

Avtorica: Sabina Kramar

Vsebina

1. Uvod
2. Princip delovanja laserskega čiščenja
3. Izvajanje laserskega čiščenja
4. Lasersko čiščenje različnih materialov
5. Varnostni vidiki uporabe laserja
6. Druga področja uporabe laserja
7. Zaključek
8. Literatura in viri

1. Uvod

V zadnjih dveh desetletjih se je uporaba laserja na področju ohranjanja kulturne dediščine izredno povečala, predvsem zaradi nekaterih prednosti, ki jih ponujajo laserske tehnike tako na področju preiskav kot tudi diagnoze in posegov na objektih. Pri tem je predvsem lasersko čiščenje površin iz naravnega kamna že postalo sprejemljivo in v nekaterih konservatorsko-restavratorskih ateljih skorajda rutina. Še vedno pa njegovo širšo uporabo preprečuje dokaj velik strošek nabave laserskih sistemov.

V tem poglavju se bomo osredotočili na lasersko čiščenje, ki je dokaj nova metoda. Proces čiščenja je eden pomembnejših postopkov pri konservatorsko-restavratorskih posegih. Konvencionalne metode čiščenja ponavadi vključujejo mehansko odstranjevanje nečistoč, sledijo pa jim kemijski postopki. Prve študije o uporabi laserja v konservatorsko-restavratorski stroki je leta 1972 izvedel Asmus s sodelavci (Asmus et al., 1973). Od takrat dalje je bil razvoj laserjev izredno hiter. Prednosti laserskega čiščenja in odstranjevanja površinskih plasti so predvsem v tem, da pri tem okoljsko škodljiva topila niso potrebna.

Najbolj razširjen material, ki ga lahko čistimo z laserjem, je naravni

kamen, lahko pa čistimo tudi druge materiale, npr. barvno steklo, fotografije, keramiko, kovine, papir, pergament in slike.

2. Princip delovanja laserskega čiščenja

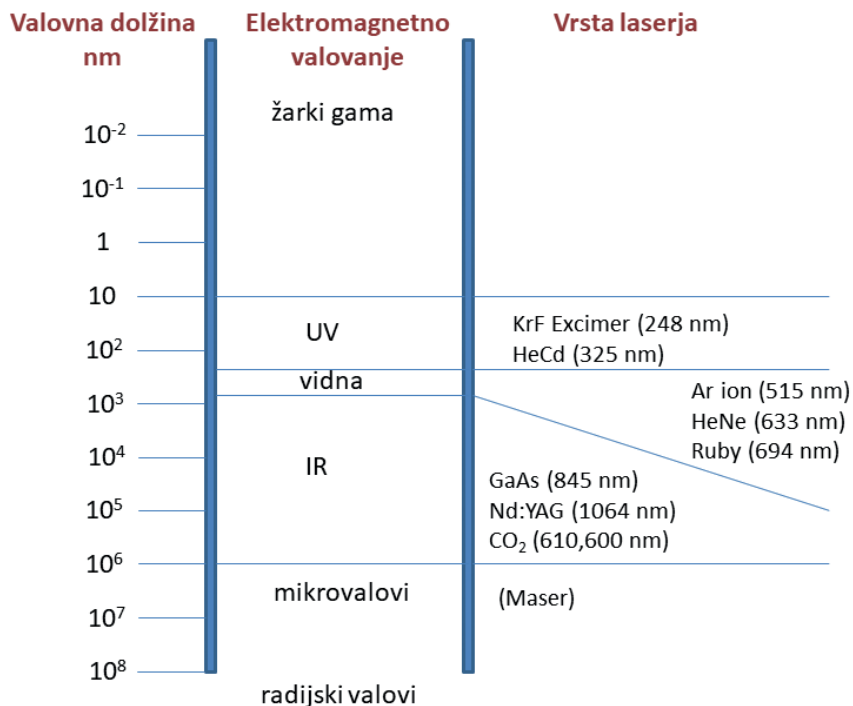
Beseda laser je akronim za angleški izraz »Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation« (ojačenje svetlobe s spodbujenim oddajanjem žarkov, Snoj, 20. 7. 2018). Laser je tako ime za napravo, ki oddaja ozek snop svetlobe strogo določene valovne dolžine, pri čemer ostaja med poljubnimi točkami v svetlobnem snopu vedno stalna fazna razlika (koherentna svetloba). Pri laserski svetlobi gre za usmerjeno, koherentno, monokromatsko oz. enobarvno svetlobo. Širjenje je v eni smeri veliko hitrejšo kot v drugih smereh. Ta laserska svetloba nastane, ko presežek energije spodbudi (stimulira) atom ali molekulo, da oddaja (emitira) energijo v obliki svetlobe, medtem ko se pri navadni svetlobi, npr. iz sonca ali žarnice, svetloba emitira spontano, brez zunanje interference (Koh, 2002). Od iznajdbe prvega laserja so bili razviti številni laserji, ki jih uporabljajo na različnih področjih. Vsak laser emitira karakteristično valovno dolžino v infrardečem (IR), vidnem ali ultravijoličnem (UV) območju (**slika 1**). Lastnosti laserja zavisijo od vrste materiala, ki

emitira lasersko svetlobo, laserskega optičnega sistema in načina laserske aktivacije. Moč laserjev se giblje od milivatov (mW) do nekaj kilovatov (kW) (Cooper, 1998).

Večina laserjev je monokromatskih, kar pomeni, da emitirajo svetlobo ene valovne dolžine (enobarvnost) oz. vsi delci nihajo z enako frekvenco. Moč laserjev ponavadi merimo v vatih (joule na sekundo - J/s), ki nam pove, koliko energije laser spusti na enoto časa. Laserji lahko emitirajo pulze različnega trajanja in hitrosti ponavljanja ali kontinuiran žarek.

Lasersko čiščenje vključuje številne kompleksne mehanizme, kot so fototermični, fotokemični in fotomehanski vplivi na material. Pri fototermičnem mehanizmu se večji del absorbirane energije pretvori v toploto, pri fotokemijskem mehanizmu pride do fotokemijskih procesov zaradi razlik v absorpciji materialov, pri fotomehanskem mehanizmu se pri laserskem sevanju razvijejo stresni valovi z amplitudo do nekaj barov. Mehanizem je odvisen od parametrov laserskega obsevanja ter tudi fizikalnih in kemijskih lastnosti površine. Pregled parametrov, ki vplivajo na čiščenje z laserjem, je podan na **sliki 2**. Najpomembnejši parameter je energijska gostota laserskega žarka, ki jo definiramo kot energijo na enoto površine in podamo v J/cm². Pomembno je, da je energijska gostota dovolj velika, da odstrani kontaminirane plasti, obenem pa tudi dovolj majhna, da ne pride do poškodbe površine. Interakcija med laserskim žarkom in površino je odvisna tudi od valovne dolžine in trajanja pulza laserja ter lastnosti medija. Pri laserskem čiščenju ponavadi uporabljamo kratke pulze, saj to preprečuje prenos toplote v substrat.

Pri interakciji laserskega žarka z določeno površino se večina



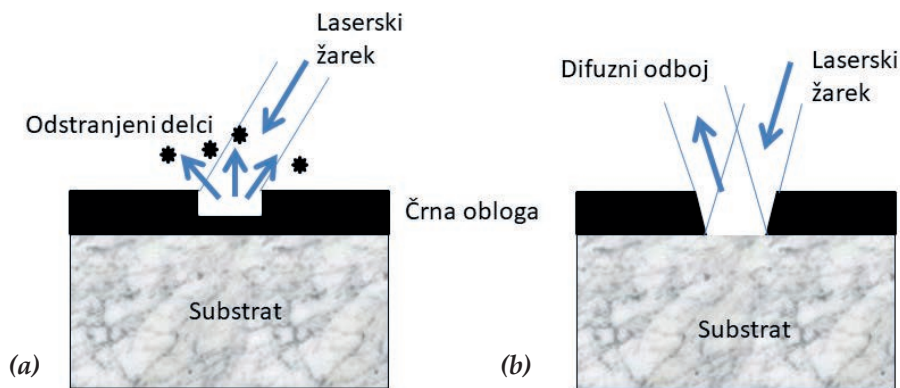
Slika 1: Elektromagnetni spekter s primerom laserjev različnih frekvenc (po Koh, 2002).



Slika 2: Dejavniki, ki vplivajo na proces čiščenja z laserjem (po Koh, 2002).

energije absorbira, preostanek pa se odbije. Močna absorpcija energije povzroči hitro segrevanje nečistoč na površini, kar vodi do ablacije oz. odstranjevanja nečistoč s površine zaradi termične ekspanzije. Če povečamo energijsko gostoto nad določeno točko, se

material segreje do dovolj visoke temperature in izhlapi. Ker laserski žarek nima vpliva na površino, razen če ga ta rahlo absorbira, sta procesa ablacije in evaporacije oz. izhlapevanja samoomejujoča, kar omogoča čiščenje znotraj varnostnih parametrov. Ko so nečistoče



Slika 3: (a) Laserski žarek ob stiku s črno oblogo povzroči odstranitev delcev; (b) ko je črna obloga odstranjena, laserski žarek ne pride v interakcijo s površino naravnega kamna (po Zanini in Bartoli, 2018).

odstranjene, nadaljnji pulzi namreč ne bodo imeli učinka in ne bodo povzročili poškodb površine.

Proces laserskega čiščenja tako lahko poenostavljeno razložimo z evaporacijo (fototermični ablacijski mehanizem) in ablacijo/fragmentacijo (fotomehanski in fotokemijski ablacijski mehanizem). Prikažemo lahko najenostavnejši primer: naravni kamen, ki je bele barve in prekrit s črno oblogo (Zanini in Bartoli, 2018). Z laserskim čiščenjem povzročimo popolno evaporacijo/ablacijo črne obloge. Ko pride laser v interakcijo z belo površino naravnega kamna, pri tem ni več temnega materiala, ki bi absorbiral lasersko svetlobo, in laserska svetloba se odbije, ne da bi na belem naravnem kamnu povzročila poškodbe (slika 3).

3. Izvajanje laserskega čiščenja

Lasersko čiščenje temelji na selektivnem odstranjevanju nečistoč, ki je omogočeno zaradi razlik v absorpciji med nečistočami in površino pod njimi. Posebno učinkovito je, če je kontrast v absorpciji in refleksiji med nečistočami in površino velik; takšni materiali so npr. naravni kamen, tekstil, slike in barvno steklo. Osnovna zahteva pri čiščenju je, da lasersko čiščenje ne povzroči

poškodb na površini določenega artefakta.

Pri laserskem čiščenju odstranjujemo nečistoče s površin predmetov z uporabo laserskega obsevanja oz. iradiacije. Pri laserskem čiščenju gre za fizikalni proces. Zaradi tega ima v primerjavi s kemijskimi in mehanskimi metodami čiščenja nekatere prednosti, kot so:

- brezstičnost: energija je v obliki svetlobe,
- majhen okoljski vpliv: ni nevarnih kemikalij oz. topil in pri procesu nastane zelo malo odpadnega materiala,
- selektivnost: parametre lahko nastavimo za različne specifične substance,
- lokalizirano mesto čiščenja: čistimo samo območje, kamor usmerimo laserski žarek,
- vsestranskost: v nekaterih primerih možnosti uporabe sevanja drugih valovnih dolžin povečajo fleksibilnost,
- ohranjanje površinskega reliefa: metoda je dovolj občutljiva, da ohranimo detajle,
- kontrolirano odstranjevanje: odstrani se lahko specifična debelina materiala, čiščenje je postopno, laser lahko ustavimo kadar koli (Asmus, 1986).

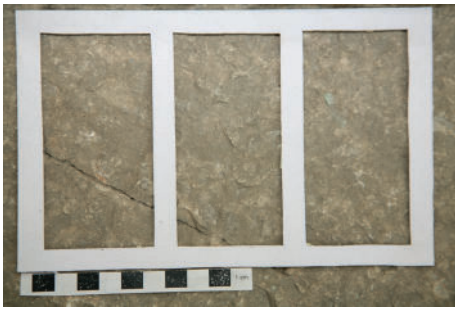


Slika 4: Komercialni laserski sistem za čiščenje (Nd:YAG) z Oddelka za kamen in štukaturo Restavratorskega centra ZVKDS. Model laserja: Smart Clean 2.

Največja pomanjkljivost te metode čiščenja je visoka nabavna cena laserja.

Najpogosteje uporabljena vrsta laserja v konservatorstvu je neodimijev laser Nd:YAG (slika 4), ki ima zelo kratke pulze in veliko energijo ter radiacijo blizu IR z valovno dolžino 1064 nm. Pri tej valovni dolžini se svetloba močno absorbira v plasteh nečistoč. Ta laser je izredno učinkovit predvsem pri odstranjevanju črnih oblog z belih kamnitih površin ali ometov. V zadnjem času prihajajo v ospredje tudi erbijevi laserji (Er:YAG) z valovno dolžino 2940 nm. Glavni absorberji pri tej valovni dolžini so skupine OH.

Čiščenje se lahko izvaja na dva načina, in sicer s prisotnostjo tekočinskega filma, ponavadi vode (slike 5-8), ali brez. Pri t. i. suhem čiščenju lahko površina absorbira večino vpadnega žarka, in to z omogočanjem selektivnega čiščenja s kontroliranjem valovne dolžine. Ta tehnika je uporabna, ko



Slika 5: Priprava testne površine za nastavljanje najoptimalnejših parametrov laserja za čiščenje površine kamnitega rimskega nagrobnika.



Slika 6: Omočenje površine z vodo za boljši učinek odstranjevanja nečistoč.



Slika 7: Čiščenje kamnitega nagrobnika z laserjem.



Slika 8: Razlika med z laserji očiščenimi in neočiščenimi površinami (sondiranje). Med okenci so različne nastavitve – parametri, zgoraj in spodaj pa je prikazana razlika med očiščeno in neočiščeno površino.

imata obloga in površina različne laserske absorpcijske lastnosti, kar omogoča hitro segrevanje delcev in s tem njihovo ejakcijo ali evaporacijo. V nekaterih primerih, npr. pri določenih oblogah, lahko boljši učinek čiščenja dosežemo z omočenjem površine. Voda, ki jo s čopičem ali s sprejem nanesemo na površino, tik preden začnemo z laserskim čiščenjem, penetrira v oblogo. Tam se zaradi laserskega žarka izredno hitro segreje, kar vodi do eksplozivne evaporacije vode. Slednje vodi do učinkovitega odstranjevanja oblog s površin.

Pri tipičnem laserskem čiščenju lahko temperatura doseže tudi 370°C, kar skupaj z visokimi tlaki, tudi do nekaj barov, ki nastanejo zaradi evaporacije vode, lahko vodi do poškodbe površine, posebno če je hrapava in porozna. Toda ta temperatura vztraja le kratek čas in večina materialov ne kaže poškodb.

4. Lasersko čiščenje različnih materialov

Lasersko čiščenje naravnega kamna

Lasersko čiščenje kamnitih površin se uporablja predvsem od druge polovice 80. let prejšnjega stoletja zlasti v Italiji, Franciji in Veliki Britaniji, pa tudi v drugih državah, kjer so odstranjevali predvsem črne obloge. Najpogosteje očiščene površine so iz belega marmorja in apnenca. Uporabljali so ga pri čiščenju kamnitih reliefov, historičnih fasad, arheoloških ostalin in kamnitih skulptur. Lasersko čiščenje uporabljajo tudi v Restavratorskem centru ZVKDS. Na ta način so očistili različne kamnite artefakte in elemente (slika 9 in 10) ter tudi mozaike (slika 11).

V zadnjih letih se je uporaba laserskega čiščenja razširila tudi v Azijo in ZDA. V teh državah so potekala konservatorsko-restavratorska dela na pomembnih



Slika 9: Lasersko odstranjevanje črnih oblog na kamnitem kipu muzicirajočega dečka iz SNG Maribor.



Slika 10: Odstranjevanje črne obloge s kamnite površine: (a) pred čiščenjem, (b) prvo čiščenje, (c) drugo čiščenje – debelejša črna obloga odstranimo z večkratnim čiščenjem z laserjem.



Slika 11: Čiščenje kamnitih teser z rimskega mozaika v restavratorski delavnici.

spomenikih, med njimi so Tempelj v Agri v Indiji, Venerin tempelj v Baalbeku v Libanonu in Metropolitanski muzej v New Yorku.

Široka uporaba laserskega čiščenja je botrovala tudi številnim raziskavam, ki so se dotikale proučevanja vpliva obsevanja na površine iz različnih materialov, diagnostike odstranjenega materiala ter parametrov, ki so omogočali optimalno odstranjevanje oblog brez poškodbe substrata. Pomemben vidik je bilo tudi proučevanje problematike rumenjenja površine. Laserska ablacija ima številne prednosti v primerjavi z mehanskimi in kemijskimi metodami čiščenja, predvsem z vidika omogočenega postopnega čiščenja, »samoustavitve« čiščenja, selektivnosti, vpliva na okolje in ohranjanja t. i. patine površine artefakta oz. kamnitega elementa.

Pri tem je treba omeniti, da je mogoče z laserskim čiščenjem odstraniti tudi marsikatero nečistočo, ki jih drugače s konvencionalnimi metodami ne moremo odstraniti. Kot primer lahko omenimo čiščenje debele bitumenske obloge na peščenjaku Kraljeve palače v Patanu v Nepal. S

predhodnimi postopki čiščenja, kot je uporaba topil (acetona in »white spirit«), čemur je sledilo mehansko odstranjevanje s skalpelom, je bilo oblogo mogoče odstraniti le mestoma. Uporaba peskanja je bila odsvetovana zaradi krhke površine peščenjaka. Po nekaj preliminarnih testih z laserskim čiščenjem so ugotovili, da bo v tem primeru ta metoda najučinkovitejša (www.Assorestauro.org).

Nekateri strokovnjaki ugotavljajo, da predutrdjevanje površine za lasersko čiščenje ni ovira (Weeks, 1997). Težava pa je čiščenje polikromiranih površin, saj se pri čiščenju z laserjem Nd:YAG z valovno dolžino 1064 nm lahko pojavijo barvne spremembe nekaterih pigmentov. Pigmenti, kot so cinober, svinčeva rdeča, svinčeva bela in malahit, lahko počrniijo. Po drugi strani pa lahko nekatere pigmente, kot so rdeči in rumeni okri ter črni pigmenti, z laserskim čiščenjem po nesreči odstranimo. Pri zeleni zemlji naj barvnih sprememb ne bi bilo.

Laserji Nd: YAG so izredno učinkoviti pri odstranjevanju črnih oblog s svetlih površin, laserji Er:YAG pa se izkažejo za učinkovite pri odstranjevanju bioloških oblog

in organskih premazov ali tretiranju polikromiranih kamnitih površin.

Lasersko čiščenje kovin

Čiščenje kovinskih materialov ponavadi vključuje dve vrsti površinskih oblog: anorganske korozijske produkte, kot so rja in anorganske usedline, ter organske premaze, kot so barve in laki. Lasersko čiščenje kovin se je začelo s čiščenjem pozlačenih bronastih predmetov (Siano in Salimbeni, 2001), sčasoma pa sta se učinkovitost in varnost te vrste čiščenja pokazali tudi pri posrebnih površinah, zlatu, srebru in podobnih zlitinah (Zanini in Bertoli, 2002). Lasersko čiščenje kovin mora biti izvedeno pri karseda majhni energijski gostoti, da se izognemo poškodbam površine, kot sta taljenje in oksidacija. To lahko dosežemo s kontroliranjem parametrov, kot sta število pulzov in velikost energije na pulz. Površina se zlahka poškoduje zaradi prevelike energijske gostote, zato je čiščenje uspešno le, če ga izvaja usposobljen strokovnjak in je pri tem izredno pazljiv.

Arheološke artefakte pogosto prekrivajo sekundarni produkti, bodisi organski bodisi anorganski.

Glede na sestavo obloge lahko uporabimo različne laserje. Učinek čiščenja je v veliki meri odvisen od korozijske plasti, ki jo je treba odstraniti (Koh in Sárady, 2003). Ugotovljeno je bilo, da na učinkovitost laserja vplivajo barva, poroznost in tekstura površine.

Lasersko čiščenje stenskih poslikav

Nedavno so raziskovali tudi možnosti uporabe laserskega čiščenja pri stenskih poslikavah, in sicer za odstranjevanje kalcitnih oblog in oksalatnih patin. Pri tem je še posebej pomembno, da se ne pojavijo poškodbe veziv in pigmentov. Ugotovljeno je bilo, da predhodno omočenje površine načeloma zmanjša možnosti za poškodbe pigmentov. Vsekakor pa lahko pride do poškodbe barvnih plasti, v nekaterih primerih luščenja.

Na lasersko sevanje naj bi bili prav tako občutljivi nekateri pigmenti, kot že omenjeno, tudi pri polikromiranem naravnem kamnu, npr. malahit in rumeni oker, smalta in manganova črna pa naj bi bila med bolj odpornimi (Striova et al., 2011). Prevelika energijska gostota, uporabljena pri laserskem čiščenju, lahko privede do stranskih pojavov, kot so beljenje, barvne spremembe, luščenje in zoglenitev. Malahit in azurit lahko potemnita. Študije pa so pokazale, da lahko pigmente pred poškodbami štiti prisotnost proteinskih veziv. Lasersko čiščenje lahko vodi tudi do prehoda minerala goethit v hematit (oksidacija) v pigmentu rumena okra ali sadre v basanit (dehidracija). Voda kot tekoči medij naj bi bila pri rumeni okri učinkovitejša kot izopropanol.

Kljub vsemu so črne obloge oz. potemnjene barvne plasti uspešno odstranili z belih, zelenih in rumeno rjavih barvnih površin. Stranski učinki laserskega čiščenja se lahko kažejo tudi pri organskih vezivih.

Pri jajčnem vezivu tako lahko vodi do beljenja in odstranitve veziva. Še posebej naj bi na poškodbe vplivala dolžina pulza.

Lasersko čiščenje oljnih slik

Čiščenje oljnih slik, tj. odstranjevanje tankih filmov laka, smol, preslikav in tudi oblog na barvnih plasteh, je pri laserskem čiščenju poseben izziv. Za te namene naj bi bil najučinkovitejši laserski sistem Er:YAG z valovno dolžino 2940 nm (Bracco et al., 2003). Skupine OH namreč pri valovni dolžini 2940 nm močno absorbirajo svetlobo, in tako je učinkovitost laserske ablacije neposredno proporcionalna s količino skupin OH v določenem materialu.

Uspešni primeri uporabe so odstranjevanje saj, inkrustacij in sintetičnih smol s površin oljnih slik, pa tudi lepil in šelaka s krhke pozlačene tempere.

Lasersko čiščenje organskih materialov

Lasersko čiščenje organskih materialov, kot so papir in pergament, tekstil in polimerni materiali, so v ospredju šele zadnja leta. Organski substrati so nagnjeni k absorbiranju laserske radiacije pri 2940 nm, kar je poseben izziv za lasersko čiščenje takih materialov z laserjem Er:YAG (Pereira-Pardo in Korensberg, 2018). Uporaba laserja v te namene je zelo omejena, saj hitro pride do poškodb oz. spremembe površine, čeprav na mikroskopskem nivoju. Prag za nastanek poškodb je zelo nizek. Pri tekstilu, npr. volni in svili, lahko čiščenje z laserjem brez predhodnega omočenja z vodo povzroči termične poškodbe in privede do spremembe sijaja površine. Predhodno omočenje tekstila tako lahko zmanjša nevarnost nastanka poškodb. Uporablja se zelo majhna energijska gostota, in sicer v območju od 0,3 do 0,6 J/cm². Tako lahko uspešno

odstranimo npr. blato z rdeče obarvane svile.

Pri papirju in pergamentu so poškodbe opazne pri suhem čiščenju z energijsko gostoto nad 0,1 J/cm². Uporaba tekočega medija povzroči nabrekanje zaradi evaporacije tekočine v porah. Povečana energijska gostota ali večje število pulzov lahko vodi do degradacije celuloznih vlaken. Vsekakor je veliko odvisno tudi od lastnosti papirja. Zaradi tega je treba vedno izvesti preliminarne teste.

Lasersko čiščenje je bilo uspešno tudi pri odstranjevanju lepil s površin polimernih materialov. Obetavne preliminarne rezultate kaže lasersko čiščenje polistirena in polimetilmetakrilata. Lasersko čiščenje se je v tem primeru izkazalo za učinkovitejše od mehanskega. Pri mehanskem odstranjevanju so namreč nastale praske, pri laserskem čiščenju pa stranskih učinkov ni bilo opaziti. Pri najlonu in steklenih vlaknih se je čiščenje z laserjem izkazalo za neprimerno, saj ju je poškodovalo.

Poseben problem pri organskih materialih je biodeterioracija. K temu je še posebej nagnjena celuloza, ki je kontaminirana z glivami. V nekaterih primerih je možno čiščenje z laserjem, ne da bi se pri tem pojavila fotooksidacijska degradacija celuloze.

5. Varnostni vidiki uporabe laserja

Lasersko čiščenje je razmeroma nova tehnika, zato varnostni vidiki še niso bili podrobneje razdelani, načeloma pa moramo biti pozorni na (Watkins, 1997):

- nastavljanje žarka,
- ravnanje z delci in plini, ki nastanejo med čiščenjem,
- sekundarne radiacijske učinke.

Za učinkovito kontrolo žarka

obstaja dovolj pravil, standardov in zaščitnih ukrepov, ki zagotavljajo, da morebitne nevarnosti zaradi uporabe laserskega žarka izvajalec močno omeji z zaščito vida (obvezna uporaba očal) in raznimi zaščitnimi sredstvi. Žarki laserja Nd:YAG lahko poškodujejo vid in zaradi tega je potrebna posebna previdnost.

Učinkovito kontroliranje delcev in plinov, ki nastajajo pri laserskem čiščenju, zagotovimo z uporabo konvencionalnih črpalnih sistemov za prah in pline ter z različnimi filtri. Ta dva ukrepa načeloma zadostujeta za varno uporabo laserskega sistema za čiščenje. Omeniti je treba, da poleg delcev prahu, ki nastanejo pri čiščenju, lahko pri laserskem čiščenju nastajajo tudi potencialno škodljive snovi, npr. policiklični aromatski ogljikovodiki (PAH) pri čiščenju polimernih materialov ali Cr⁶⁺ pri čiščenju kovinskih materialov, ki so tudi kancerogeni. Pri nekaterih laserjih lahko nastanejo tudi sekundarni sevalni učinki v območju UV.

6. Druga področja uporabe laserja

Unikatne lastnosti laserjev, kot so intenziteta, monokromatskost, usmerjenost in koherentnost, so v zadnjih desetletjih favorizirale njihovo uporabo v konservatorstvu-restavratorstvu. Uporaba laserja na tem področju je raznolika. Poleg laserskega čiščenja oz. odstranjevanja neželenih materialov na površini artefaktov in predmetov kulturne dediščine nam laserske tehnike omogočajo tudi kemijsko analizo materialov (laserske spektroskopske tehnike, kot so lasersko inducirana fluorescenca – LIF, lasersko inducirana plazma – LIBS, masna spektroskopija z vzorčevanjem z lasersko ablacijo – LA-ICP-MS, Ramanova spektroskopija), strukturno

diagnostiko (3D lasersko skeniranje, optični in digitalni holografski interferometri in laserska Dopplerjeva vibrometrija), optični zajem slik – »imaging« (optična koherentna tomografija – OPC) (Fotakis et al., 2007).

7. Zaključek

Lasersko čiščenje predstavlja priložnost za selektivno odstranjevanje neželenih materialov oz. nečistoč s površin artefaktov in predmetov kulturne dediščine. S to metodo čiščenja ostaja originalna površina načeloma intaktna. Lasersko čiščenje je posebej učinkovito na močno poškodovanih površinah, ki jih druge tehnike, npr. peskanje, lahko še dodatno poškodujejo.

Glavna razlika med čiščenjem z laserjem in drugimi konvencionalnimi metodami je v uporabi svetlobe ali fotonov, s pomočjo katerih je mogoče ločevati med nečistočami in substratom zaradi razlik v njihovih absorpcijskih lastnostih. Pri premajhni izpostavitvi laserskemu čiščenju je odstranjevanje nečistoč lahko nepopolno, po drugi strani pa lahko predolga izpostavljenost poškoduje površino. V poštev pride tudi kombinacija z drugimi metodami čiščenja.

V primerjavi z drugimi tehnikami čiščenja je ta tehnika časovno potratna, saj je zaradi majhne površine žarka za čiščenje velikih površin potrebnega veliko časa. Nadaljnji razvoj laserjev vključuje predvsem razvoj močnejših laserjev, s katerimi bo omogočeno hitrejše čiščenje večjih površin (npr. stavb).

8. Literatura in viri

1 Asmus, J. F., Murphy, C. G., Munk, W. H. *Studies on the interaction of laser radiation with art artifacts*, Engineers, 1973, vol. 41, str. 19–27.

- 2 Asmus, J. F. *More Light for Art Conservation*, IEEE Circuits and Devices Magazine, 1986, vol. 2, str. 6–14.
- 3 Bracco, P., Lanterna, G., Matteini, M., Nakahara, K., Sartiani, O., de Cruz, A., Wolbarsht, M. L., Adamkiewicz, E., Colombini, M. P. *Er: YAG laser. An innovative tool for controlled cleaning of old paintings: testing and evaluation*, Journal of Cultural Heritage, 2003, vol. 4, str. 202–208.
- 4 Cooper, M. *Laser Cleaning in Conservation: An Introduction*. Butterworth-Heinemann, Oxford, 1998, 98 str.
- 5 Fotakis, C., Anglos, D., Zafiropoulos, V., Georgiou, S., Tonrari, V., *Lasers in the Preservation of Cultural Heritage. Principles and Applications. Series in Optics and Optoelectronics*, Taylor & Francis Group, New York, London, 2007, 336 str.
- 6 Koh, Y. S. *Cleaning of metal artefacts using pulsed lasers*, Luleå Tekniska Universitet, 2002, 86 str.
- 7 Koh, Y., Sárady, I. *Cleaning of corroded iron artefacts using pulsed TEA CO₂- and Nd:YAG-lasers*, Journal of Cultural Heritage, 2003, vol. 4, str. 129–133.
- 8 Pereira-Pardo, L., Korenberg, C. *The use of erbium lasers for the conservation of cultural heritage: A review*, Journal of Cultural Heritage, 2018, vol. 31, str. 236–247.
- 9 Siano, S., Salimbeni, R. *The Gates of Paradise: physical optimisation of the laser cleaning approach*, Studies in Conservation, 2001, vol. 46, 4, str. 269–281.
- 10 Snoj, M., Slovenski etimološki slovar, www.fran.si, dostop 20. 7. 2018.

- 11 Striova, J., Camaiti, M., Castellucci, E.M., Sansonetti, A. *Chemical, morphological and chromatic behaviour of mural paintings under Er:YAG laser irradiation*, Appl. Phys. A, 2011, vol. 104, str. 649–660.
- 12 Zanini, A., Bartoli, L. *The laser as a tool for the cleaning of Cultural Heritage*, Materials Science and Engineering, 2018, vol. 364, 012078.
- 13 Watkins, K. G. A review of materials interaction during laser cleaning in art restoration. V: *Lasers in the Conservation of Artworks I*, Heraklion, Crete, Greece, Verlag Mayer & Comp, Wien, 1997, str. 7–15.
- 14 Weeks, C. The conservation of the portal de la Mère Dieu, Amiens cathedral, France. V: *Lasers in the Conservation of Artworks I*, Heraklion, Crete, Greece, Verlag Mayer & Comp, Wien, 1997, str. 25–29.

Avtorji slik

Slike 1–3: Sabina Kramar

Slike 4–10: Dokumentacija Oddelka za kamen in štukaturo, ZVKDS RC

Slika 11: Dokumentacija Oddelka za stensko slikarstvo in mozaike, ZVKDS RC