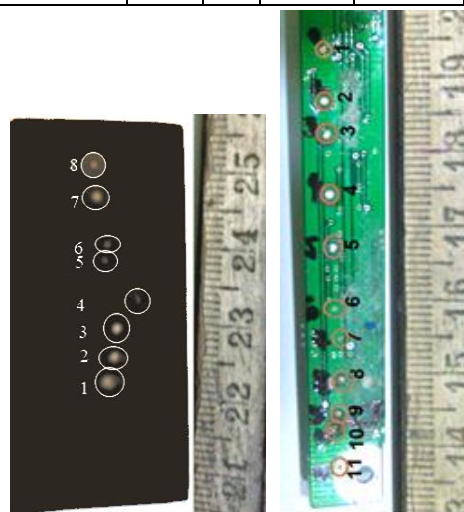
Kamera SC7200 (slika 1, oznaka 4) spada u red najnovijih kamera namenjenih naučnim istraživanjima. Kada se snima 178 slika u sekundi rezolucija je 320×256 px, za 1000 iznosi 64×120 px, a za 10000 slika u sekundi 64×8 px.

Ova kamera može da meri temperature u nekoliko opsega, i to u zavisnosti od filtera: 5 - 300 °C, 300 - 1500 °C i 1500 - 2500 °C. Vreme integracije može da se menja u opsegu 3-20000 μ s. Ova kamera je opremljena InSb senzorom, sa spektralnim opsegom 1,5 - 5,1 μ m. Osetljivost kamere je 20 mK. Dimenzije piksela 30×30 μ m. Koristi četiri pozicije filtera i ima tačnost merenja temperature ± 1 °C.

U tabeli 1 su dati uslovi eksperimenta koji se odvijao u uslovima pri standardnoj atmosferi. Na slici 2 su dati uzorci sa zonama koje su laserski čišćene, bakarna pločica sa crnom farbom (a) i višeslojna štampana pločica (b).

Tabela 1. Eksperimentalni uslovi laserskog čišćenja

Broj mete	f, Hz	t, s	E (mJ)	λ , nm
Bakarna pločica sa crnom farbom				
1	20	5	520	1064
2	20	5	380	1064
3	20	5	200	1064
4	20	5	100	532
5	20	5	190	532
6	20	5	190	532
7	20	5	260	532
8	20	5	160	355
Štampana pločica sa zaštitnom prevlakom				
2	20	5	170	1064
3	20	5	380	1064
4	20	5	520	1064
5	10	5	520	1064
6	20	10	160	1064
7	20	5	160	1064
8	20	15	160	1064
11	20	15	170	532



Slika 2 - Zone laserskog čišćenja crne boje i zaštitnog sloja na štampanoj pločici

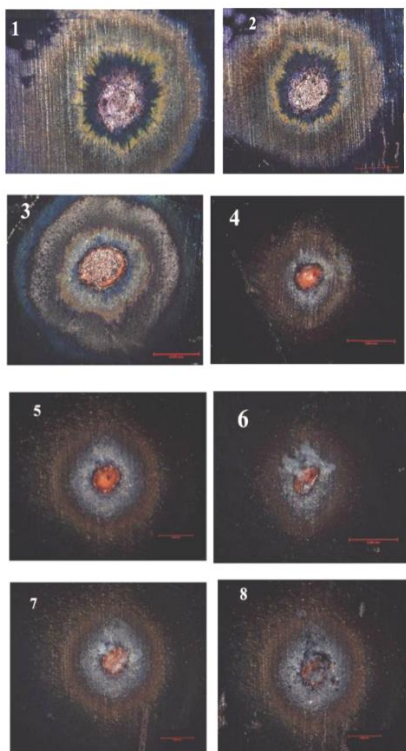
5. ANALIZA REZULTATA

Rezultati čišćenja crne farbe i zaštitnog sloja, laka, prikazani su snimcima dobijenim optičkom mikroskopijom (Olympus CX41) sa uvećanjem $150\times$. Izaбран je i određen broj termograma koji ilustruju rezultate dobijene IC kamerama, a temperaturne promene su prikazane dijagramima u funkciji vremena, talasne dužine i frekvencije lasera.

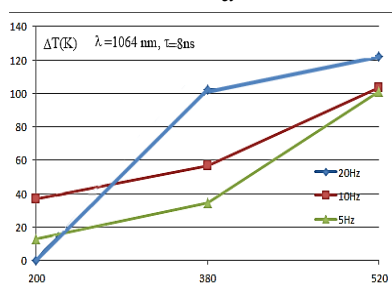
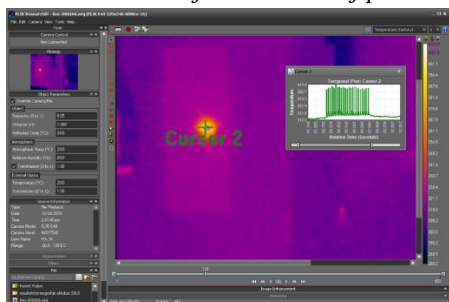
5.1 Bakarna pločica sa crnom farbom

Slika 3 prikazuje promene koje su nastale na bakarnoj pločici u zonama 1-8. Evidentno je da su osim

odstranjivanje sloja boje, nastale i promene na osnovnom materijalu. U centralnim delovima očišćenih zona, laserski snop sa energijom iznad 200 mJ (fluencom iznad 2.8 J/cm²) je istopio osnovni materijal, odnosno bakar. Zona uticaja toplote je šira od laserskog spota i zbog zagrevanja u svim zonama je došlo do oksidisanja bakra i do promena boje.



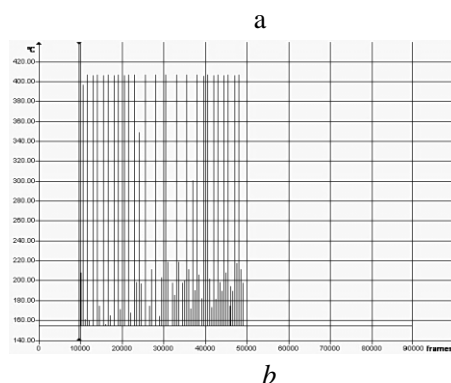
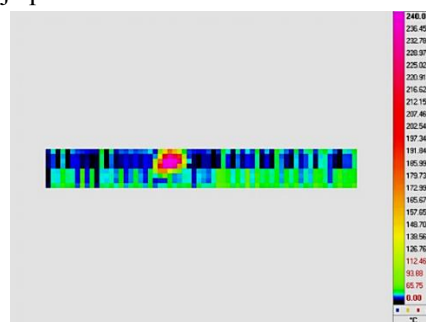
Slika 3- Zone čišćenja na bakarnoj ploči



Slika 4 - a) Termogram snimljen tokom čišćenja bakarne ploče sa crnom bojom, b) Promena temperature u funkciji energije i frekvencije

Termogram snimljen kamerom E40 za zonu 1, tretiranu sa fluencom 7.4 J/cm², je dat na slici 4a. Prikazana je radna površina u softveru ResearchIR, sa vremenskim prozorom gde se vidi vremenska zavisnost efektivne temperature u tački obeleženoj kursorom. Slika 4b ilustruje promenu temperature u funkciji energije i frekvencije. Maksimalno izmerena temperatura iznosi 413 K dok je povećanje temperature površine bakarne pločice $\Delta T=120$ K u odnosu na početne uslove.

Povećanje energije i frekvencije laserskog impulsa dovodi do povećanja temperature, efikasnijeg čišćenja boje, ali i, ako je energija iznad praga oštećenja, do oštećenja površine bakra.



Slika 5 - Termogram i vremenski dijagram za zonu 1 snimljeni kamerom SC7200

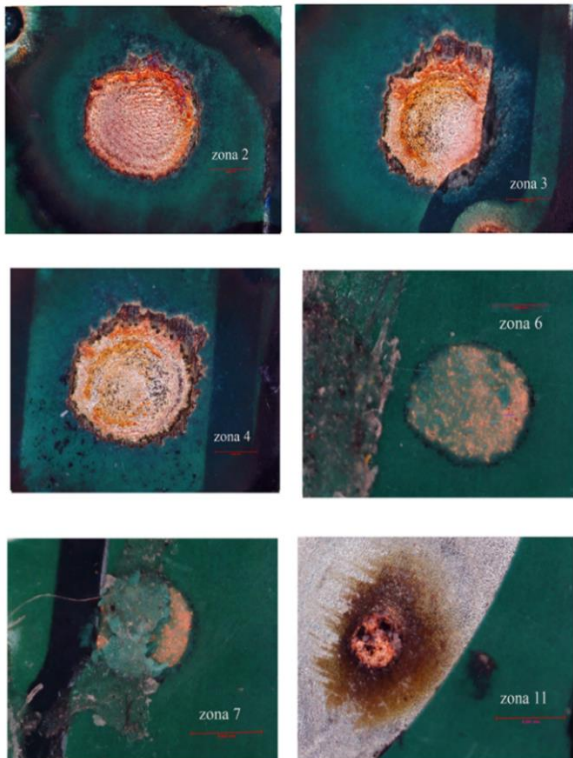
Termogram i vremenski dijagram snimljeni kamerom SC7200, za zonu 1 su dati na slici 5. Snimanja su vršena sa 10000 slika/s, zbog čega je rezolucija slike 64 × 8 (slika 5a). Vreme integracije po slici je bilo 120 μs. Na slici 5b su prikazani snimci impulsa za koji je registrovana temperatura od preko 680 K.

FLIR SC7200 kamera je registrovala pikove efektivne radijanse koja odgovara temperaturama od preko 400 °C, a FLIR E40 kamera tri puta manju temperaturu. Treba da se ima u vidu činjenica da je vreme integracije FLIR E40 kamere 16 ms, što znači 133 puta veće u odnosu na kameru FLIR SC7200.

Bakar je odličan provodnik toplote, tako da se toplota, indukovana laserom, brzo širi i temperatura brzo opada. Zbog toga su velike razlike usrednjenih efektivnih temperatura, koje registruju kamere za istu zonu.

5.2 Štampana pločica

Laseri se mogu koristiti u elektronici za precizno i bezbedno čišćenje preciznih i osetljivih komponenti. Za ilustraciju primene u ovoj oblasti prikazani su rezultati laserskog čišćenja višeslojne štampane pločice na kojoj je laserski odstranjivan zaštitni sloj. Na slici 6 dati su snimci nekoliko zona, na štampanoj pločici, čišćenih laserom, snimljeni optičkim mikroskopom sa uvećanjem od 150 \times .



Slika 6 - Zone čišćene laserom na štampanoj pločici

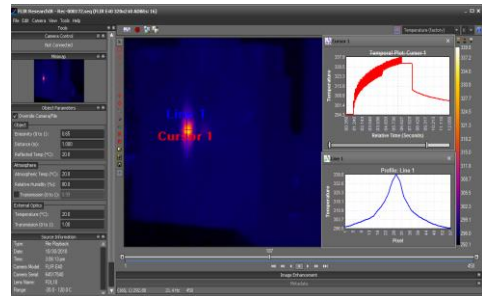
Analiza slika dobijenih optičkim mikroskopom pokazuje da su najbolji rezultati čišćenja dobijeni u zoni 6, korišćenjem talasne dužine od 1064 nm, niske energije i dužeg vremena ozračavanja. Zona 7 je tretirana dva puta kraće, sa istom energijom kao i zona 6. Na snimcima se vidi da je delimično otklonjen zaštitni sloj i da nije došlo do oštećenja bakarne površine. Sloj laka najbolju apsorpciju ima za $\lambda = 1064$ nm, a najslabiju za $\lambda = 532$ nm.

Na slici 7a i 7b su dati rezultati za zonu 2 i na slici 7c i 7d za zonu 3. Vremenska zavisnost porasta temperature koja je prikazana na desnoj strani termografskog snimka pokazuje periodično zagrevanje i hlađenje, uz blagi porast ukupne temperature površine uzorka. Osim porasta temperature, lako se sa termograma može odrediti površina zone uticaja toplote. Na osnovu broja i dimenzije piksela za korišćenu kameru (slika 7b), i rastojanju između kamere i površine objekta, širina zone duž vertikalne linije 1 iznosi 1,1mm.

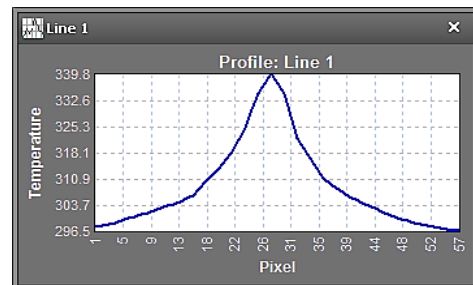
Dijagrami postignute efektivne temperature u funkciji energije i talasne dužine su dati na slici 8.

Zaštitni sloj ima veći koeficijent apsorpcije laserske svetlosti sa talasnom dužinom $\lambda = 355$ nm u odnosu na ostale dve (slika 8).

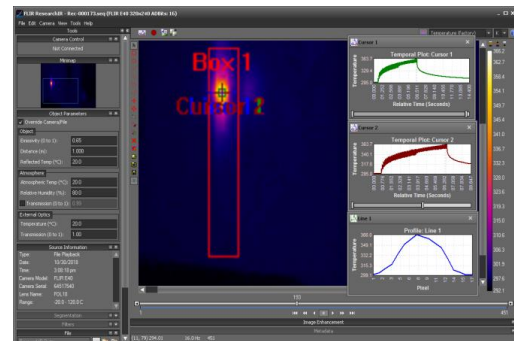
Dimenzije laserskog snopa su ostale nepromenjene u odnosu na dimenzije snopa tokom čišćenja crne boje. Zona uticaja toplote generisane laserom je manja kod štampane pločice u odnosu na istu kod crno obojene bakarne pločice.



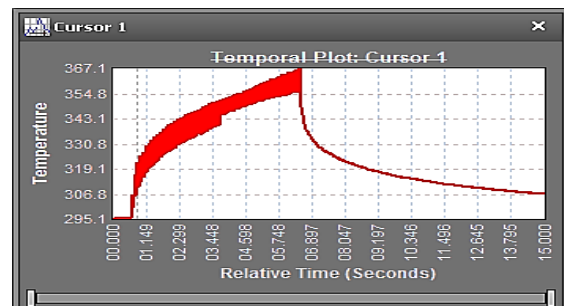
a



b

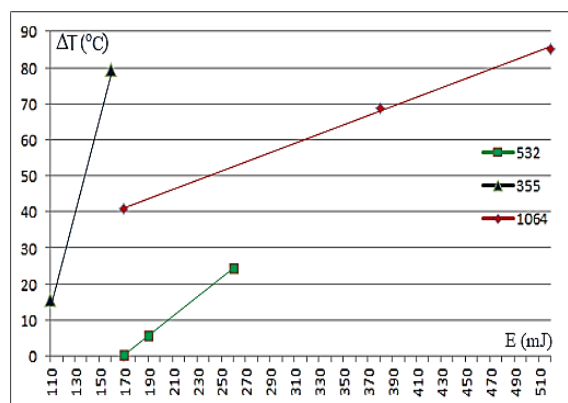


c



d

Slika 7 - Termogrami snimljeni tokom čišćenja štampane pločice; a- zona 2, b- temperaturni profil duž linije u zoni 2, c-zona 3, d-vremenski dijagram temperature u zoni 3



Slika 8 - Promena efektivne temperature u funkciji energije i talasne dužine laserskog snopa

6. ZAKLJUČAK

Osnovna ideja istraživanja koja su predmet ovog rada je bila da se ispituju mogućnosti uvođenja termografije za praćenje temperature uzorka koji se čisti laserom u realnom vremenu.

U ovom radu su prikazani rezultati monitoringa temperature tokom čišćenja crno ofarbane bakarne pločice i štampane pločice sa zaštitnim slojem. Korišćene su dve talasne dužine Nd:YAG lasera, varirani su fluence i vreme ozračivanja, odnosno frekvencija i broj impulsa lasera. Pored kamere E40, korišćena je i kamera SC7200, koja ima mnogo kraće vreme integracije i mogućnost da snima do 10000 slika/s.

Termografija je uvedena sa ciljem da se odredi porast temperature na osnovnom materijalu uzorka koji se laserski čisti, kao i zonu uticaja toplote koja se laserski generiše. Dobijeni rezultati pokazuju da je usrednjena temperatura na površini uzorka funkcija vremena integracije infracrvene kamere, pogotovo ako je osnovni materijal dobar provodnik toplote, kao što je bakar. Zbog toga je neophodno koristiti IC kamere koje imaju vreme integracije reda veličine dužine laserskog impulsa i izvršiti sinhronizaciju rada lasera i kamere. Termografija omogućava precizno određivanje zone uticaja toplote što je posebno važno kada su predmeti čišćenja izrađeni od kombinacije materijala sa različitim koeficijentom apsorpcije laserske svetlosti.

7. ZAHVALNICA

Autori se zahvaljuju MPNTR RS za finansijsku podršku kroz projekat TR 34028, Vojnotehničkom institutu i Centralnom institutu za konzervaciju u Beogradu na podršci tokom eksperimentalnih istraživanja.

LITERATURA

[1] Webb C, Jones J, *Handbook of Laser Technology and Applications* (Three-Volume Set), Taylor & Francis, 2003.

[2] Kane D. M, *Laser Cleaning II*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, 2005.

[3] Polić S, Ristić S, Radojković B, Jegdić B, Laser cleaning of corrosion, efficient and environmentally friendly method, in *Proc. 27. International conference Ecological Truth & Environmental Research*, Borsko jezero, 18-21 June, 2019.

[4] Koss A, Marczak J, Evaluation of laser cleaning progress and quality, *Journal of Heritage Conservation*, No. 32, pp.109-113, 2012.

[5] Leontyev A, *Laser decontamination and cleaning of metal surfaces: modelling and experimental studies*, École doctorale Ondes & Matière n° 288, these de doctorat, 2011.

[6] Garbacz H, et al, Effect of laser treatment on the surface of copper alloys, *Applied Surface Science*, No. 257, pp. 7369-7374, 2011.

[7] Ristic S, et al, Ruby Laser Beam Interaction with Ceramic and Copper Artifacts, *Journal of Russian Laser Research*, Vol. 31, No.4, pp. 380-389, 2010.

[8] Azhar M. R. et al, A Study of Temperature Effects on Car Coated Substrate in Laser Paint Removal, *Inter. J. of Engineering & Technology IJET-IJENS* Vol. 14 No. 02, pp. 39-48, 2014.

[9] Radojković B, Ristić S, Polić S, Jančićević M., Jegdić B, Ispitivanje mikro morfoloških mikrohemijskih promena na posrebnjenoj bakarnoj pločici tretiranoj Nd:YAG laserom, *Ecologica*, Vol. 92, pp. 929-934, 2018.

[10] Sitou A. et al, A Comprehensive Study for the Laser Cleaning of Corrosion Layers due to Environmental Pollution for Metal Objects of Cultural Value: *Preliminary Studies on Artificially Corroded Coupons*, Hindawi Publishing Corporation Laser Chemistry Vol. 2006.

[11] Ristić S, Radojković B, Polić S, *Savremene metode laserskog čišćenja predmeta kulturnog nasleđa*, NU Istitut za hemiju, metalurgiju i tehnologiju, Univerzitet u Beogradu, CIK, Beograd, 2018.

[12] Koh Y. S, *Laser Cleaning as a Conservation Technique for Corroded Metal Artifacts*, Doctoral Thesis, Luleå, Sweden, 2005.

[13] 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.

- [14]Zhang J., Wang Y., Cheng P., Lawrence Y., Effect Of Pulsing Parameters On Laser Ablative Cleaning Of Copper Oxides, Paper # M602, *ICALEO, Congress Proceedings, Laser Microfabrication Conference*, 2005.
- [15]Radojković B., *Fizičko-mehaničke i mikrohemijske promene na površinama keramičkih i metalnih artefakata tretiranih laserom*, doktorska disertacija TMF, Univerzitet u Beogradu, 2017.
- [16]Fan P., et al, Sequential color change on copper surfaces via micro/nano structure modification induced by a picosecond laser, *Journal Of Applied Physics*, Vol.114, No.8, (2013) 5p. DOI: 10.1063/1.4819326.
- [17]Allahyari E. et al., Laser surface texturing of copper and variation of the wetting response with the laser pulse fluence, *Applied Surface Science*, No.470, pp. 817–824, 2019.
- [18]Henc-Bartoli V. et al. Damage caused by a nanosecond UV laser on a heated copper surface, *Applied Surface Science* No. 378, pp.357–361, 2016.
- [19]Polić S., Ristić S., Radojković B., Jegdić B., Janičijević M., Optimizacija laserskog čišćenja metalnih artefakata, *Tehnika* No. 6, pp. 834-841, 2017.
- [20] Lee J.M., Watkins K.G., In-process monitoring techniques for laser cleaning, *Optics and Lasers in Engineering*, No. 34, pp. 429- 442, 2000.
- [21] Ristić S., Polić-Radovanović S., *Termografija u zaštiti kulturne baštine*, Institut Goša, Beograd, 2013.
- [1] Tserevelakis G., On-line photoacoustic monitoring of laser cleaning on stone: Evaluation of cleaning effectiveness and detection of potential damage to the substrate, Vol. 35, pp. 108-115, 2019.

SUMMARY

THEMOGRAPHY IN CONTROL EFFICIENCY AND SAFETY OF LASER CLEANING

Innovative laser cleaning technology for various surfaces in the industry, includes an integrated approach to controlling the process of laser-material interaction and testing laser treatment results. Laser cleaning has significant advantages over conventional cleaning methods: it has high selectivity, precision, efficiency and reliability in an application for different types of materials. The thermal nature of the laser cleaning process brings a certain risk for cleaning objects, and the process optimization research is in the focus of interest of a large number of scientists. This paper presents the results of laser paint, on the copper surface, and the protective layer, on the printed circuit board, cleaning. The control of the real-time laser cleaning process was carried out using an infrared camera. The micromorphological characteristics of the cleaned surface were examined by optical microscopy.

Key words: laser cleaning, Nd:YAG laser, copper, printed circuit board, IC thermography, optical microscopy