

Srovnání čištění laserem s dalšími metodami čištění na silikátových pískovcích

Jakub Ďoubal

Fakulta restaurování Univerzity Pardubice
Faculty of Restoration – University of Pardubice
jakub.doubal@upce.cz

Abstract

Comparison of laser cleaning with other cleaning methods of silicate sandstones

Monument cleaning is one of the basic restoration processes from both the aesthetic and technological points of view. At present various cleaning techniques based on the use of water, abrasive methods or application of chemically reactive substances are used. In the past few years new cleaning technology employing laser has become entrenched abroad. There is a wide range of papers dealing with the study of cleaning, focused mainly on polishable limestones – marbles used in Italy, France and in some other countries. A complex assessment of laser cleaning of the materials used in monuments in the Czech Republic has not been accomplished so far. The aim of this paper is to contribute to the assessment of laser cleaning of materials typical for the Czech region in the context of commonly used cleaning methods.

In the first part of the paper, laser cleaning was evaluated and the options of its regulation to obtain an optimum result were examined. At this stage, the impacts of regulation of energy density, frequency of the pulse length and energy were investigated. Other tests were carried out to compare application to pre-moistened material with dry application. Having found an optimum adjustment of laser application to particular materials, a comparison to other commonly used methods of cleaning (micro-sanding, chemical cleaning) was made. In the conclusion of the paper, these methods are compared, considering the aspect of sensitivity to the substrate, efficiency and degree of controllability.

Klíčová slova: technologie čištění, laser, silikátové pískovce

Keywords: cleaning technology, laser, silicate sandstones

Úvod: Čištění kamenných památek

Čištění památek je jeden ze základních a nejdůležitějších aspektů restaurování a památkové obnovy. Jedná se o proces, kdy jsou z povrchu kamene odstraňovány depozity, korozní produkty a další nečistoty, které mění vzhled, překrývají modelaci nebo způsobují poškození památky. Čištění je velmi zásadní krok jak z hlediska filozofie restaurování, tak i z pohledu technik a technologie restaurování. V průběhu let se názory na opodstatnění čištění a jeho míru proměňovaly, stejně jako se měnily nástroje pro dosažení vytyčených cílů.

K nejrozšířenějším technikám pro čištění kamene patří abrazivní metody (mikropískování, JOS, Torbo atd.), metody využívající vodu anebo chemické čištění (komerčně dodávané čistící pasty, zábaly hydrogenuhličitanu a uhličitanu amonného a osvědčené restaurátorské receptury jako pasta MORA, EDTA atd.). V posledních letech se při čištění památek postupně etabloje technologie čištění laserem. V praxi se často na jedné památce používá více způsobů čištění na různé typy nečistot nebo se přistupuje ke kombinaci dvou a více metod pro dosažení optimálního výsledku.

Jak vyplývá z prostudované literatury, laserem a jeho aplikací při čištění kamene se zabývalo mnoho autorů. Valná většina publikovaných prací je zaměřena na jeho užití pro čištění mramorů a leštitelných vápenců, kde se dá ideálně využít kontrastu mezi světlým podkladem a tmavou krustou. Několik publikovaných prací se zabývá i problematikou čištění pískovců. Vědecká literatura zprostředkovává výzkumy zaměřené na zkoumání užití jiných experimentálních vlnových délek v oblasti zeleného světla a UV ve srovnání s běžně používanými vlnovými délkami. Rozdílné vlnové délky mají výrazný vliv na efektivitu čištění, přičemž s klesajícími vlnovými délkami efektivita klesá. Zároveň však byly v některých případech pozorovány menší barevné změny. Rozsáhlá studie byla věnována zkoumání vlivu různých parametrů, jako je frekvence, velikost bodu, fluence (energetické hustoty) atd. Z tohoto výzkumu vyplývá mimo jiné to, že vliv předvlhčení je patrnější zejména u silných krust a že předvlhčení má v některých případech vliv na barevné změny. Při práci s maximální frekvencí dochází ke ztrátám energie, takže ideální pracovní frekvence je mezi 10–15 Hz.

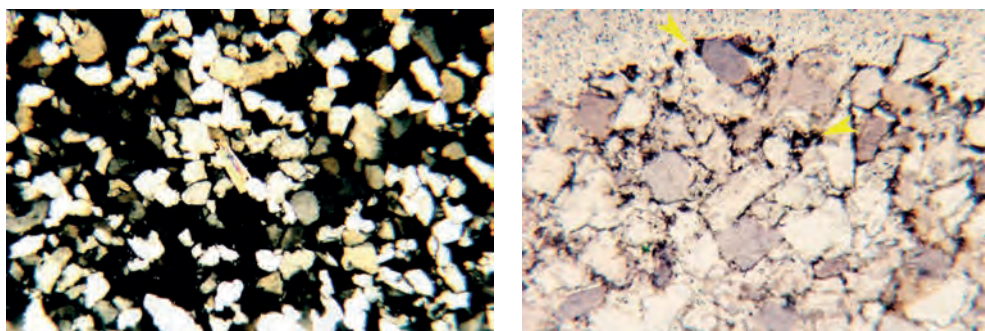
Technologie čištění laserem se díky slibným výsledkům v zahraničí a výraznému snížení pořizovacích nákladů laserového zařízení postupně dostává i do Čech. Hlavním materiálem používaným na památkové objekty v naší lokalitě jsou různé typy pískovců. Škála těchto materiálů je značně široká a předtím, než bude možné technologii čištění laserem zařadit mezi standardní technologie čištění, bude třeba provést komplexní vyhodnocení této metody a jejich limitů. Je sice možné vyjít z celé řady zahraničních poznatků a výjimečně i z prací českých autorů, ale ucelenější zkoumání možností využití laseru v našich podmínkách na přirozeně znečištěných kamenných površích zatím chybí. Tato práce si klade za cíl přispět k poznání možností a limitů technologie čištění laserem v kontextu u nás používaných hornin, v případě tohoto příspěvku konkrétně maletínského pískovce.

Metodika a postup

Byl vybrán vhodný objekt, nesoucí typické znečištění pro danou horninu a lokalitu. Z hlediska petrografického typu se jednalo o pískovec křemenný, jemnozrnný, silicifikovaný „maletínskému typu.“ Jeho povrchové i podpovrchové znečištění je způsobeno především nečistotami pronikajícími 0,5–0,7 mm do přívěškové zóny. Testované plochy byly předběžně očištěny od lehce ulpívajících prachových depozitů a omyty vodou, neboť cílem prováděných zkoušek bylo testování čištění pevně ulpívajících nečistot.

Nejprve byly provedeny orientační zkoušky uvažovaných technologií čištění, při kterých byly zvoleny základní parametry nastavení testovaných přístrojů a technologií čištění (jako je typ abraziva a účinný tlak u mikropískování, minimální účinná energetická hustota u laseru nebo typ a koncentrace chemické látky u chemického čištění). Tyto předběžné zkoušky měly za cíl redukovat konečný počet zkušebních ploch na rozumné množství.

Z testovacího pole byly odebrány vzorky na petrologickou analýzu, umožňující přesnou charakteristiku kamene a způsobu depozice nečistot na povrchu. Byly zhotoveny nábrusy a výbrusy vzorků odebraných ze znečištěného povrchu pro srovnání s očištěnými plochami.



Obr. 1. Petrologie, Pískovec křemenný, jemnozrnný, silicifikovaný – polarizační mikroskop, zvětšení 32x, nikoly X struktura převažujících srůstajících křemenných úlomků (silicifikace), slída–muskovit, (foto Z. Štaffen, 2012)

Obr. 2. Petrologie, Pískovec křemenný, jemnozrnný, silicifikovaný – polarizační mikroskop, zvětšení 63x, nikoly II znečištění povrchu a interklastického prostoru mechanickými nečistotami (sazě, prach), (foto Z. Štaffen, 2012)

Čištění laserem

Pro zkoušky čištění byly použity dva typy laserů. Zkoušky byly voleny tak, aby bylo možné sledovat vliv energetické hustoty, frekvence, délky aplikace a předvlhčení, resp. suchého čištění na výsledek čištění. Vyhodnocení těchto zkoušek bylo prováděno z hlediska úspěšnosti čištění, možnosti regulace míry čištění a vlivu na kamenný substrát.

Při hodnocení bylo využito vizuálního průzkumu a makrofotografie. Na rozhraní mezi očištěným a neočištěným povrchem byl jádrovým vrtákem odvrtnán vzorek, který byl poté pozorován pod stereo lupou. Toto zkoumání umožnilo přímé srovnání mezi očištěnou a neočištěnou plochou. Další využitou metodou byla optická mikroskopie nábrusů vzorků povrchu, odebraných z očištěných ploch stejným způsobem jako v prvním případě. Na základě vizuální prohlídky, studia makrofotografií, vyhodnocení nábrusů a studia povrchu pod mikroskopem

bylo vybráno několik vzorových ploch pro další zkoumání. Jednalo se o plochy, kde výsledek čištění nejvíce odpovídal požadavkům na čištění památky z hlediska efektivity a šetrnosti čištění. Z těchto ploch byly odebrány vzorky pro vyšetření elektronovým mikroskopem, kde byla dále zkoumána morfologie očištěného povrchu a změny na úrovni jednotlivých zrn.

Základní charakteristika používaných laserů

Laser EOS 1000 SFr	Laser Thunder Art
<p>SYSTÉMOVÉ PARAMETRY</p> <p>Vlnová délka: 1064 nm Délka impulzu: 60–30 μs Maximální energie na 1 impulz: 1 J Frekvence: až 20 Hz Velikost Bodu: 1,5–6 mm Přenos paprsku: optické vlákno Rukojeť: proměnná ohnisková vzdálenost, s vedením paprsku Rozměry: 23 x 65 x 68 cm</p>	<p>SYSTÉMOVÉ PARAMETRY</p> <p>Vlnová délka: 1064 nm Délka impulzu: asi 8 ns Energie při 1064 nm 900 mJ Frekvence: až 20 Hz Průměr paprsku: 10 mm Přenos paprsku: kloubové rameno Síťové napětí: 220 V (stříd.), 16 A Rozměry: laserová hlava 31 x 88 x 23 cm Napájecí zdroj: 39 x 90 x 73 cm</p>

Mikroabrazivní metoda

Další sada zkoušek čištění byla prováděna mikroabrazivní metodou. Na základě zkušeností operátora s podobnou problematikou byly vybrány dva druhy abraziva a s každým byly provedeny tři zkoušky různé intenzity (upravované změnou tlaku). Jednalo se o mikro-mletý korund (Al₂O₃) o velikosti zrn 0,045–0,10 mm a mletý dolomitický vápenec o velikosti zrn 0–0,3 mm. Pro mikropískování byl použit přístroj standardně používaný při čištění památek Miniblaster 1 s možností regulace tlaku (0–6 barů) a o průměru trysky 1,2 mm.

Očištěné povrchy byly podrobeny stejnému zkoumání jako v případě laseru. Stejně jako u něj byla vybrána nejvhodnější zkouška čištění a ta byla podrobena dalšímu výzkumu na elektronovém mikroskopu.

Chemické čištění

Vzhledem k tomu, že při čištění tmavých depositů na tomto typu kamene bývá často využíváno tzv. chemické čištění, byly pro srovnání provedeny zkoušky čištění i touto metodou. Byla vybrána metoda nejpoužívanější u nás pro tento typ materiálu, a sice čištění pastou na bázi fluoridu amonného (komerční produkt Fassadenreiniger paste - Remmers). Zkoušeny byly jak aplikace s převlhčením, tak bez převlhčení. Doba aplikace byla dle doporučení výrobce cca 3 minuty. Dočišťování bylo provedeno pomocí jemného kartáčku a proudy vody. Očištěné povrchy byly podrobeny stejnému zkoumání jako v případě laseru a abrazivní metody čištění.

Výsledky a diskuze

Čištění laserem

Vliv energetické hustoty

Energetická hustota (fluence) je nejdůležitější parametr ovlivňující účinek čištění. Dříve než se přistoupí k regulaci energetické hustoty, je vhodné vyzkoušet minimální nutnou hranici pro dosažení viditelného výsledku. Pokud energetickou hustotu od tohoto bodu zvyšujeme, čistící efekt se plynule zvyšuje (viz zkoušky L1–L3). U přístroje Thunder Art lze regulovat energetickou hustotu i změnou vzdálenosti, protože nemá přednastavenou ohniskovou vzdálenost. Při zvětšení vzdálenosti dochází ke zmenšení bodu při zachování energie, a tedy ke zvýšení energetické hustoty a zvýšení efektu čištění. V rámci zkoušek byl porovnáván i vliv změny této vzdálenosti (L1–L6). Z hlediska operátora je vhodnější regulovat energetickou hustotu zvýšením energie spíše než vzdálenosti, neboť zmenšením operačního bodu se snižuje rychlost čištění a také z větší vzdálenosti se snižuje přesnost umístění bodu. Jako optimální operační vzdálenost byla stanovena vzdálenost 20–25 cm.

V případě přístroje EOS 1000 je ohnisková vzdálenost přednastavená na přístroji a její změna vede k rozostření, snížení až ztrátě efektu čištění.

Vliv frekvence

Ačkoliv jsme při tomto výzkumu vycházeli ze studií zahraničních autorů, které udávají optimální frekvenci 10–15 Hz, byly provedeny i zkoušky zaměřené na vliv frekvence (L3 a L9). Nebyl pozorován žádný výraznější vliv frekvence na efekt čištění (můžeme pouze konstatovat, že při nižších frekvencích je práce o něco preciznější). Snížení frekvence výrazně prodlužuje čas strávený na definované ploše a to téměř přímou úměrou (např. 5x nižší frekvence = 5x delší čas na čištění). Jako optimální pracovní frekvence se jeví nastavení na 10 Hz, při kterých je proces čištění relativně rychlý a dobře kontrolovatelný. Přístroj EOS 1000 má výrazně delší trvání pulzu. V případě delšího působení na jedno místo může při vyšší frekvenci dojít ke kumulativnímu zahřívání povrchu, které může být při překročení určité hranice pro substrát rizikové. Z tohoto důvodu je vhodné kontrolovat teplotu povrchu, případně snížit frekvenci.

Různé typy laserů

Pro zkoušky čištění byly testovány dva přístroje různé výkonnosti a parametrů. Přístroj Thunder Art a EOS 1000 SFr. V obou případech se jedná o Nd:JAG lasery pracující s vlnovou délkou 1064 nm. Hlavní a nejdůležitější rozdíl mezi Thunder Art a EOS 1000 (SFR) je doba trvání pulzu. Thunder Art je tzv. Q-switch laser s dobou trvání pulzu okolo 10 ns. EOS 1000 (SFR) laser má na druhou stranu mnohem delší trvání pulzu, jež se pohybuje v rozmezí 30–120 μ s. To znamená, že puls SFR je zhruba 1 000x delší než puls Q-switch. Doba trvání pulzu je velmi důležitý parametr a zásadně ovlivňuje parametry interakce laseru se substrátem: při kratších pulzech a vyšší energii působí spíše mechanická reakce, při které laserem vyvolaná tvorba plasm, následovaná dynamickým rozpínáním, vytváří mechanické nárazové vlny a zvukové vlny, které se šíří materiálem, rozsbíjejí ho a způsobují rozptýlení částic různých velikostí. Delší pulzy využívají efektu tepelné reakce, při které úzce lokalizovaný a krátkodobý nárůst teploty na povrchu materiálu vede k tavení, odpařování a vzniku plasmy. Q-switch lasery jsou mnohem efektivnější ve smyslu rychlosti ablace, ale zároveň mohou být teoreticky hůře 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 způsob mnohem účinnější, případně jediný reálně využitelný.

Z praktického pohledu vede laser Thunder Art paprsek kloubovým ramenem, protože špičková energie je natolik vysoká, že by poškodila optické vlákno. SFR laser naopak umožňuje užití optického vlákna pro vedení paprsku, což je při práci na členitějším objektu nebo při práci na lešení velká výhoda. Z provedených zkoušek na daném substrátu jednoznačně vyplynula větší citlivost přístroje Thunder Art daná možností vytvářet homogenní přechody mezi jednotlivými body. V případě přístroje EOS 1000 (SFR) byla na provedených zkouškách (zejména bez předvlhčení) pozorována jistá nehomogenost očištění povrchu. Velkou výhodou přístroje Thunder Art je velikost operačního bodu, díky němuž je rychlost čištění nesrovnatelně vyšší, než je tomu u přístroje EOS 1000 (SFR).

Vliv předvlhčení

Pro srovnání byly některé plochy před čištěním předvlhčeny destilovanou vodou pomocí rozprašovače. Na vzorcích L1,L2 a L7, L8 je vidět srovnání aplikace stejného nastavení přístroje na nepředvlhčený povrch. V případě přístroje Thunder Art nebyl pozorován nárůst efektivity čištění, což je ve shodě s předchozími výzkumy, podle kterých předvlhčení hraje roli u mohutnějších vrstev nečistot a krust. V tomto případě byla vrstvička nečistot velmi tenká a předvlhčení tudíž nemělo výraznější efekt na výsledek čištění. U předvlhčených povrchů bylo sledováno nepatrné prohloubení barevnosti, resp. zežloutnutí povrchu, oproti nepředvlhčeným plochám.

U přístroje EOS 1000 (SFR) byl vliv předvlhčení patrný. Díky předvlhčení bylo možné dosáhnout homogennějšího očištění a rychlost práce se výrazně zvýšila. Změna barevnosti v souvislosti s předvlhčením nebyla u tohoto přístroje pozorována. Předvlhčení a následný rychlý odpar vody v důsledku zahřátí je v některých případech spojeno s ablací povrchové vrstvy a zvýšením efektivity čištění.

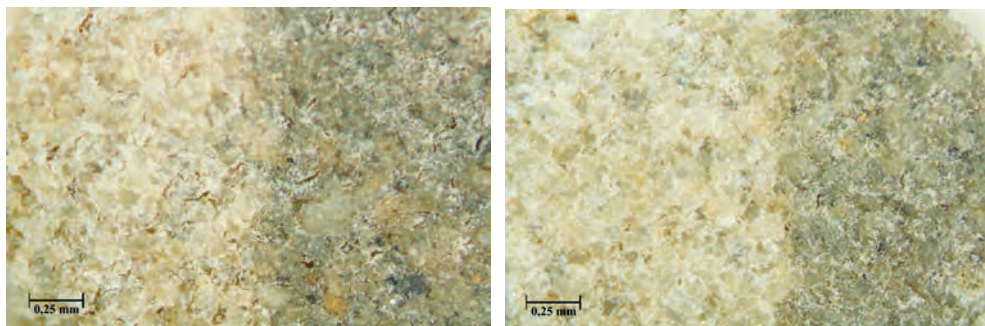
Zkouška samokontrolovatelnosti procesu čištění

V případě přístroje Thunder Art byla zkoušena aplikace po dobu 3 minut na stejné místo (což bylo mnohonásobně déle, než bylo nutné pro očištění povrchu) a tyto zkoušky byly porovnávány se standardními zkouškami čištění při stejném nastavení (L4,L5,L6 a L10,L11,L12). Výsledky těchto testů byly velmi uspokojivé, neboť kromě nepatrně vyšší míry dočištění, dané opakovanou aplikací na stejné místo, je výsledek prakticky srovnatelný s plochami čištěnými pod kontrolou operátora. Tento jev je velmi důležitý, neboť to znamená, že při správném nastavení přístroje se proces čištění zastaví přesně na té míře, která byla požadována a zvolena na základě předchozích zkoušek, a při čištění za správného nastavení by tedy v žádném případě nemělo dojít k poškození objektu.

Shrnutí výsledků zkoušek laserového čištění

Na základě vyhodnocení zkoušek čištění lze konstatovat, že čištění laserem je pro tento typ substrátu úspěšná a vhodná metoda. Z hlediska efektivity je jednoznačně vhodnější přístroj Thunder Art pracující s výrazně vyšší energií a kratšími pulzy. Velkou výhodou laseru je regulova-

telnost procesu čištění, kdy lze zvolit určitou míru čištění v rozmezí od minimálního až po úplné odstranění nečistot. Tento proces je navíc do jisté míry samo kontrolovatelný, což znamená, že při aplikaci stejného nastavení po několik minut na jedno místo nedochází po dosažení určité míry čištění k další interakci s materiálem, a tedy ani k poškození substrátu. , což znamená, že pokud zvolíme nějakou míru očištění, nastavení přístroje nám nedovolí bez změny tohoto nastavení tuto míru výrazně překročit. Přes jistou samo kontrolu přístroje procesu je nezbytné, aby čištění prováděl zkušený operátor, neboť i v případě laseru lze při nesprávném nastavení dosáhnout poškození substrátu např. nastavením příliš vysoké energetické hustoty.



Obr. 4. a 5 Povrch – stereolupa, 40x, Srovnání vzorku L3 a L11 – Srovnání vzorku L5 (čištění pod kontrolou operátora – cca 20 s.) a L11 (aplikace 3 min. na stejné místo). (Foto J. Ďoubal, 2012)

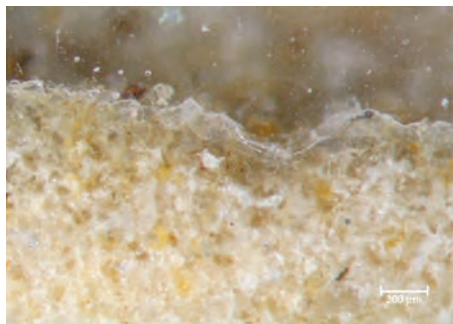
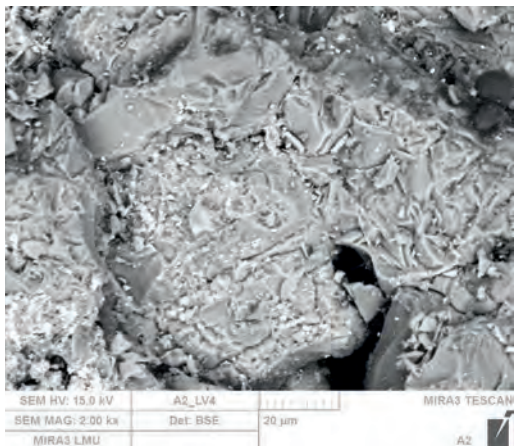
Abrazivní čištění

Byla testována dvě různá abraziva při různém tlaku. První abrazivum, jemně mletý dolomitický vápenec, je velmi měkké, pro povrch je velmi citlivé, ale efekt čištění je poměrně malý (A4–A6). S korundem lze dosáhnout různé intenzity (A1–A3) od minimální až po velmi razantní. Udržet zvolenou míru čištění vyžaduje velkou zkušenost operátora a nepatrná nepozornost může způsobit výrazný úbytek substrátu. Také v případě nehomogenity v pevnosti substrátu může dojít k výraznému úbytku na rozhraní tvrdších a měkčích ploch. Z mikroskopického zkoumání vyplývá, že i při velmi citlivém přístupu může při abrazivním čištění dojít k vydrolení



Obr. 6 Čištění mikropískováním, vzorek A1–A6. (Foto J. Ďoubal, 2012)

méně pojených zrn. Se stoupajícím tlakem také dochází k narušení povrchu jednotlivých zrn až k jejich rozdrčení (viz srovnání jednotlivých způsobů čištění), což může v budoucnu vést k dalším korozním procesům v této superpovrchové vrstvě a větší receptivitě znečištění.

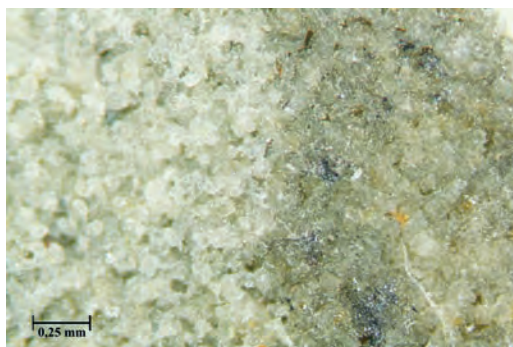
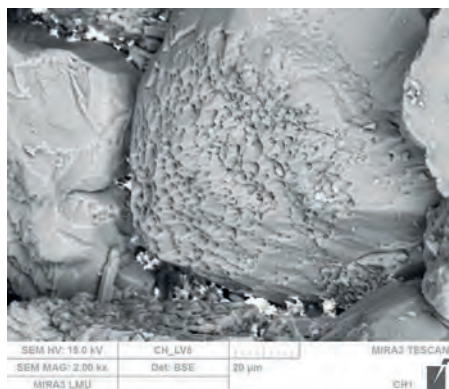


Obr. 7 Vzorok č. A2 – el. mikroskop, narušení zrn dopadem abraziva. (Foto J. Ďoubal, 2012)

Obr. 8 Vzorok č. A3 – nábrus, stereolupa 50x, narušení povrchu dopadem abraziva. (Foto J. Ďoubal, 2012)

Chemické čištění

S použitím fluoridu amonného v pastě lze dosáhnout očištění povrchu. Regulovatelnost tohoto procesu je značně omezena. Mikroskopické zkoumání nábrusů povrchu prokázalo, že v čištěné povrchové vrstvě dochází k vymytí tmelu okolo zrn a k výraznému otevření struktury. Tento proces může v budoucnu vést k urychlení koroze povrchové vrstvy, neboť odhalená zrna jsou náchylnější k vydrolování. Zkoumání na elektronovém mikroskopu navíc odhalilo naleptání jednotlivých křemenných zrn. Zároveň u méně odolných materiálů, jako jsou například živce, dochází ještě k závažnějšímu narušení struktury zrn. Tato změna struktury povrchu jednotlivých zrn může v budoucnu vést k větší náchylnosti k povrchové korozi a vzhledem k většímu měrnému povrchu zřejmě i k větší receptivitě znečištění.

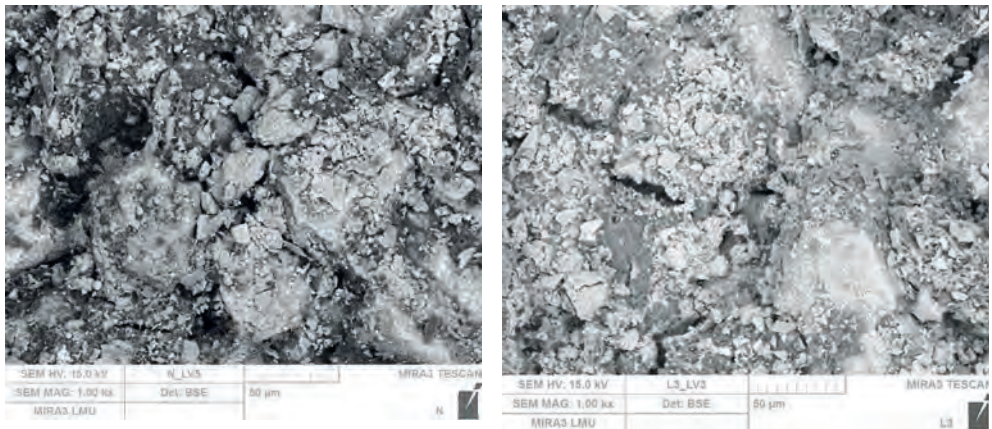


Srovnání jednotlivých metod

V případě maletínského pískovce nabízí laserové čištění jednoznačně nejbezpečnější a nejcitlivější možnost čištění ze všech tří zkoumaných metod. Nejlépe viditelné je to na fotografiích z elektronového mikroskopu, kde je zřejmý rozdíl ve výsledné morfologii povrchu. V případě laseru nedochází přes zřejmý efekt očištění k větší změně vzhledu ani povrchové morfologie, což jednak dokumentuje šetrnost čištění, a jednak dává jistý předpoklad, že v budoucnu nedojde k zásadní proměně chování tohoto povrchu při opětovném vystavení korozním vlivům a znečištění.

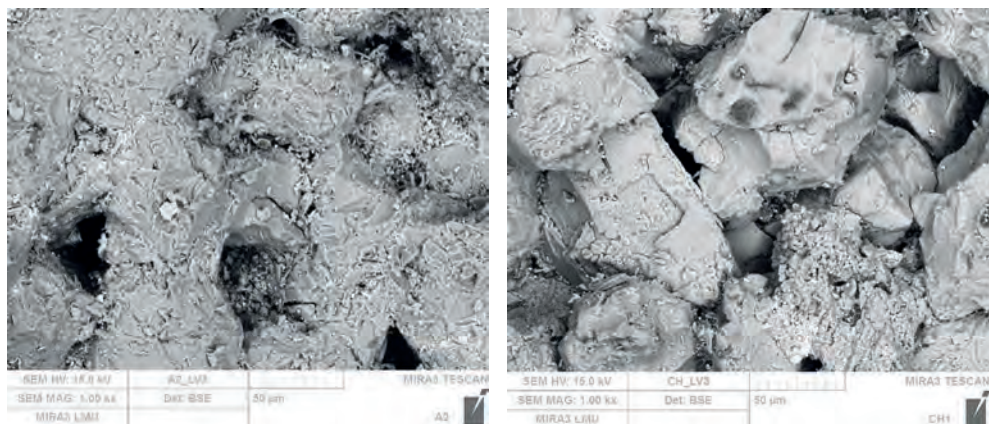
Jak mikroabrazivní metoda, tak laserové čištění umožňují relativně plynulou možnost regulace procesu čištění, ale jednoznačnou výhodou u laserového čištění je nesrovnatelně větší bezpečnost procesu z hlediska potenciálního rizika poškození povrchu. Tam, kde abrazivní metoda při aplikaci delší o zlomek vteřiny může způsobit vážné poškození substrátu, tam správně nastavené laserové zařízení nezpůsobí žádný problém ani při několikaminutové aplikaci na stejné místo. Velkou výhodou laserového čištění oproti dalším metodám je bezdotykovost systému, která umožňuje aplikaci i na nerovnoměrně pevný substrát bez vzniku rozdílného efektu a může tak být aplikována bez předchozí konsolidace narušených míst, což jednoznačně ulehčí proces restaurování.

Při srovnání vybraných vzorků abrazivního čištění a laserového čištění mají vzorky očištěné laserem mírně nažloutlý, resp. nahnědlý odstín, což může být způsobeno faktem, že při laserovém čištění zůstává částečná patina povrchu, a naopak, v případě abrazivní metody dochází k rozpraskání zrn povrchových vrstev, a tím k částečné změně optických vlastností materiálu. Chemické čištění vychází z testovaných metod jako jednoznačně nejméně vhodné kvůli velmi omezené míře kontrolovatelnosti a vysokému riziku narušení substrátu a velmi pravděpodobnému urychlení korozních procesů v povrchové vrstvě. Také nutnost důkladného vymytí ošetřené plochy a riziko plynoucí z reziduálních chemických látek je do značné míry limitující. Přes tyto negativní vlastnosti zůstává do dnešních dnů chemické čištění mezi některými restaurátory z důvodu snadné dostupnosti a značné efektivitě velmi oblíbenou metodou čištění.



Obr. 11 (vlevo) Vzorek č. N – el. mikroskop, Neočištěný povrch. (Foto J. Ďoubal, 2012). Obr. 12 (vpravo) Vzorek č. L3 – el. mikroskop, Laserové čištění. (Foto J. Ďoubal, 2012)

Na protější straně: Obr. 9 (vlevo) Vzorek č. CH 1 – el. mikroskop, naleptání zrna fluoridem amonným. (Foto J. Ďoubal, 2012). Obr. 10 (vpravo) Povrch, poloviční čištění – stereolupa, 40 \times – vymytí tmelu mezi zrna a jejich odhalení. (Foto J. Ďoubal, 2012)



Obr. 9 (vlevo) Vzorek č. CH 1 – el. mikroskop, naleptání zrna fluoridem amonným. (Foto J. Ďoubal, 2012)
 Obr. 10 (vpravo) Povrch, poloviční čištění – stereolupa, 40 \times – vymytí tmelu mezi zrna a jejich odhalení. (Foto J. Ďoubal, 2012)

Závěr

Do této chvíle byly provedeny zkoušky na jednom typu substrátu – maletínském pískovci. Byly testovány dva typy laserů pro čištění památek a následně byly porovnávány s dalšími standardně používanými metodami čištění. Z provedených zkoušek vyplynulo, že při správném nastavení je možné laserem dosáhnout velmi citlivého a kontrolovatelného očištění. Pozorovány byly i zásadní rozdíly ve výsledku v závislosti na typu použitého laseru. Nespornou výhodou laserové technologie je jistá samokontrolovatelnost procesu čištění, kdy při správném nastavení nastavení parametrů laseru vzhledem k čištěnému substrátu proces čištění nepokračuje dál přes hranici, kterou jsme si nastavili. Přesto může i tato metoda při nesprávném nastavení způsobit poškození povrchu a zkušenost operátora je podobně jako u ostatních technik čištění zásadním předpokladem úspěšného zákroku.

Ve srovnání s ostatními testovanými metodami vychází laserové čištění u zkoumaného znečištěného pískovce maletínského typu jako jednoznačně nejcitlivější metoda. U abrazivní metody je značné riziko narušení struktury zrn. V případě chemického čištění dochází kromě naleptání křemenných zrn i k výraznému otevření struktury. Popsané změny v morfologii povrchu při čištění mikroabrazí a chemickém čištění mohou kromě primárního poškození substrátu, představovat problém i v budoucnu, kdy větší měrný povrch může vykazovat větší receptivitu pro nečistoty a narušená zrna mohou být náchylnější ke korozním procesům.

Práce bude dále pokračovat vyhodnocením zkoušek čištění na dalších horninách používaných na památkové objekty v Čechách. Při vyhodnocování bude použito stejné metodiky jako v případě prvního substrátu. Po dokončení všech těchto zkoušek bude možné provést vyhodnocení metody čištění laserem v širším kontextu.