FORUM / 2023 / ROČ. XIII / Č. 2

PRO KONZERVÁTORY-RESTAURÁTORY
FORUM FOR CONSERVATORS-RESTORERS

2023 / Vol. XIII / No. 2
Peer-reviewed open access journal

Chief editor: Ing. Alena Selucká
Editors: Mgr. Pavla Stöhrová, Mgr. Jana Fricová

Editorial Board:
Ing. Ivo Štěpánek (Head of Editorial Board)
doc. Dr. Ing. Michal Ďurovič
akad. mal. Igor Fogaš
Ing. Pavel Jirásek
Ing. Jan Josef
doc. akad. soch. Petr Kuthan
prof. RNDr. Jiří Příhoda, CSc.
Ing. Radka Šefců
Mgr. Pavla Stöhrová (Secretary)

Open acces since 2019 available for free
on https://mck.technicalmuseum.cz/casopis-fkr/
The journal is indexed and abstracted in EBSCO.

Published by:
Technické muzeum v Brně
Purkyňova 105, 612 00 Brno, Czech Republic

Contact for communication:
fricova@tmbrno.cz / stohrova@tmbrno.cz / selucka@tmbrno.cz

© Technické muzeum v Brně, 2023
ISSN (Online) 2571-4384
ISSN (Print) 1805-0050

TECHNICKÉ MUZEUM V BRNĚ

METODICKÉ CENTRUM KONZERVACE

VSTUPNÍ STUDIE APLIKACE LASEROVÉHO ČIŠTĚNÍ PRO KONZERVACI KOVŮ

Lukáš Foret • Václav Hutník

Technické muzeum v Brně, Metodické centrum konzervace

Mgr. Lukáš Foret, Dis., absolvoval obor Chemie konzervování-restaurování na Přírodovědecké fakultě Masarykovy univerzity v Brně, kde se v rámci studentské práce zaměřil na hodnocení a regulaci mikroklimatických podmínek při vystavování artefaktů. V současné době působí na oddělení vědy a výzkumu Metodického centra konzervace Technického muzea v Brně. (foret@tmbrno.cz)

Laserové čištění je moderní metoda, která využívá fokusovaný paprsek světla o vysoké energii k odpaření vrstev korozních produktů, nátěrových hmot, mastnoty a nečistot bez poškození podkladového materiálu. Je stále častěji využívána konzervátory-restaurátory po celém světě, jelikož nabízí nové možnosti zásahu na předmětech kulturního dědictví. V závislosti na charakteristice laseru a nastavených parametrech je využitelná pro široké spektrum materiálů od kamene a kovu až po papír. Tato studie zkoumá možnosti využití laseru na čistění korozních produktů z ocelových materiálů porovnáním s běžně využívanými technikami odstraňování koroze jako je tryskání a kartáčování. Metody jsou porovnávány na základě vizuálního hodnocení, úbytku hmotnosti, snížení výšky profilu povrchu a ohřevu vzorku.

Klíčová slova: laserové čištění, Ytterbiový vláknový laser, 1064 nm, koroze, konzervování, ocel

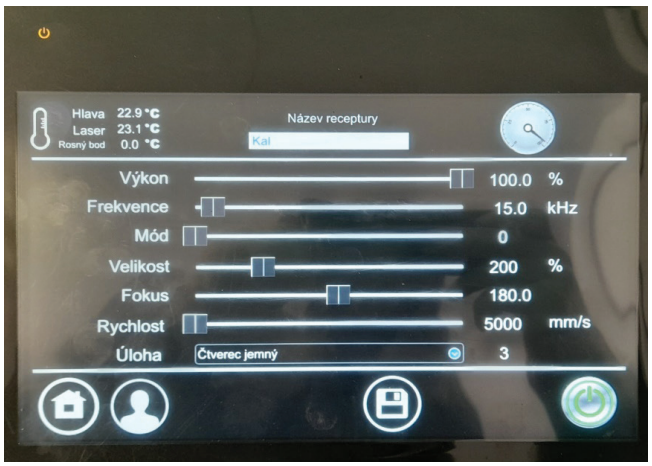
INTRODUCTORY STUDY ON THE APPLICATION OF LASER CLEANING FOR METAL CONSERVATION Laser cleaning is a modern method that uses a focused beam of high energy light to vaporize layers of corrosion products, paint, grease and dirt without damaging the underlying material. It is increasingly used by conservators-restorers worldwide as it offers new possibilities for intervention on cultural heritage objects. Depending on the characteristics of the laser and the parameters set, it is applicable to a wide range of materials from stone and metal to paper. This study investigates the possibilities of using a laser to remove corrosion products from steel materials, comparing it to commonly used corrosion removal techniques such as blasting and brushing. The methods are compared based on visual evaluation, weight loss, reduction in surface profile height and sample heating.

Keywords: laser cleaning, Ytterbium fiber laser, 1064 nm, corrosion, conservation, steel

Lasery se stále častěji používají k čištění předmětů, protože nabízejí několik výhod proti tradičním metodám, jako je chemické a mechanické čištění nebo abrazivní tryskání. Lasery lze použít k odstranění koroze, nátěrů a dalších povrchových nečistot z choulostivých povrchů, aniž by došlo k poškození podkladového materiálu. Laserové čištění je bezkontaktní proces, který nevyžaduje použití vody nebo chemikálií, což může být výhodné při ochraně předmětů kulturní povahy. Při laserovém čištění je na povrch předmětu nasměrován vysokoenergetický laserový paprsek, který je absorbován povrchovými nečistotami, ty se odpaří a odstraní z povrchu. Parametry laseru, jako je výkon, doba trvání a frekvence pulzů, se upravují tak, aby bylo odstraněno pouze povrchové znečištění, zatímco podkladový materiál zůstane neporušený. V průmyslu se lasery využívají k vytváření čistých povrchů bez použití rozpouštědel nebezpečných pro životní prostředí. Dále také k odstraňování nečistot z polovodičů, barvy z kovu, různých nečistot z povrchu magnetických médií a předběžnou úpravu nerezové oceli před lepením.

Poprvé demonstroval možnosti použití laseru pro čištění citlivých předmětů v roce 1965 A. L. Schawlow pouze pět let po předvedení prvního funkčního laseru. Použil rubínový pulzní laser na odstranění černých pigmentů z papíru. První praktické použití bylo v roce 1972 na čištění mramorové sochy doktorem J. F. Asmusem. Nejčastěji využívány jsou Nd:YAG lasery vyzařující v infračervené části spektra. Byly použity k odstranění černých inkrustací z kamene, včetně mramoru a vápence. Laserové čištění je založeno na selektivním odstraňování kontaminantů v důsledku rozdílné absorpce kontaminantů a podkladového materiálu. Laserové čištění dalších materiálů, například vitráží, fotografií, dlaždic, papíru, pergamenu a obrazů bylo rovněž zkoumáno. Požadavkem pro všechny tyto aplikace je, aby čištění povrchu nepoškodilo podkladový materiál. V oblasti konzervace kovů bylo zaznamenáno několik příkladů čištění laserem. Vzhledem k tomu, že korozní produkty jsou obvykle smíšené s původním materiálem, je často obtížné je rozlišit. Pro čištění kovových artefaktů bývají používány dva typy laserů: TEA CO_2 a Nd:YAG. První z nich se nejčastěji používá k čištění zkorodovaných kovů a Nd:YAG lasery k čištění hliníkových a olověných soch, archeologických nálezů, pozlaceného bronzu.

Obr. 1 *Laser Narran ROD 300W. Foto archiv © Technické muzeum v Brně / Laser Narran ROD 300W. Photo archive © Technical museum in Brno*



Obr. 2 *Ovládací panel laseru. Foto archiv © Technické muzeum v Brně / Control panel of the laser. Photo archive © Technical museum in Brno*

PRINCIP LASEROVÉHO ČIŠTĚNÍ

Interakce laserového paprsku a substrátu je velice komplexní proces, nejvýznamnějšími mechanismy jsou odpařování, sublimace, termální ablace a teplem vyvolané pnutí. Při laserovém čištění dopadá na čištěný povrch soustředěné laserové záření. Krátké laserové pulzy o trvání v řádu mikro- až milisekund způsobují prudký nárůst teploty na ozářeném místě. Při laserové ablaci energie dodaná do místa laserovým pulzem způsobí, že je překročena teplota, při níž dochází k přechodu do plynné fáze, nečistoty se tímto teplem odpaří, nebo sublimují, což je provázeno dalšími efekty, jako je hoření, termický rozklad, odlupování. Při vyšších energiích se začíná vytvářet plazma a při tepelném pnutí dochází k rychlému ohřátí a díky různým tepelným roztažnostem se odlučují nečistoty od podkladu. Vlnová délka je jedním ze základních parametrů laseru, a je závislá na zdroji laserového záření a ve většině případů se nedá změnit. Čím více nečistoty absorbují záření o dané vlnové délce, tím více bude převažovat termální ablace nad mechanismem teplem vyvolaného pnutí, jelikož povrch pohltí více energie.

PARAMETRY ČISTICÍHO LASERU NARRAN ROD 300W

V roce 2022 byl do Metodického centra konzervace v rámci Institucionální podpory dlouhodobého koncepčního rozvoje výzkumné organizace Technické muzeum v Brně poskytované Ministerstvem kultury České republiky, pořízen pulzní čisticí laser ROD 300W od společnosti Narran. Jde o vláknový ytterbiový laser o vlnové délce 1064 nm. Laser se skládá ze zdroje, optického vlákna a procesní hlavy. Laserový zdroj je umístěn na vozíku o rozměrech 1,01 × 1,12 × 0,6 m, celkové váze 115 kg, je napájen z běžné sítě 230 V / 50 Hz. Vrchní část vozíku slouží jako ukládací prostor pro optické vlákno, procesní hlavu a další příslušenství. Optické vlákno má délku 10 metrů. Procesní hlava váží 1,9 kg a je vybavena přípojkou pro odsávání, které odvádí vznikající částice a spaliny do samostatné filtrační jednotky.
Na ovládacím panelu laseru jsou následující nastavitelné parametry, které ovlivňují vlastnosti laserového paprsku: výkon, frekvence, mód, velikost, fokus, rychlost a úloha. Jednotlivé parametry různě ovlivňují výkon, celkový výkon se zobrazuje na orientačním ukazateli výkonu v pravém horním rohu a pro přístroj ho přepočítává po změně parametrů.

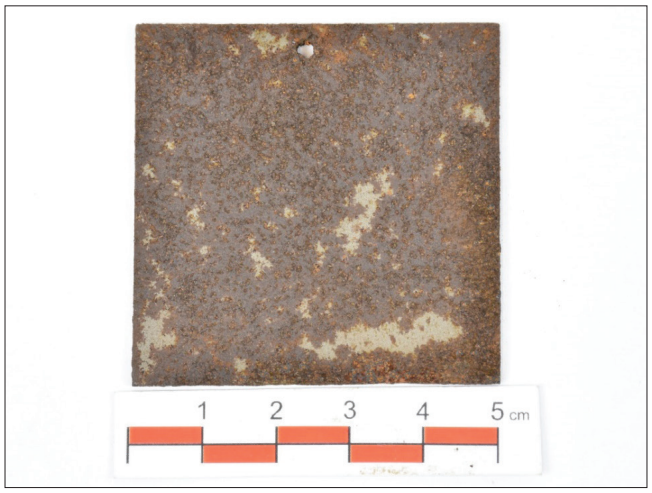
Výkon
Parametr výkon udává špičkový výkon laseru a je nastavitelný v rozmezí 10 až 100 %.
Frekvence
Parametr frekvence udává počet laserových pulzů za sekundu a je nastavitelný v rozmezí 2 až 200 kHz.
Mód
Parametrem mód se nastavuje délka pulzu, delší pulzy více ohřívají materiál. Je nastavitelný v rozsahu 0 až 3.
Velikost
Tento parametr nastavuje velikost zvolené úlohy, při vyšší velikosti jsou jednotlivé pulzy dále od sebe. Nastavitelnost je v rozsahu 100 až 1000 %, v závislosti na dané úloze. Vyšší velikost rozptyluje výkon na větší plochu.
Fokus
Parametrem fokus se volí ohnisková vzdálenost laserového paprsku. Výkon klesá s vyšší ohniskovou vzdáleností v důsledku tlumení paprsku prostředím. Nastavitelný rozsah je 100 až 250 mm.
Rychlost
Tento parametr určuje rychlost vykreslování zvolené úlohy a tím určuje, jako moc se pulzy překrývají a kolik jich dopadne do stejného místa. Je nastavitelná v rozsahu 500 až 5000 mm/s.
Úloha
Parametr úloha nastavuje obrazce, který laser vykresluje pomocí soustavy zrcadel umístěných v operační hlavě. Nejběžněji používané jsou Čára, Čára otočená, Čtverec jemný, Čtverec hrubý, Vlna, Vlna otočená. Tento parametr je programovatelný a může být nastaven do mnoha různých tvarů, včetně složitějších obrazců jako například loga společností.

CÍL STUDIE

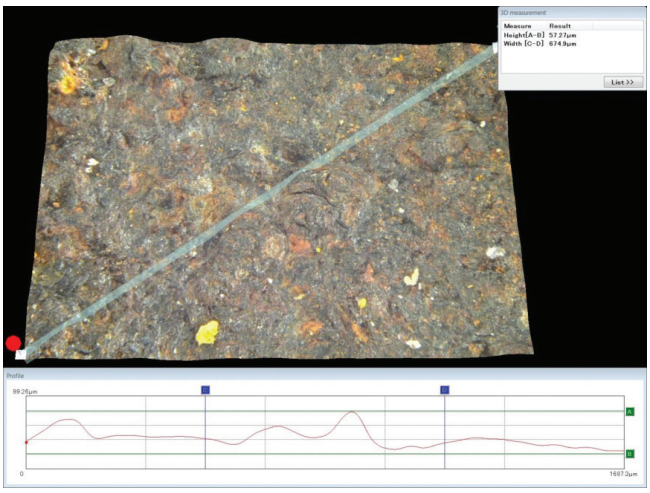
Záměrem vstupní studie je porovnání metod odstraňování korozních produktů běžně dostupnými metodami, konkrétně tryskáním a kartáčováním, s laserovým čištěním. Metody jsou porovnávány na základě hmotnostního úbytku a měření mikroskopického profilu povrchu vzorků a vizuálně podle makrofotografií a pozorování mikroskopem. Dalším cílem je zhodnotit míru ohřevu povrchu vzorků při laserovém čištění.

CHARAKTERISTIKA VZORKŮ

Na testovací vzorky bylo použito dvacet kusů plíšků z konstrukční oceli o rozměrech 5 × 5 cm, o tloušťce 2 mm. Byly uměle korodovány nejdříve ponorem do 5% roztoku NaCl a následně ponechány čtrnáct dní v klimatizované komoře při 60 °C a 95% relativní vlhkosti. Složení korozních produktů bylo studováno pomocí práškové difrakce (XRD), kdy bylo zjištěno, že se jedná o oxidy a hydroxid-oxidy (magnetit a goethit). Každý vzorek je označen vyraženým číslem a otvorem pro zavěšení.



Obr. 3 *Makrofotografie povrchu vzorku. Foto archiv © Technické muzeum v Brně / Macrophotograph of the surface of the sample. Photo archive © Technical museum in Brno*



Obr. 4 *Mikroskopický 3D sken povrchu s měřením profilu. Foto archiv © Technické muzeum v Brně / Microscopic 3D scan of the surface with profile measurement. Photo archive © Technical museum in Brno*

DOKUMENTACE VZORKŮ PŘED ČIŠTĚNÍM

Vzorky byly před čištěním vyfoceny makroobjektivem na digitálním fotoaparátu a digitálním mikroskopem Keyence, při zvětšení 250×. Bylo provedeno 3D skenování povrchu a následné měření výšky profilu. Vzorky byly zváženy na analytických vahách, aby mohl být stanoven hmotnostní úbytek.

Postup čištění

Byly použity následující metody čištění: tryskání skleněnou balotinou (200–300 µm) a korundem (240 µm) při tlaku 2 barů, mechanické čištění ocelovým kartáčem na stojanové brusce, čištění laserem. Na základě kalibrace v rozmezí 15–180 kHz, kde se u hodnoty 65 kHz začaly na povrchu objevovat barvy vyšších popouštěcích teplot, odstíny modré a fialové, svědčící o značném ohřevu vzorku, byly nastaveny hodnoty experimentu. Čištění laserem bylo provedeno při nastavení frekvence 25 kHz a 65 kHz, za sucha a povrchu zvlhčeného vodou. Další parametry laseru byly nastavené stejně, výkon 100 %, mód 0, velikost 200, fokus 180 a rychlost 5000. Každá metoda čištění byla provedena na pěti kusech vzorků vždy z jedné strany a bylo provedeno vážení, aby byl zjištěn hmotnostní úbytek. Poté bylo z druhé strany vzorku provedeno čištění na části povrchu tak, aby došlo k vytvoření ostrého rozhraní mezi čištěnou a zkorodovanou plochou. Na tomto rozhraní byly měřeny výšky zkorodovaného a vyčištěného profilu mikroskopem Keyence.

Dokumentace vzorků po čištění

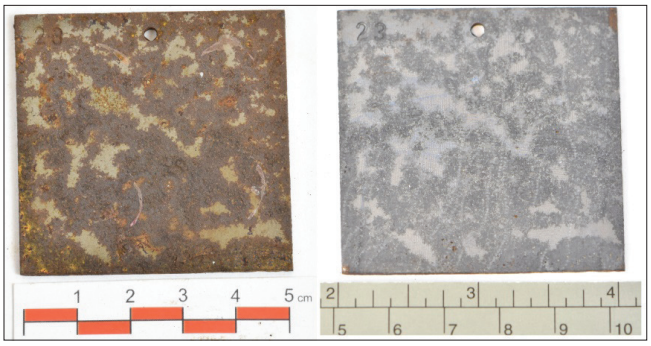
Vzorky byly bezprostředně po vyčištění jedné strany fotografovány termokamerou, poté váženy na analytických vahách, aby byl stanoven hmotnostní úbytek. Byla provedena dokumentace vyčištěného povrchu makrofotografií a na digitálním mikroskopu byla změřena výška profilu na rozhraní mezi zkorodovaným a očištěným povrchem.

Vizuální hodnocení

Účinnost čištění byla vizuálně hodnocena již při čištění a porovnáváním makrofotografií před a po čištění. U vizuálního hodnocení lze sledovat míru odstranění, nebo zachování korozních produktů, barevné změny na nich i na čistém kovu a strukturu povrchu. Část tohoto hodnocení není kvantifikovatelná, ale tvoří nedílnou součást celkového obrazu.

Hodnocení hmotnostního úbytku

Hmotnostní úbytek je nejjednodušší metoda, ze které lze posuzovat šetrnost čisticí metody. U tryskání můžeme očekávat vyšší úbytky u vyšších tlaků, větší velikosti a ostřejších tvarů částic abraziva. Měření bylo provedeno na analytických vahách. V tabulce jsou zaznamenány průměry pěti vzorků u každé metody a procentuální vyjádření úbytku.



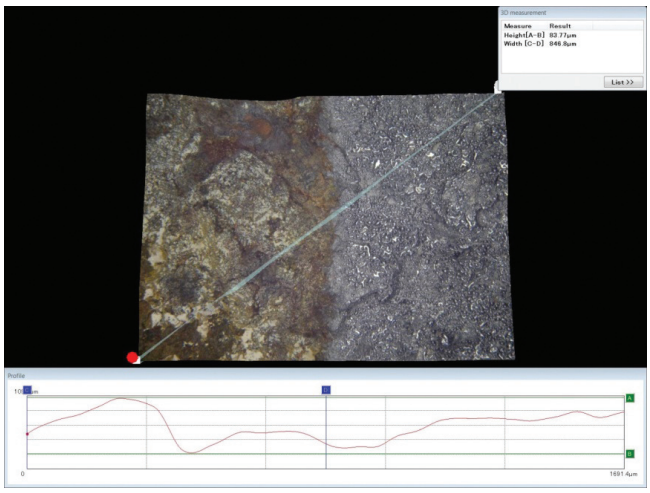
Obr. 5 *Porovnání makrofotografií po laserovém čištění. Foto archiv © Technické muzeum v Brně / Comparison of macrophotographs after laser cleaning. Photo archive © Technical museum in Brno*

Tab. 1 *Hmotnostní úbytek / Weight loss*

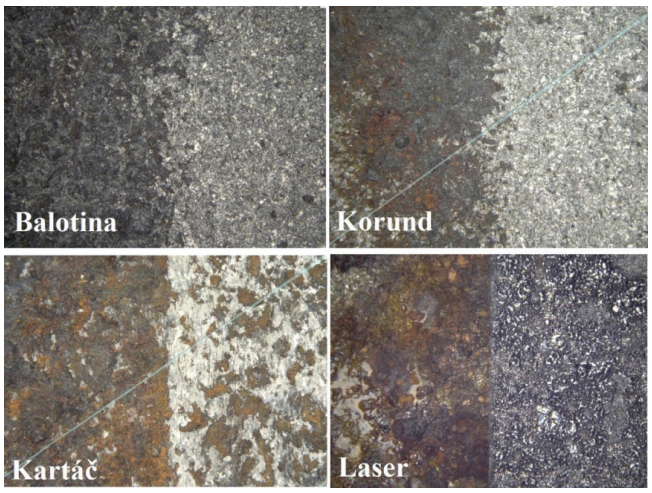
Hmotnostní úbytek	[g]	[%]	[mg.cm^{-1}]
Balotina	0,48	1,27	1,92
Korund	0,71	1,87	2,84
Ocelový kartáč	0,11	0,27	0,44
Laser 25 kHz suchý	0,12	0,30	0,48
Laser 25 kHz voda	0,13	0,33	0,52
Laser 65 kHz suchý	0,11	0,28	0,44
Laser 65 kHz voda	0,13	0,33	0,52

Hodnocení profilometrie vzorků

Pro vytvoření ostrého přechodu mezi zkorodovanou a očištěnou plochou na vzorku byla před čištěním polovina překryta plechem. Nejostřejší přechod se vytvořil u čištění laserem, u ocelového kartáče a pískování byl v některých případech přechod poněkud nejednoznačný. Po očištění byl změřen profil na mikroskopu Keyence při zvětšení 250×. Zaostřenou oblastí byla proložena úhlopříčně linie měření o délce cca 1700 µm a na zkorodované a očištěné polovině byla změřena výška profilu v délce cca 850 µm. Měření bylo provedeno na třech místech každého vzorku a hodnoty zprůměrovány pro každou metodu.



Obr. 6 *Měření profilu rozhraní. Foto archiv © Technické muzeum v Brně / Interface profile measurement. Photo archive © Technical museum in Brno*



Obr. 7 *Rozhraní čisticích metod. Foto archiv © Technické muzeum v Brně / Interface of cleaning methods. Photo archive © Technical museum in Brno*

Tab. 2 *Profilometrie rozhraní vzorků / Sample interface profilometry*

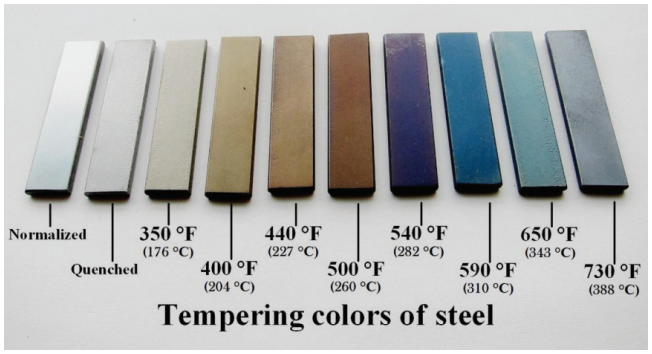
	Prům. kor. [µm]	Prům. čistý [µm]	Snížení [%]
Balotina	27,7	26,7	3,5
Korund	37,3	39,5	–6,0
Ocelový kartáč	27,5	17,2	37,4
Laser 25 kHz suchý	44,0	38,1	13,4
Laser 25 kHz voda	35,4	31,8	10,2
Laser 65 kHz suchý	48,8	42,8	12,3
Laser 65 kHz voda	38,5	38,3	0,6

Hodnocení ohřevu materiálu

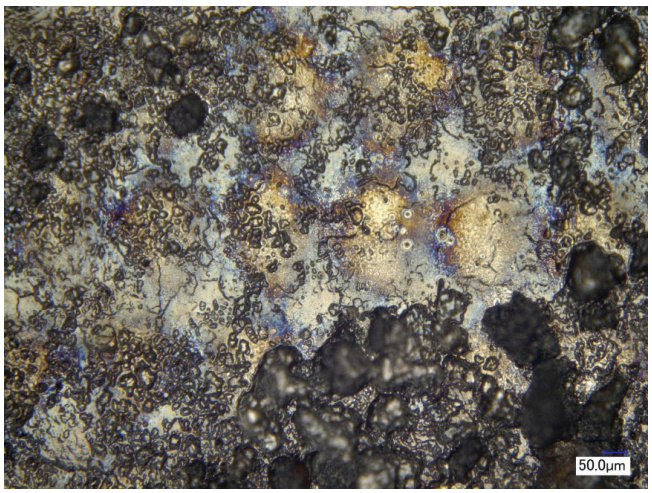
Laserové čištění využívá principu přeměny energie paprsku na teplo, které se částečné uvolní do prostředí a z části je pohlceno čištěným materiálem. Na ohřev vzorku mají vliv zejména vlnová délka, délka pulzu, frekvence a výkon laseru. Tento jev je u většiny čištěných předmětů nežádoucí, jelikož může způsobit změny struktur materiálu i vizuální modifikace na povrchu. Změny ve struktuře by mohly být nežádoucí například u metalografického zkoumání vzorků archeologických kovů, vizuální změna barevnosti je obecně nežádoucí u předmětů kulturní povahy. V závislosti na době působení laseru na povrch, nastavením délky pulzu i trváním čištění, se podkladový materiál lokálně ohřívá na teploty nad 150 °C, při kterých povrch získává popouštěcí barvy. Teplota povrchu byla měřena infračervenou kamerou FLIR E5 v okamžiku dokončení čištění. Vzorek byl vyfocen v módu měření maximální teploty. Druhou indicii nám může poskytnout optické hodnocení popouštěcích teplot. Dalším nezanedbatelným rizikem je možnost zapálení nečistot na povrchu, jako jsou zbytky provozních kapalin u motorů historických vozidel a nebezpečí požáru.

Tab. 3 *Teplota vzorků po čištění / Temperature of samples after cleaning*

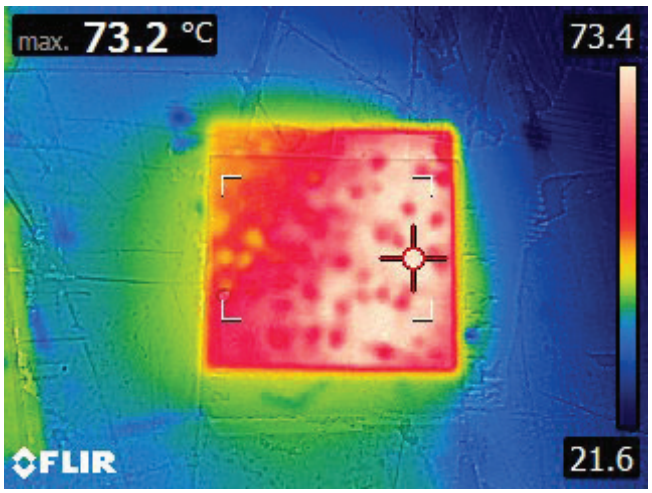
Průměrná teplota	[°C]
Laser 25 kHz suchý	74,9
Laser 25 kHz voda	49,9
Laser 65 kHz suchý	104,9
Laser 65 kHz voda	82,6



Obr. 8 *Popouštěcí teploty a barvy oceli, zdroj: https://www.reliance-foundry.com / Tempering colours of steel, source: https://www.reliance-foundry.com/*



Obr. 9 *Popouštěcí barvy způsobené laserem. Foto archiv © Technické muzeum v Brně / Tempering colours caused by laser. Photo archive © Technical museum in Brno*



Obr. 10 *Snímek vzorku z IR kamery. Foto archiv © Technické muzeum v Brně / Image of the sample from the infrared camera. Photo archive © Technical museum in Brno*

Obr. 11 *Částečně očištěný předmět . Foto archiv © Technické muzeum v Brně/ Partially cleaned object. Photo archive © Technical museum in Brno*

VYHODNOCENÍ

Vizuální hodnocení prokázalo, že čištění ocelovým kartáčem zanechalo na vzorku největší podíl stabilních korozních produktů tmavé barvy a povrch působí mírně naleštěným dojmem ve srovnání s ostatními metodami. Laserové čištění na sucho zanechává na povrchu tyto tmavé korozní produkty v menší míře než kartáčování, jejich vzhled je ovšem matný. Při frekvenci laserových pulzů 65 kHz byla na čistém povrchu kovu znatelná lehká barevná změna způsobená vyššími teplotami. Při laserovém čištění navlhčeného povrchu nebyla tato změna viditelná a docházelo k odstranění většího množství korozních produktů než při suchém čištění. Laserové čištění za vlhka lze proto považovat za účinnější, ale zároveň šetrnější co do ohřevu vzorku. Při čištění tryskáním dochází k rovnoměrnému odstranění korozních produktů bez rozdílu a při použití korundu je jednoduché povrch zcela zbavit korozních produktů.

Dle hmotnostního úbytku při čištění jedné strany různými metodami je laserové čištění srovnatelné s úbytky kartáčováním, cca 0,3 %. Obě metody tryskání (balotinou, korundem) odstranily větší množství materiálu, balotina přibližně 1,3 % a korund 1,9 %. Při optickém porovnání rozhraní očištěného a neočištěného materiálu, je dobře vidět, že očištění pomocí kartáčování ve vyšší míře zanechává korozní produkty v hlubších kavitách materiálu. To u ostatních metod nelze jednoznačně pozorovat.

Dle měření profilometrie na rozhraní korodované a očištěné plochy vzorku lze jednoznačně říci, že nejšetrnější ze zkoumaných metod bylo tryskání skleněnou balotinou. Došlo ke snížení výšky profilu o pouhé 3 %. Oproti tomu tryskání korundem je natolik agresivní, že výška profilu se naopak zvýšila průměrně o 6 % a výsledný povrch byl drsnější. Čištění ocelovým kartáčem vykazovalo největší snížení profilu, o 37 %, protože kartáč více působí na vystouplé části profilu a povrch „uhladí". Naopak v hlubších kavitách korozní produkty zůstávají neodstraněny. Při čištění laserem na sucho došlo k rovnoměrnému snížení profilu, cca o 12 %, u navlhčených vzorků bylo snížení profilu 10 % u frekvence 25 kHz a 0,6 % u 65 kHz. Laserové čištění působí pouze na povrch, neodstraňuje hlubší korozní produkty, a protože nepůsobí mechanickou silou, neodstraní nesoudržné vrstvy. Závěrem lze pouze říci, že výsledky této metody jsou do velké míry ovlivněny lokální mikrostrukturou povrchu. Na jednom vzorku je možné naměřit velký rozptyl hodnot, jelikož koroze neprobíhá zcela rovnoměrně.

Dle makrofotografií po čištění celých povrchů plechů laserem lze říci, že u frekvence 25 kHz bez navlhčení jsou výrazněji zastoupeny světle zlatavé (204–227 °C) odstíny s občasnými fialovými místy (282 °C). U frekvence 65 kHz pak přechody tmavě hnědé až fialové (260–282 °C) s občasnými modrými odstíny (310–343 °C). Po navlhčení vodou převládají na povrchu fialové odstíny pro 25 kHz a modré odstíny u 65 kHz. Při práci byla sledována zvýšená účinnost čištění navlhčených vzorků a měření termokamerou byly pozorovány nižší teploty navlhčených vzorků oproti suchým. To dokazuje kladný vliv vznikající vodní páry na odlučování vrstvy korozích produktů a zároveň voda lépe odvádí teplo z materiálu vypařováním díky vysoké tepelné kapacitě.

ZÁVĚR

Laserové čištění je moderní metoda vhodná pro čištění předmětů kulturního dědictví, která nabízí mnoho výhod, ale má i své limity. Mezi nevýhody patří vysoká pořizovací cena, možné tepelné poškození předmětu při nevhodném nastavení parametrů. Dále je problematické odstraňování hlubší koroze a nesoudržných vrstev, protože laser působí pouze povrchově. Možností je postupovat po jednotlivých vrstvách při navlhčení vzorku. Výhodami jsou čistota provozu, nízké provozní náklady, absence chemikálií, rychlost a možnost čištění i v jinak špatně dostupných místech, jako například mezi chladicími žebry motorů. Zkoumání umožnilo srovnání s běžně používanými metodami jako je tryskání a čištění ocelovým kartáčem, a ukázalo, že laserové čištění je výhodné pro odstraňování korozních produktů. Laserové čištění vykazovalo stejné hmotnostní úbytky jako kartáčování, ale nižší než tryskání. Vlastnosti laseru a možnosti jeho využití budou nadále zkoumány na pracovištích MCK, plánované je zkoumání využití laseru při čištění dalších kovů, patin, odstraňování nátěrů a čištění papíru. Předmětem další studie bude zkoumání vlivu tepla generovaného laserem na metalografickou strukturu vzorku, mineralogické složení korozních produktů po laserovém čištění a možnosti odstraňování chloridů z produktů koroze.

PODĚKOVÁNÍ

Tento recenzovaný odborný článek vznikl na základě Institucionální podpory dlouhodobého koncepčního rozvoje výzkumné organizace Technické muzeum v Brně poskytované Ministerstvem kultury České republiky.

LITERATURA

- ASMUS, J. F. Light cleaning: laser technology for surface preparation in the arts. *Technology and Conservation Boston*, 1978, 3.3: 14–18.
- CASTILLEJO, M., et al. (ed.). *Lasers in the Conservation of Artworks: Proceedings of the International Conference Lacona VII, Madrid, Spain, 17–21 September 2007*. CRC Press, 2008.
- DRAKAKI, E., et al. Laser cleaning on Roman coins. *Applied Physics A*, 2004, 79: 1111–1115.
- KOH, Y. S. *Laser cleaning as a conservation technique for corroded metal artifacts*. 2006. PhD Thesis. Luleå tekniska universitet.
- PEREIRA-PARDO, L. – KORENBERG, C. The use of erbium lasers for the conservation of cultural heritage. A review. *Journal of Cultural Heritage*, 2018, 31: 236–247.
- PINI, R., et al. Tests of laser cleaning on archeological metal artefacts. *Journal of Cultural Heritage*, 2000, 1: S129–S137.
- Produktový katalog Narran ROD Pulzní čisticí lasery [cit. 2. 2. 2023]. Dostupný z: https://narran.cz/wp-content/uploads/2022/01/cz--cistici-katalog-1-compressed.pdf
- REZK, R. A. – ABDEL GHANY, N. A. – MOSTAFA, A. M. Laser-Assisted Method for Cleaning and Analysis of Archaeological Metallic Coins. *Coatings*, 2022, 12.10: 1548.
- SALIMBENI, R. Laser techniques for conservation of artworks. *Archeometriai Műhely*, 2006, 3.1: 34–40.
- SELWYN, L. S. – SIROIS, P. I. – ARGYROPOULOS, V. The corrosion of excavated archaeological iron with details on weeping and akaganeite. *Studies in conservation*, 1999, 44.4: 217–232.
- SIANO, S., et al. Laser cleaning in conservation of stone, metal, and painted artifacts: state of the art and new insights on the use of the Nd: YAG lasers. *Applied Physics A*, 2012, 106: 419–446.
- SIANO, S. Principles of laser cleaning in conservation. *Handbook on the use of lasers in conservation and conservation science*, 2007, 26.
- SIANO, S. – PINI, – SALIMBENI, R. Coated bronze cleaning by Nd: YAG lasers. In: *Laser Techniques and Systems in Art Conservation*. SPIE, 2001. p. 42–45.
- SIANO, S. – SALIMBENI, R. The Gate of Paradise: physical optimization of the laser cleaning approach. *Studies in Conservation*, 2001, 46.4: 269–281.