

Čištění sousoší sv. Jana Nepomuckého z pražského Pohořelce s využitím laseru

Jakub DOUBAL

ANOTACE: Článek shrnuje základní principy laserového čištění a představuje jeho praktickou aplikaci na příkladu sousoší sv. Jana Nepomuckého z pražského Pohořelce. Základem pro posouzení různých metod čištění (abrazivní, chemické, laserové) bylo důkladné laboratorní a restaurátorské vyhodnocení jejich zkoušek. Ze zkoumaných metod byla vybrána jako nejcitlivější metoda využívající laserový paprsek, jež byla použita pro očištění skulptury v návaznosti na celkovou koncepci restaurování objektu. Závěrečná diskuse popisuje některé limity užití zkoumaných metod čištění.

Úvod

Předkládaný text popisuje restaurování sousoší sv. Jana Nepomuckého z Pohořelce v Praze (obr. 1) se zaměřením na problematiku čištění této skulptury. Čištění je při restaurování kamenných památek jedním z nejběžnějších a zároveň nejrizikovějších procesů. Z povrchu kamene jsou při něm odstraňovány depozity, korozní produkty a další nečistoty, které mění vzhled, překrývají modelaci nebo způsobují poškození památky. Jde tedy o velmi zásadní krok jak z hlediska filozofie restaurování, tak i z pohledu techniky a technologie restaurování. Restaurovaná skulptura přitom představovala z pohledu čištění mimořádně složitý problém, neboť použitý pískovec mšenského typu je poměrně měkký a nečistoty jsou pevně fyzikálně a chemicky propojené se substrátem. Socha je navíc velmi jemně modelovaná s vysokou precizností sochařského zpracování detailu. V rámci zkoušek čištění bylo proto kromě standardně využívaných metod testováno i čištění laserem. V zahraničí je použití laseru pro čištění památek relativně etablované, i když publikované vědecké a případové studie se soustředí spíše na karbonátové materiály a využití této metody k čištění silikátových pískovců se autoři věnují v mnohem menší míře.¹ Přestože v Čechách je mezi odbornou veřejností metoda čištění laserem známá, od popisu zkoušky laseru na soše sv. Víta na Karlově mostě v roce 1999² se zmínky o laserovém čištění konkrétní památky objevují v odborných textech výjimečně. V posledních letech přitom zaznamenal vývoj v oblasti čištění památek značný posun a v praxi použitelná laserová zařízení už jsou na trhu relativně dostupná.

Laserové čištění kamenných památek – úvod do problematiky

Proces čištění laserem (nazývaný laserová ablace) představuje relativně složitý a komplexní mechanismus, jehož charakteristiku se pokusíme pro potřeby tohoto článku zjednodu-

šit s tím, že podrobný popis lze nalézt v odborné literatuře.³

V zásadě jde o proces, kdy je během čištění laserový paprsek s vysokou energií z větší části absorbován tmavě zabarvenými povrchovými nečistotami, zatímco kámen samotný (který je obvykle světlého zabarvení) dopadající záření odráží. Při absorpci záření ve znečištěné (tmavé) vrstvě dochází k interakci (fotoablace), která spočívá v kombinaci tepelných a mechanických reakcí. Laserová ablace nečistot je nelineární proces, který se objevuje, pokud fluence⁴ ozařování – nebo v některých případech intenzita (špičkový výkon na jednotku plochy) – překoná kritickou hranici vlastní struktury ozařovaného materiálu. Dynamický rozvoj laserové ablace zahrnuje optické, fototepelné a fotomechanické jevy v závislosti na parametrech laseru a vlastnostech materiálu.

Tepelná reakce způsobuje rychlý, úzce lokalizovaný a krátkodobý nárůst teploty na povrchu materiálu, který vede k tavení, odpařování a vzniku plazmy (neutrálního ionizovaného plynu) s teplotou vyšší než několik tisíc stupňů.

Tzv. „mechanická reakce“ je laserem vyvolaná tvorba plazmy, následovaná dynamickým rozpínáním, vytvářející nárazové vlny a zvukové vlny, které se šíří materiálem, rozbíjejí ho a způsobují rozptýlení částic různých velikostí doprovázené charakteristickým praskavým zvukem. Mechanické účinky čištění lze za určitých podmínek zesilovat navlhčením nečistot, kdy dochází k prudké přeměně vody z kapalně do plynné fáze, což je spojeno s ablací nečistot.

Poměr tepelných a mechanických reakcí závisí na několika faktorech, jako je délka trvání pulzu, složení daného materiálu a přítomnost vody. Pro účinnost a kvalitu laserového čištění jsou zásadní optické, mechanické a tepelné vlastnosti kamene a nečistot na jeho povrchu.

Pro restaurování se používají převážně pevnolátkové pulzní lasery Nd:YAG.⁵ V minulosti byly zkoušeny i jiné systémy (například plynové

excimerové lasery⁶), ale pro čištění kamene se v praxi příliš neprosadily, neboť jsou většinou mnohem rozměrnější a vyžadují náročnější údržbu. Až donedávna představoval nejpoužívanější systém využíváný pro čištění kamene přístroj QS (Q-switch) Nd:YAG s paprsky o vlnové délce 1 064 nm a s délkou trvání pulzu 6–20 ns o energiích mezi 0,1–1 J/pulz. Nová třída laserů, která se dostala na trh v posledních letech, má střední délku trvání pulzu. Tyto systémy jsou založeny na Short Free Run-

■ Poznámky

1 Více k využití laseru k čištění pískovců například: Stefan Klein – Theodosia Stratoudaki et al., Comparative study of different wavelengths from IR to UV applied to clean sandstone, *Applied Surface Science* CLVII, 2000, č. 1–2, s. 1–6. – Salvatore Siano – Francesca Fabiani – Roberto Pini et al., Determination of damage threshold to prevent side effects in laser cleaning of Pliocene sandstone of Siena, *Journal of Cultural Heritage* I, 2000, Supplement 1, s. 47–53. – Giancarlo Calcagno – Erich Pummer – Manfred Koller, St. Stephen's Church in Vienna: criteria for Nd:YAG laser cleaning on an architectural scale, *Journal of Cultural Heritage* I, 2000, Supplement 1, s. 111–117.

2 Petr Justa, Aplikace laserové technologie při restaurování sochy sv. Víta v Praze na Karlově mostě, in: *STOP – Čištění kamene laserem*, Praha 1999, s. 21–27.

3 Více o principu čištění laserem například v: Martin Cooper, *Laser cleaning in conservation: an introduction*, Woburn 1998. – Manfred Schreiner – Matija Strlič – Renzo Salimbeni, *Handbook on the use of lasers in conservation and conservation science*, Brusel 2008 (dostupné online: <http://www.science4heritage.org/COSTG7/booklet>, vyhledáno 11. 5. 2018).

4 Fluence je pulzní energie rozložená na ozařovanou plochu uváděná v J/cm².

5 Nd:YAG znamená, že aktivním prostředím je monokrystal yttrium aluminium granátu dopovaný atomy neodymu.

6 Stefan Klein – Theodosia Stratoudaki et al., Laser-induced breakdown spectroscopy for on-line control of laser cleaning of sandstone and stained glass, *Applied Physics A* LXIX, 1999, č. 4, s. 441–444.



1



2

ning (SFR) režimu, poskytujícím pulzy mezi 20–120 μs ,⁷ nebo Long Q-Switching (LQS) s pulzy o délce 50 ns – 3 μs .⁸ Tato zařízení pracují v podstatě se stejnými energiemi jako QS lasery, ale zásadním rozdílem je doba trvání impulsu (doba trvání je v případě SFR až 1 000× delší než QS, LQS operují zhruba s 10–100× delším impulzem než QS).⁹ Právě doba impulsu je velmi důležitým parametrem, který zásadně ovlivňuje principy interakce laseru se substrátem: při kratších pulzech a vyšší špičkové energii působí spíše mechanická reakce. Delší impulsy, které produkuje systém SFR, využívají převážně efektu tepelné reakce. QS lasery jsou mnohem efektivnější ve smyslu rychlosti ablace, ale zároveň teoreticky mohou být v některých případech méně kontrolovatelné, neboť díky vysoké „špičkové energii“ dochází k relativně rychlému odstranění většího množství materiálu. SFR lasery jsou „pomalejší“ a efekt čištění by měl být citlivější. U některých typů nečistot je však mechanický efekt mnohem účinnější, případně jediný reálně využitelný.

Rozvoji SFR a LQS laserů a zkouškám jejich praktického užití¹⁰ napomohly i problémy sou-

visející se žloutnutím povrchu, které se objevily v některých konkrétních případech při užití QS laserů, zejména na mramoru a vápencích. QS Nd:YAG systémy přišly s možností nastavitelné vlnové délky, která může efekt zežloutnutí povrchu minimalizovat.¹¹ Nižší vlnové délky však výrazně snižují účinnost, což limituje jejich užití spíše na tenké vrstvy nečistot a jejich využití je popsáno spíše u jiných materiálů,

■ Poznámky

7 Piero Mazzinghi – Fabrizio Margheri, A short pulse, free running, Nd:YAG laser for the cleaning of stone cultural heritage, *Optics and lasers in Engineering* XXXIX, 2003, č. 2, s. 191–202.

8 Veronique Verges Belmon – Oliver Rolland – Irène Jourdeuil et al., Nd:YAG Q-switched versus short free-running laser cleaning trials at Chartres cathedral, France, *Studies in conservation* LX, 2015, Supplementum 1, s. 12–18.

9 Renzo Salimbeni – Roberto Pini – Salvatore Siano, A variable pulse width Nd:YAG laser for conservation, *Journal of Cultural Heritage* IV, 2003, Supplement 1, s. 72–76.

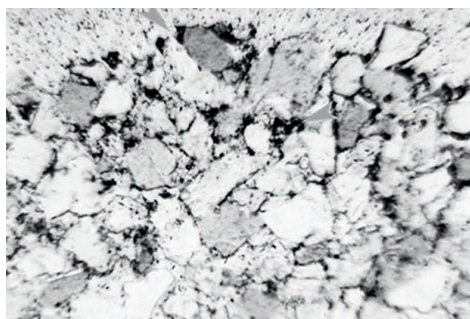
10 Giuseppe Sabatini – Marco Giamello – Roberto Pini et al., Laser cleaning methodologies for stone façades

Obr. 1. *Sousoší sv. Jana Nepomuckého v Praze na Pohořelci. Stav před restaurováním. Sochy byly výrazně tmavší než spodní část. Při pohledu proti obloze se u ztmavělých soch zcela slévala modelace a byly vnímatelné pouze jako černé siluety. Foto: Lukáš Brotánek, 2015.*

Obr. 2. *Socha sv. Jana po transferu do ateliéru. Na soše se nacházelo znečištění různé intenzity a původu. Foto: Jakub Ďoubal, 2016.*

and monuments: laboratory analyses on lithotypes of Siena architecture, *Journal of Cultural Heritage* I, 2000, Supplement 1, s. 9–19. – Roberto Pini – Salvatore Siano – Renzo Salimbeni, Application of a new laser cleaning procedure to the mausoleum of Theodorici. *Journal of Cultural Heritage* I, 2000, č. 1, s. 93–97. – Paraskevi Pouli et al., Pollution encrustation removal by means of combined ultraviolet and infrared laser radiation: the application of this innovative methodology on the surface of the Parthenon west frieze, in: *Lasers in the conservation of artworks: LACONA V proceedings, Osnabrück, Germany, Sept. 15–18, 2003*, New York 2005, s. 333–340.

11 Salvatore Siano et al., The conservation intervention on the Porta della Mandorla, in: *Lasers in the conservation of artworks: LACONA V proceedings, Osnabrück, Germany, Sept. 15–18, 2003*, New York 2005, s. 171–178.



3

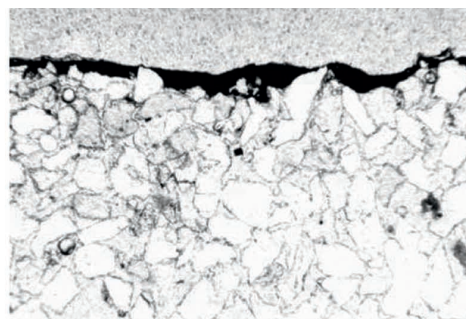
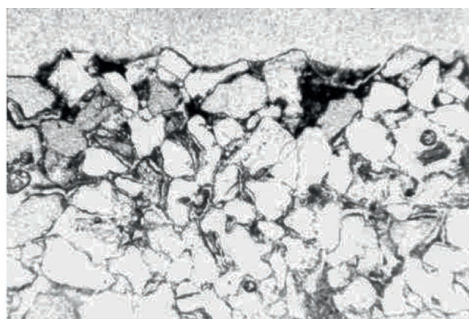
Obr. 3. Ilustrační obrázek – optická mikroskopie: výbrus, depozice nečistot v podpovrchové zóně (zleva: maletínský pískovec, mšenský pískovec, žlutý – petřický pískovec). Na výbrusech je patrná rozdílná depozice nečistot v různých pískovcích. Ze snímku je zřejmé, jak hluboko do substrátu nečistoty pronikly, případně jestli uzavírají porézní strukturu substrátu. Foto: Jakub Ďoubal, 2013.

než je kámen (papír,¹² nástěnné malby¹³). Současný vývoj se soustředí na optimalizaci a větší verzilitu přístrojů¹⁴ umožňujících nastavení různých parametrů včetně vlnové délky, respektive režimu impulsu. Dále je vývoj zaměřen na výrobu kompaktnějších přístrojů snadno použitelných i v terénu a na lešení.

Sousoší sv. Jana Nepomuckého z Pohořelce – základní informace o soše a shrnutí výsledků průzkumu

Sousoší vzniklo roku 1752 (dle datace uvedené v chronogramu na podstavci). Za jeho autora je považován pražský sochař Jan Antonín Quittner.¹⁵ Svatý Jan Nepomucký je zde vyobrazen s křížem a rybou. Postava je komponována v klidném kontrastu s ušlechtilou esovitou tělesnou linií. Skulptura stojí na vysokém trojdílném podstavci, který se konválně otvírá do prostoru. Na lehce prohnutých postranních ramenech podstavce jsou situovány dva andělé na oblacích s dalšími atributy Jana Nepomuckého, levý nese reliéf Staroboleslavského Paládia a pravý si klade prst na ústa.¹⁶ Bohatě zdobené raně rokokové sousoší stojí uprostřed náměstí na Pohořelci, což ale není jeho původní umístění. Od svého vzniku až do roku 1846 stávalo na rohu Hradčanského náměstí a Kanovnické ulice.¹⁷ Špatný stav sochy se projevil již v minulosti a socha byla mnohokrát restaurována. Z dochovaných restaurátorských zpráv vyplývá, že zejména v 60.–80. letech probíhaly opravy ve velmi krátkých intervalech.¹⁸ Naopak od roku 1989 se nám nepodařilo dohledat žádnou další restaurátorskou zprávu a socha byla od té doby zřejmě ponechána svému osudu.

V rámci restaurátorského průzkumu jsme provedli komplexní vyhodnocení stavu sousoší, byla pořízena fotodokumentace dochovaného



stavu a vytvořeny zákresy poškozených částí sousoší. Pro zjištění informací o památce a stavu v průběhu její existence byla provedena rešerše dochovaných restaurátorských dokumentací. K chemicko-technologické analýze byly odebrány vzorky na zjištění salinity a také vzorky starších tmelů, tmavých vrstev a zbytků barevných povrchových úprav, odebrali jsme také materiál pro petrografickou analýzu. Památka byla dále podrobena měření stavu kamene pomocí ultrazvukové transmise.

Petrologický průzkum potvrdil použití dvou typů pískovců. Architektura podstavce je vytvořena z křemenného pískovce/arkózy z lokality Kamenné Žehrovice, zatímco vrcholové sochy jsou z jemnozrnného křemenného pískovce mšenského typu.¹⁹ Užití dvou typů kamene s rozdílným vzhledem a způsobem depozice nečistot způsobilo, že horní, figurální část (sochy sv. Jana Nepomuckého a andělů) byla výrazně tmavší než část spodní. Při čelním pohledu proti obloze se u tmavých soch zcela slévala modelace a ty byly vnímatelné pouze jako černé siluety. Povrch uzavřený silikátovým filmem vykazoval nulovou nasákavost. Přes tmavé depozity byl v minulosti nanesen tenký hnědošedý nátěr, který měl nejspíše za cíl zmírnit kontrasty znečištěných míst. Ve srážkových stínech se lokálně vyskytovaly sádrovcové krusty.

Vzhledem k zaměření tohoto článku se zde nebudeme rozepisovat o všech zjištěních v průběhu průzkumu. Důležité je zmínit ještě několik faktů, které ovlivnily postup prací: měření ultrazvukové transmise poukázalo na závažné strukturální problémy (lasy a praskliny narušující statiku sochy) a také narušení povrchové vrstvy kamene, což byl důvod k sejmutí soch a jejich převezení do ateliéru (obr. 2). Na povrchu soch byly identifikovány fragmenty povrchových úprav (převážně v bělavých tónech) a v kameni se nacházela rezidua zmýdelněných olejů jakožto pozůstatek snímání někdejších povrchových úprav s užitím alkálií. O tom, že sousoší bylo v minulosti mnohokrát restaurováno, svědčí kromě množství dochovaných dokumentací také četné vysprávkování samotné skulptury.

Problematika čištění soch

Základní očištění soch bylo provedeno pomocí vysavače a jemných kartáčků. Následně byl povrch omyt regulovanou vodní párou, čímž byl částečně sejmut i dožilý lazurní nátěr (provedený pravděpodobně na bázi akrylátové disperze při předchozím restaurování). Při konzultacích se zástupci památkové péče a s Galeríí hlavního města Prahy, jež má objekt ve správě, jsme diskutovali o nutnosti, respektive míře čištění. Dospěli jsme k závěru, že v tomto případě by bylo vhodné ztenčit silikátový film s cílem prosvětlit sochy tak, aby se svou barevností přiblížily podstavci a jejich modelace se tak stala čitelnější. Dalším důvodem pro alespoň částečné očištění povrchu byla skutečnost, že silikátový film výrazně měnil fyzikální vlastnosti povrchové vrstvy kamene a s tím byly spojeny degradační fenomény objevující se na povrchu. Fakt, že film uzavírá povrch proti srážkové vodě, by nemusel zname-

■ Poznámky

¹² Jana Kolar et al., Laser cleaning of paper using Nd:YAG laser running at 532 nm, *Journal of Cultural Heritage* IV, 2003, Supplement 1, s. 185–187.

¹³ Carolina Gaetani – Ulderico Santamaria, The laser cleaning of wall paintings, *Journal of Cultural Heritage* I, 2000, Supplement 1, s.199–207.

¹⁴ Belmon – Rolland – Jourdeuil (pozn. 8).

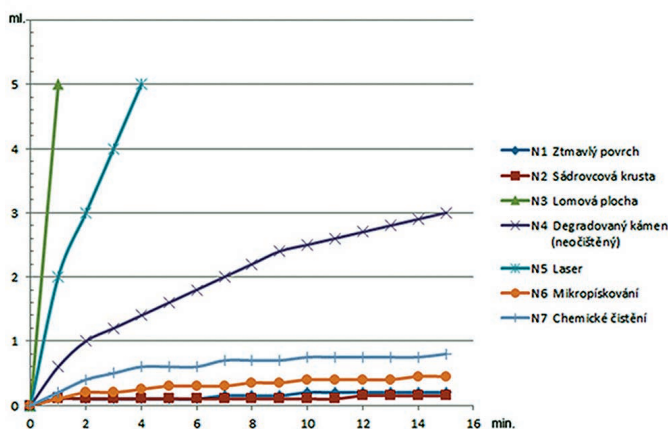
¹⁵ Oldřich Blažíček, *Pražská plastika raného rokoka*, Praha 1946, s. 86.

¹⁶ Eva Petříková, *Jan Antonín Quittner (1709–1765)* (diplomová práce), Ústav pro dějiny umění FF UK, Praha 2008, s. 120, dostupné on-line: <https://is.cuni.cz/web-apps/zp/download/120050626>, vyhledáno 11. 5. 2018.

¹⁷ RB [Růžena Batková], heslo Sousoší sv. Jana Nepomuckého, in: Pavel Vlček (ed.), *Umělecké památky Prahy. Pražský hrad a Hradčany*, Praha 2000, s. 456.

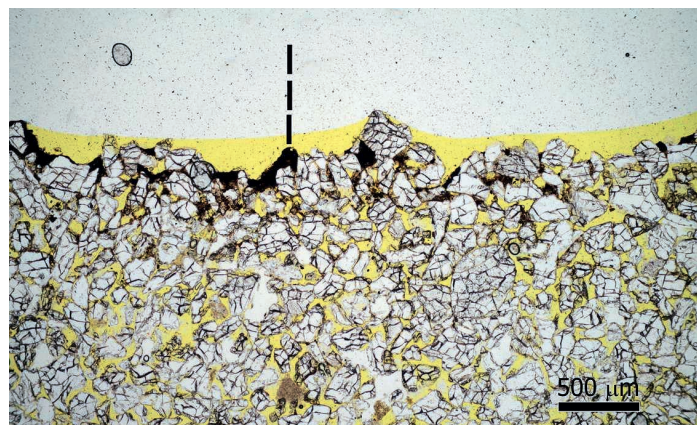
¹⁸ 1965 – A. Grim, 1970 – A. Grim, 1975 – M. Prokop, 1978 – R. Soudek, 1985 – L. Pícha, 1985 – J. Landík, B. Měchura, Restaurátorské zprávy jsou uloženy v archivu GHMP.

¹⁹ Petrologický průzkum zpracovaný RNDr. Zdeňkem Štaffenem obsažený v restaurátorské dokumentaci: Jakub Ďoubal et al., *Restaurátorská zpráva: sousoší sv. Jana Nepomuckého na Pohořelci*, Litomyšl 2016 (nepublikovaný strojepis uložený na Fakultě restaurování Univerzity Pardubice, detašovaném pracovišti v Litomyšli).



Obr. 4. Měření kapilární nasákavosti karstenovou trubicí (vzorky byly provedeny na nepohledové straně pravého andílka).

Obr. 5. Výbrus z rozhraní zkoušky čištění laserem na sousoší sv. Jana Nepomuckého. Na výbrusu je vidět rozhraní mezi čistěným a nečistěným povrchem křemičitého pískovce. V levé části je možné pozorovat tmavé nečistoty pokrývající povrch a částečně zasahující do hloubky pórů kamene, ze kterých je již není možné odstranit. Na pravé straně je stav po očištění, kdy metoda čištění laserem ponechává strukturu zrn bez poškození. Foto: Renata Tišlová, 2016.



nat jednoznačně komplikaci. Problém spočíval v tom, že se na soše vedle těchto uzavřených míst nacházely plochy již narušené degradací, kde byla nasákavost naopak velmi vysoká. Druhou nevýhodou tmavého filmu je jeho rychlé zahřívání slunečním zářením a riziko poškození v důsledku tepelné roztažnosti na rozhraní mezi povrchovou vrstvou a hmotou kamene.²⁰ Základním kritériem pro výběr metody čištění měla být šetrnost vůči kameni.

Čištění tmavého silikátového filmu ulpívajícího na povrchu pískovcových památek představuje dosti složitý problém. V tomto filmu jsou vázány převážně uhlíkaté nečistoty jako saze, i když se zde vyskytuje i stopové množství dalších prvků (železo, magnézium, hliník, vápník atd.).²¹ Přesný mechanismus vzniku filmu je velmi komplexní proces, na kterém se podílejí zřejmě jak biologické faktory, tak reakce substrátu s polutanty.²² Nečistoty jsou v tomto případě velmi pevně chemicky a fyzikálně propojeny se substrátem a postupně uzavírají povrch a mění jeho fyzikální vlastnosti. V závislosti na porézním systému kamene a dalších okolnostech (historie opravných zákroků, okolní prostředí atd.) se tento film vytváří buď výhradně na povrchu, nebo částečně „porůstá“ do porézního systému (obr. 3). Právě způsob depozice nečistot může zásadně ovlivnit možnosti čištění. V běžné restaurátorské praxi se používají pro čištění tmavého silikátového filmu převážně dva základní způsoby: chemické čištění využívající fluorid amonný,

který rozpouští silikátový film a umožňuje jeho odstranění při následném omytí, a abrazivní čištění, jež využívá obrušovací schopnosti různých druhů abraziva hnaných vzduchem (případně vodou). Již z popisu toho, jak čištění probíhá, je zřejmé, že obě metody představují pro kamenný substrát značné riziko. Právě z důvodů nedostatečné citlivosti dostupných metod bylo v minulosti vyvinuto zařízení využívající laserový paprsek pro čištění nejprve karbonátových a posléze i silikátových hornin.²³

Zkoušky čištění a jejich vyhodnocení

Na základě zkušenosti z předchozí studie,²⁴ která poukázala na rizika spojená s jednotlivými metodami a napomohla najít optimální rozsah nastavení pro jednotlivé techniky, jsme na památku testovali laserové čištění (Q-switched ND:YAG laser Thunder art), mikroabrazivní metodu s jemným abrazivem²⁵ a pro potvrzení laboratorních studií i chemické čištění s využitím komerčně dodávané pasty Remmers fasadenreiniger Paste,²⁶ kde je účinnou složkou fluorid amonný.

Při hodnocení byly sledovány změny v nasákavosti kamene. Pro měření byla na pravé soše andílka vybrána čtyři místa s odlišnými vizuálními vlastnostmi: tmavý silikátový film, sádrocová krusta, degradovaný povrch a lomová plocha. Dále byly provedeny zkoušky čištění mikroabrazivní metodou, laserem a chemickým způsobem, na kterých byla taktéž měřena absorpce kapaliny povrchem (obr. 4).

Měření nasákavosti potvrdilo, že silikátový film i sádrocové krusty uzavírají jinak velmi nasákový povrch kamene. Zároveň tato měření pomohla při hodnocení zkoušek čištění, kdy se největší zlepšení ukazovalo v místě po čištění laserem. Mikroabrazivní metoda a chemické čištění vykazovaly mírné zvýšení absorpce kapaliny. Měření nasákavosti lihem se výrazně nelišilo od měření nasákavosti destilovanou vodou.²⁷ Výsledky zkoušek byly důležité nejen pro hodnocení čištění, ale měly význam i pro další kroky, jako je konsolidace narušeného kamene.

Provedené zkoušky čištění byly dále hodnoceny vizuálním posouzením a s využitím mikroskopie. Pro potvrzení šetrnosti zvolené metody byl odebrán vzorek pro zhotovení výbrusu.

Jak abrazivní čištění, tak užití fluoridu amonného bylo při zkouškách vyloučeno. Na testovaných plochách bylo patrné, že při snaze ztenčit silikátový film dochází při abrazivním čištění místy ke zbroušení zrn, a na rozhraní mezi tvrdším a měkčím povrchem se nedalo zcela zabránit úbytku originálního materiálu, byť v minimálním množství. Vzhledem k velmi jemné modelaci skulptury by i minimální úbytek v povrchové vrstvě znamenal nenávratné ztráty autorského rukopisu. Chemické čištění neumožnilo očistit povrch rovnoměrně a současně docházelo k částečnému vymytí tmelu

■ Poznámky

20 Miguel Gomez-Heras – Bernard J. Smith – Rafael Fort, Surface temperature differences between minerals in crystalline rocks: Implications for granular disaggregation of granites through thermal fatigue, *Geomorphology* LXXVIII, 2006, č. 3–4, s. 236–249.

21 Anders G. Nord – Tore Ericsson, Chemical analysis of thin black layers on building, *Studies in conservation* XXXVIII, 1993, č. 1, s. 25–35.

22 Kyle Normandin – Deborah Slaton, Cleaning Techniques, in: Alison Henry (ed.), *Stone Conservation: Principles and Practice*, Dorset 2006, s. 129.

23 Carlos Rodriguez-Navarro – Kerstin Elert – Eduardo Sebastian et al, Laser cleaning of stone materials: An overview of current research, *Studies in Conservation* XLVIII, 2003, Supplementum 1, s. 65–82.

24 Jakub Ďoubal, Research into the methods of Cleaning the Silicate Sandstones Used for Historical Monuments, *Journal of Architectural Conservation* XX, 2014, č. 2, s. 123–136.

25 Pracovní tlak přístroje Miniblaster I byl 1.5 baru při vzdálenosti 10 cm a velikosti trysky 1,8 mm, abrazivum Korund F 220.

26 Aplikace probíhala dle doporučení v technickém listu: Rovnoměrné nanesení štětcem na suchou plochu. Po působení v délce cca 3–4 minut se plocha důkladně omyje vyvíječem páry.



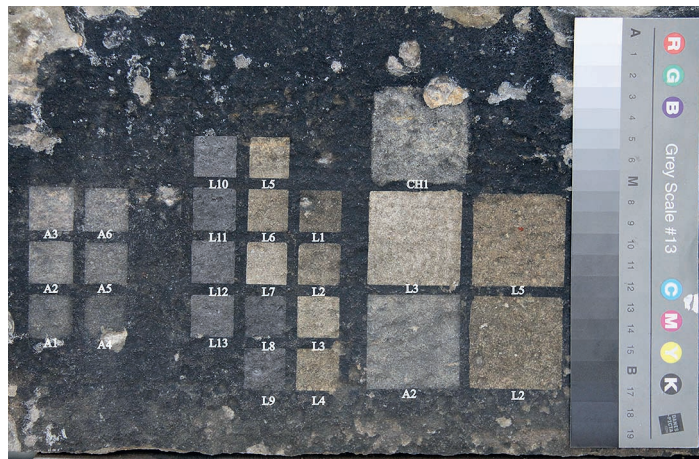
6



7



8



9

Obr. 6. Detail z průběhu čištění laserem – fotografie dokumentuje, že bylo možné laserem provádět čištění i velmi jemných detailů. Foto: Jakub Ďoubal, 2016.

Obr. 7. Průběh čištění sochy laserem Thunder Art. Foto: Jakub Ďoubal, 2016.

Obr. 8. Průběh čištění spodní části. V těchto místech byl film nejsilnější a po jeho částečném odstranění zůstával povrch mírně nažloutlý. Tento problém byl následně řešen jemným mikropískováním. Foto: Jakub Ďoubal, 2016.

Obr. 9. Zkoušky čištění na pískovci měšnického typu. A1–A6 je abrazivní čištění s různými abrazivy a s různým tlakem, L1–L13 jsou zkoušky dvou typů laserového čištění a CH1 je vzorek chemického očištění. Foto: Jakub Ďoubal, 2014.

kamene v přípovrchové vrstvě a k odhalení zn pozorovanému již při citované laboratorní studii.

Vyhodnocení vzorku čištění laserem prokázalo, že tato metoda je v tomto konkrétním případě velmi šetrná ke kameni a jeho povrchu. Laser odstraňuje pouze tmavé nečistoty a nezasahuje do zrn jemného křemičitého pískovce, takže nedochází k jeho narušení (obr. 5). Při zkoumání výbrusu je zřejmé, že část nečistot se nachází hluboko v porézní struktuře substrátu, a není proto možné provést úplné očištění bez poškození kamene. Tento fakt, společně se snahou o zachování „patiny stár“, ovlivnil rozhodování o bezpečné míře čištění skulptury.

Po vyhodnocení zkoušek bylo přistoupeno k očištění sochy sv. Jana Nepomuckého a andlíků pomocí Q-switched ND:YAG laseru.²⁸ Proces čištění byl velmi dobře regulovatelný a umožňoval průběžnou kontrolu. Navíc vzhledem k principu čištění využívajícího paprsek bylo možné rovnoměrně očistit i velmi jemné detaily (obr. 6). Čištění sochy sv. Jana (obr. 7 a 10) zabralo přibližně 40 pracovních hodin a v případě obou andlíků to bylo okolo 20 hodin. Tento čas je sice poněkud delší než v případě citlivého užívání jiných metod, ale tento rozdíl není natolik zásadní, aby limitoval užití laserového čištění na takto významné památce. Vedle silikátových filmů bylo možné laserem ztenčit i sádrovcové krusty nacházející se ve srážkových stínech, a to i v místech, kde překrývaly fragmenty barevných úprav bez ztráty těchto fragmentů.

Na závěr bylo lokálně aplikováno mikropískování pro zmírnění lehce nažloutlého povrchu, jenž byl důsledkem laserového čištění (obr. 9). Na rozdíl od poměrně výrazného žloutnutí, které se někdy objevuje v případě čištění sádrovcové krusty z karbonátových materiálů,²⁹ není tento jev v případě pískovce nijak zásadní a je zřejmě způsoben alterací některých organických složek nečistot, které na povrchu kamene a v porézním systému zůstaly. S větší

intenzitou čištění (která ale nebyla v tomto případě žádoucí) se tento jev ztrácí. Ze zkoumaných vzorků se zdá, že nedochází ke změnám v substrátu a mírné zažloutnutí lze eliminovat v případě potřeby citlivým dočištěním.³⁰ Dočištění bylo prováděno jemným abrazivem při vel-

■ Poznámky

27 Kontrolní měření lihem vyloučilo možnost, že jsou výsledky ovlivněné předchozí hydrofobizací povrchu, kterou mohla být památka v minulosti ošetřena.

28 Čištění probíhalo při vlnové délce 1 064 nm při frekvenci 10 Hz a fluenci 0,6–0,98 J/cm², přičemž použitý přístroj Thunder art má délku impulzu okolo 8 ns.

29 Véronique Vergès-Belmin – Carole Dignard, Laser yellowing: Myth or reality?, *Journal of Cultural Heritage* IV, 2003, Supplement 1, s. 238–244. – María Gavigno – Bernardo Hermosin – Véronique Vergès-Belmin, New insights on the chemical nature of stone yellowing produced after laser cleaning, in: *Cultural Heritage Conservation and Environmental Impact Assessment by Non-Destructive Testing and Micro-Analysis*, Leiden 2005, s. 149–158.

30 Paraskevi Pouli – Mohamed Oujja – Marta Castillejo, Practical issues in laser cleaning of stone and painted artefacts: optimisation procedures and side effects, *Applied Physics A CII*, 2012, č. 2, s. 447–464. – Philippe Bromblet – Martin Laboure – Genevieve Orial, Diversity of the cleaning procedures including laser for the restoration



10



11

mi nízkém tlaku. Použitý tlak a celková intenzita čištění byly mnohonásobně nižší, než by bylo nezbytné v případě přímého čištění tmavého filmu bez předčištění laserem. Při tomto procesu již nedocházelo k zesvětlení povrchu, ale pouze k mírné změně barevného tónu. Průběh dočištění byl kontrolován pod mikroskopem a nedocházelo při něm k zásahu do kamene.

Po očištění, zpevnění kamene, zajištění prasklin a dalších zákrocích nezbytných pro opětovné navrácení soch na původní místo bylo provedeno tmelení plastických defektů a prasklin. Barevná retuš se omezila pouze na zapojení nových vysprávek a díky zvolené míře a způsobu čištění nebylo nutné barevně zasahovat do povrchu kamene s cílem překrýt ztmavlý povrch (obr. 11).

Shrnutí a diskuse

Využití laseru se v případě sochy sv. Jana Nepomuckého ukázalo jako velmi citlivá alternativa ke standardním metodám čištění. Jedná se o bezdotykový proces a může tak být aplikován bez předchozí konsolidace narušených míst, což představuje značnou výhodu. Podobně jako například mikropískování umož-

ňuje laser plynulou regulaci míry očištění a průběžnou kontrolu procesu čištění (obr. 9). Na fotografiích z elektronového mikroskopu pořízených v rámci laboratorní studie³¹ je zřejmý rozdíl ve výsledné morfologii povrchu u zkoumaných technologií čištění (obr. 12). Na rozdíl od ostatních zkoumaných metod nedochází v případě laseru přes zřejmý efekt očištění k zásadním změnám vzhledu povrchové morfologie mšenského pískovce, což dokumentuje šetrnost čištění a zároveň dává jistý předpoklad, že v budoucnu nedojde k zásadní proměně chování tohoto povrchu při opětovném vystavení degradačním vlivům a znečištění. Při předběžném testování na obdobném materiálu byly zkoušeny dva typy laserového zařízení (Q-switched ND:YAG laser Thunder Art a SFR ND:YAG laser EOS 1000sfr). Zatímco výsledky QS laseru byly uspokojivé, testovaný SFR laser nedokázal nečistoty odstranit a došlo pouze k zešednutí povrchu. Existuje celá řada systémů využívajících laserový paprsek pro odstraňování nečistot a každé z těchto zařízení pracuje na trochu jiném principu a často dosahuje zcela jiných výsledků v závislosti na užití vlnové délce, fluenci, délce a rychlosti

Obr. 10. Průběh laserového čištění zadní, výrazně tmavší strany. Pravá strana je již z větší části očištěna. Foto: Jakub Ďoubal, 2016.

Obr. 11. Stav sochy sv. Jana Nepomuckého po restaurování. Foto: Jakub Ďoubal, 2016.

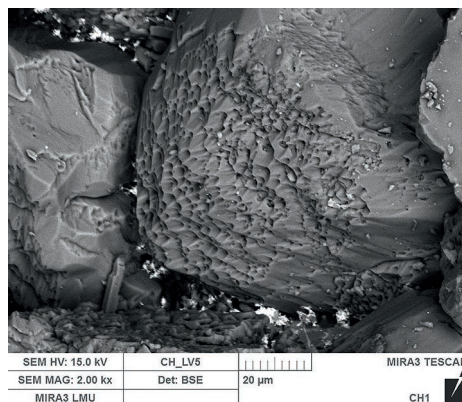
opakování impulsu atd. Proto je vždy nutné hodnotit výsledky konkrétního systému na konkrétní památce a nevztahovat tyto výsledky paušálně na celou technologii využívající pro čištění laserový paprsek. Stejně tak není možné říci, že laserové čištění je vhodné pro všechny typy pískovců. Některé minerály, jako například slída nebo oxidy železa, mají při běžně používané vlnové délce (1 064 nm) vysokou absorpční. ³² Proto je například v případě červených pískovců a arkóz třeba dbát zvýšené opatrnosti, nebo odzkoušet jiné vlnové dél-

■ Poznámky

of carved portals in France over the last 10 years, *Journal of Cultural Heritage* IV, 2003, č. 4, s. 17–26.

³¹ Ďoubal (pozn. 24).

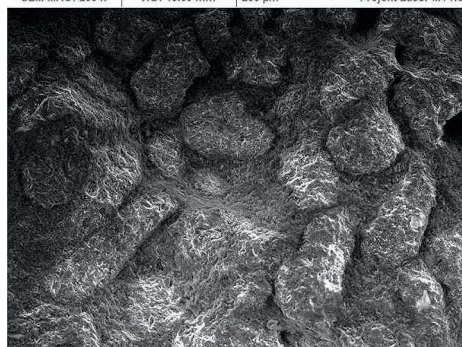
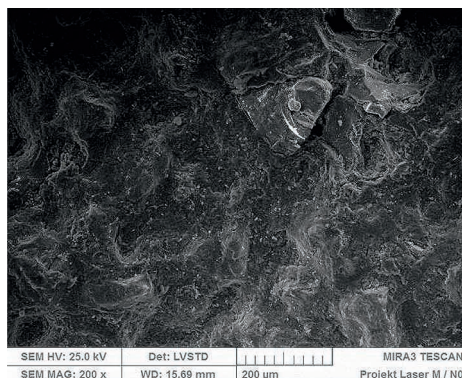
³² Rodríguez-Navarro – Elert – Sebastian (pozn. 23).



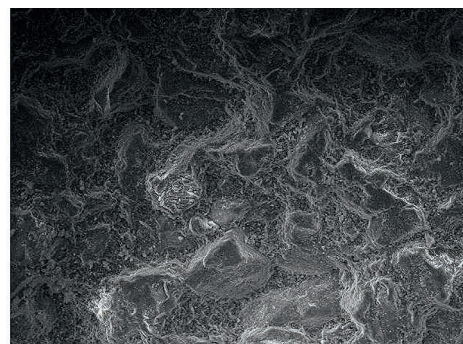
12

Obr. 12. Srovnání změn v morfologii povrchu v elektronovém mikroskopu. Při pozorování je viditelná změna v morfologii povrchu zejména v případě chemického a abrazivního čištění. V případě užití laseru se přes zjevný čistící efekt povrch zásadně nemění. Při vizuálním zkoumání vykazovaly všechny tři vzorky čištění zhruba stejnou míru očištění a rozdíl v morfologii povrchu nebyl pozorovatelný. Foto: Jakub Ďoubal, 2014.

Obr. 13. Ilustrační obrázek – elektronová mikroskopie povrchu: chemické čištění, naleptání zrna fluoridem amonným. Foto: Jakub Ďoubal, 2014.



13



ky.³³ Přes zjevná pozitiva laserového čištění nelze brát tuto metodu zcela bez výhrad. Podobně jako ostatní techniky je i laserové čištění značně závislé na zkušenosti operátora a při špatné aplikaci může být provázeno vznikem jasně ohraničených bodů obdobně, jako můžeme u neodborně opískovaných povrchů sledovat tzv. cestičky. Bývá uváděno, že laserové čištění je samokontrolovaný proces a že se proces čištění po odstranění nečistot sám zastaví, resp. paprsek je dále neúčinný. Tento fakt je ovšem závislý na správném nastavení laserového přístroje a při neodborné manipulaci může snadno dojít k poškození kamene.³⁴ Při práci s laserem je nutné dodržovat poměrně přísná pravidla bezpečnosti práce.³⁵ Laserový paprsek může mimo jiné vážně poškodit zrak a je třeba zajistit ochranu okolí, což klade zvýšené nároky na zajištění pracoviště zejména při práci in situ. Jistým omezením pro širší užití laseru pro kamenné památky jsou logistické nároky³⁶ a jeho vyšší pořizovací cena. Dodnes je v Čechách laserovým přístrojem použitelným pro kamenné památky v exteriéru vybaveno jen několik pracovišť. Na druhou stranu, pokud zde nebude (alespoň u nejvýznamnějších památek) kladen důraz na užití nejšetrnější metody, která bude vybrána na základě důkladné vyhodnocení zkoušek čištění, nebudou mít restaurátoři a restaurátorské firmy důvod si dražší a na obsluhu mnohdy náročnější technologie pořizovat. V prostředí, kde většinou jediným kritériem výběru dodavatele je nabídková cena, by se restaurátoři

s dražším a na provoz nákladnějším zařízením stali nekonkurenceschopnými.

Mikropískování s využitím vhodného abraziva může být pro některé typy pískovců relativně citlivou metodou čištění, ale v případě měkkých (slabě silicifikovaných) pískovců, respektive materiálů s nehomogenním povrchem, s sebou nese značná rizika. Vzhledem k velkému rozdílu v tvrdosti povrchové vrstvy nečistot oproti jádru kamene je u pískovce mšenského typu riziko výrazně vyšší než například u pískovce maletínského. I u kamenů, které nevykazují takový rozdíl v pevnosti mezi povrchovou vrstvou a substrátem, bylo při pískování sledováno narušení na úrovni jednotlivých zrn, což do budoucna může představovat jistý problém jak z hlediska akcelerace degradace, tak z hlediska vyšší receptivity pro nečistoty. K pozitivům abrazivního čištění patří dobrá kontrolovatelnost míry očištění a možnost plynulé regulace míry čištění (tlakem, vzdáleností, typem trysky, tvrdostí a tvarem abraziva). Zajímavé byly pozorované výsledky zkoušek čištění, které jsou v rozporu se zažitou představou, že čím je měkkší abrazivo, tím je čištění citlivější. Zejména v případě nehomogenního povrchu kamene nebo tam, kde je povrchová vrstva výrazně tvrdší než substrát, může být užití velmi ostrého a přitom jemnozrnného abraziva, jako je korund, citlivější než například užití mletého vápence, neboť měkkší a méně ostré abrazivo vyžaduje pro dosažení stejného efektu očištění vyšší tlak, což s sebou nese větší riziko poškození na rozhraní různě tvrdých povrchů.

Chemické čištění pomocí pasty je z aplikačního hlediska velmi jednoduchou a dostupnou metodou nevyžadující žádné speciální a nákladné vybavení. I proto se tato metoda těší velké oblibě i přes značná rizika, která s sebou přináší. Čištění s využitím komerčně dodávané čisticí pasty na bázi fluoridu amonného bylo u nás zkoumaných objektů relativně málo efektivní, neboť pro dosažení čistícího efektu bylo nutné celý proces několikrát opakovat. Výsledný efekt čištění byl značně nehomogenní a ze zkoumaných metod v tomto případě asi nejméně vhodný. Navíc při chemickém čištění docházelo v povrchové vrstvě kamene k částečnému vymytí dotykového tmelu a odhalení jednotlivých zrn, což může ovlivnit odolnost té-

■ Poznámky

33 Stefan Klein – Theodosia Stratoudaki et al., Comparative study of different wavelengths from IR to UV applied to clean sandstone, *Applied Surface Science* CLVII, 2000, č. 1–2, s. 1–6.

34 Jiřina Svobodová – Martin Slovák – Richard Přikryl et al., Effect of low and high fluence on experimentally laser-cleaned sandstone and marlstone tablets in dry and wet conditions, *Journal of Cultural Heritage* IV, 2003, Supplement 1, s. 45–49.

35 Martin Cooper – Véronique Vergès-Belmin – Margarida Pires et al., *Cleaning Safely with a Laser in Artwork Conservation*, Liverpool 2006.

36 V případě provádění čištění in situ je třeba předem počítat s úpravou lešení pro snadnější manipulaci a přístup s laserovým zařízením.

Obr. 14. Stav po restaurování – kontrast mezi podstavcem a sochařskou částí skulptury byl díky selektivnímu čištění zmenšen a modelace skulptur je čitelnější. Foto: Zuzana Auská, 2016.

to vrstvy proti povětrnostním vlivům. Při zkoumání vzorků v elektronovém mikroskopu bylo na silikátových pískovcích v rámci laboratorní studie sledováno i naleptání povrchu zrn (obr. 13).³⁷ Tento jev může mít v budoucnu podobně jako v případě mikropískování negativní vliv na rychlost degradace a opětovného znečištění památky vzhledem k výraznému nárůstu specifického povrchu. Kromě rizik popsanych výše je zde celá řada dalších aspektů, které by měly být zvažovány před použitím této metody. Jedním z nich je nutnost vysokého zavlhčení památky při vymývání čisticí pasty, což může vést k aktivaci vodorozpustných solí, případně zbytků zmýdelněných olejů, při které hrozí vytvoření hnědých, těžko odstranitelných skvrn na povrchu. Výše popsanych rizik spojených s touto metodou jsme si byli vědomi již před vlastním testováním. Chemické čištění jsme nicméně přesto do zkoušek zařadili, neboť v praxi je tato metoda i pro tento typ pískovce poměrně hojně využívána a chtěli jsme porovnat výsledky čištění s dalšími dostupnými metodami.

Závěrem je třeba říci, že při čištění konkrétních památkových objektů je často nutné kombinovat různé metody čištění, neboť znečištěný povrch je výsledkem mnohaletého působení různých faktorů a nečistoty mají rozdílný charakter. Předkládaný text se soustředí na možnosti redukce tmavého silikátového filmu a zmiňuje určité limity a rizika spojená s užitím zkoušených metod čištění. Ve všech případech je pro výsledek velmi důležitá erudice provádějícího restaurátora a také spolupráce s dalšími odborníky, zejména při vyhodnocování vlastností substrátu, charakteru nečistot a instrumentálním hodnocení výsledků zkoušek čištění.³⁸ Rozhodování o nutnosti a míře čištění musí probíhat individuálně v případě každé památky a na platformě interdisciplinární diskuse mezi památkářem, investorem, restaurátorem, technologem a dalšími specialisty.

Článek se soustředí na vybranou část restaurování – čištění, nicméně je samozřejmé, že tento zákrok byl nedílnou součástí celého procesu restaurování a nelze na něj nahlížet zcela odděleně. I v případě sousosí sv. Jana Nepomuckého z Pohořelce vycházely jednotlivé kroky z celkové koncepce restaurování sestavené na základě detailního poznání díla a konzultace s příslušnými specialisty. Vlastní čištění bylo integrální součástí vzájemně pro-



14

vázaných kroků, které směřovaly k eliminaci příčin a důsledků poškození a opětovné důstojné prezentaci této historicky a umělecky cenné sochařské památky (obr. 14).

Rádi bychom poděkovali Ing. Karolu Bayerovi, Ing. Renatě Tišlové, Ph.D., a Ing. Petře Lesniakové, Ph.D., za spolupráci při zpracování laboratorního průzkumu k soše sv. Jana Nepomuckého a studentům a absolventům Fakulty restaurování Univerzity Pardubice MgA. Lukáši Brotánkovi, Zuzaně Auské, Jiřímu Škarvadovi, Kláře Teturové, BcA. Michaela Glaserové, MgA. Barboře Glombové a MgA. Petru Rejmanovi za spolupráci na dílčích úkonech v rámci restaurování celé skulptury.

■ Poznámky

37 Jakub Ďoubal, Srovnání čištění laserem s dalšími metodami čištění na silikátových pískovcích, in: *Interdisciplinarita v péči o kulturní dědictví: Sborník z konference*, Pardubice 2013, s. 205–214.

38 Jakub Ďoubal, Možnosti objektivního hodnocení čištění kamene, in: *Arte-fakt: Restaurování a obnova uměleckých děl: Čištění uměleckých děl*, Kutná Hora 2014, s. 14–21.