

CZYSZCZENIE LASEREM WYBRANYCH POWIERZCHNI KAMIENNYCH GROBU NIEZNAWEGO ŻOŁNIERZA W WARSZAWIE*

Wstęp

Zanieczyszczenie atmosfery dwutlenkiem siarki (SO_2), dwutlenkiem węgla (CO_2) i dwutlenkiem azotu (NO_2), spowodowane jest spalaniem coraz większej ilości surowców energetycznych, zwłaszcza węgla i paliw płynnych zawierających siarkę. Związki te są podstawowymi zanieczyszczeniami wszystkich gazów spalinowych. Ilość tych zanieczyszczeń wydalana do atmosfery przez siłownie, kotłownie i samochody, stanowi źródłową uciążliwość dla człowieka i jego środowiska naturalnego. Związki siarki w atmosferze tworzą w połączeniu z parą wodną kwas siarkowy. W rezultacie spadają agresywne, kwaśne deszcze zanieczyszczające środowisko, niszczące dobra materialne i kulturowe. Dwutlenek siarki, po utlenieniu się w atmosferze do trójtlenku siarki (SO_3), wchodzi następnie w reakcję z materiałami budowlanymi. Następuje wówczas wyparcie węgla przez siarkę i w miejsce węglanu wapnia powstaje siarczan wapnia.

Stanowi to narastające zagrożenie (nie tylko dla człowieka), a walka z zanieczyszczeniami jest również walką o przetrwanie wielowiekowych zabytków kulturowych i ich wyraz estetyczny.

Gwałtowna destrukcja środowiska naturalnego człowieka, jego dóbr materialnych i kulturowych odbywa się dopiero od dwóch stuleci. Ostatnie jednak siedemdziesiąt pięć lat, najczęściej nie kontrolowanego rozwoju przemysłu i nieświadomości jego wpływu na środowisko, spowodowało większe zniszczenie środowiska niż ostatnie pięćset lat.

Jednakże zgodnie z prawami natury, nawet gdyby wyeliminować działalność człowieka: przemysł, motoryzację, siłownie, kotłownie, to i tak z upływem czasu wszystkie powierzchnie stają się zakurzone i brudne. Nawet w warunkach wysokiej próżni kiedy osiadzie na nich kurz, zawierający różne niepożądane atomy, molekuly, aerozole czy związki chemiczne, tworzy się nawarstwienie wpływające destrukcyjnie na ich stan zachowania i wygląd powierzchni.

W naszym życiu codziennym myjemy naczynia, czyścimy okulary, a w technice laserowej też zwracamy szczególną uwagę na czystość elementów optycznych.

Szczególnie trudny do rozwiązania jest problem usuwania nawarstwień scalonych z podłożem budulca obiektów zabytkowych. Pomniki, budowle (kamienne i drewniane), malowidła, tkaniny i inne dzieła sztuki w zastraszającym tempie ulegają degradacji, tracą swoje walory artystyczne z powodu kurzu, pyłu, wilgoci czy sadzy. Zanieczyszczenia pochodzące od paliw kopalnianych i ich produktów łącznie z cząstkami powietrza, pogłębiają ich destrukcję tworząc czarne nawarstwienia, które są postrzegane zazwyczaj jako powierzchnie bardzo stare.

Od kilku lat bierze się pod uwagę i bada szereg alternatywnych, nowych technik czyszczenia wszelkich powierzchni. Nowoczesne w chwili obecnej metody i technologie wykorzystujące w procesie czyszczenia wiązki elektronów i promieniowanie laserowe (ultrafioletowe, widzialne i podczerwone)¹, umożliwiają czyszczenie nawet najdelikatniejszych powierzchni różnego rodzaju z ogromną precyzją, przywracając je do stanu pierwotnego bez uszkodzeń i z zachowaniem pierwotnego koloru powierzchni. Czyszczenie z wykorzystaniem promieniowania laserowego staje się w niektórych przypadkach niezastąpione.

W artykule prezentuje się i omawia czyszczenie powierzchni wybranych elementów kamiennych Grobu Nieznanego Żołnierza w Warszawie za pomocą promieniowania laserowego — wiązką laserową. Odsłania się i unaocznia ogromne zalety i możliwości tej technologii w porównaniu z innymi technologiami, również wykorzystywanymi podczas prac renowacyjnych Grobu.

Zasada laserowego czyszczenia powierzchni

Co jest powodem, że na powierzchniach nawet o najwyższej gładkości, osadzają się niepożądane cząstki powodujące ich degradację? Za przyleganie, przy-

* Przy czyszczeniu kamiennych elementów Grobu Nieznanego Żołnierza w Warszawie techniką laserową uczestniczyli: Andrzej Koss z Akademii Sztuk Pięknych w Warszawie, Jan Marczak z Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie, a także zespół realizujący prace konserwatorskie: Zenon Sadecki, Agnieszka Zambrzycka i Piotr Zambrzycki. Autorzy tą drogą pragną wyrazić podziękowanie Przedsiębiorstwu Techniczno-Handlowemu „KOLT” SA w Warszawie za udostępnienie urządzenia ReNOVALaser 2 do czyszczenia powierzchni wybranych elementów kamiennych Grobu Nieznanego Żołnierza w Warszawie.

1. P. Boquillon, R. Oltra, *Principle of Surface Cleaning by Laser Impact, presented at CLEO/EUROPE*, Amsterdam 1994; R. Czechowicz, J. Marczak, *Odnawianie — restauracja dzieł sztuki za pomocą promieniowania laserowego*, opracowanie wewnętrzne Instytutu Optoelektroniki Wojskowej Akademii Technicznej, Warszawa 1995; J. Marczak, *ReNOVALaser — Urządzenie do renowacji zabytków*, Międzynarodowe Targi Pomorza i Kujaw, III Targi Konserwacji Zabytków i Renowacji Miast i II Giełda Zabytków, CONSERVATIO'97, Toruń 27–28 luty 1997; J. Marczak, *Odnawianie dzieł sztuki za pomocą promieniowania laserowego*, „Przegląd Mechaniczny” 1997, nr 15–16, s. 37–40.

lepianie się cząsteczek, atomów, kurzu itp. zanieczyszczeń do powierzchni, odpowiedzialne jest zjawisko adhezji. Adhezja², polega na przyleganiu, powstawaniu połączenia między warstwami powierzchniowymi dwóch (stałych lub ciekłych) ciał (faz) doprowadzonych do kontaktu. Zjawisko adhezji jest wynikiem różnego rodzaju oddziaływań sił międzycząsteczkowych (sił van der Waalsa, siły kapilarnej, siły elektrostatycznej, wiązań jonowych i metalicznych). Granicznym przypadkiem adhezji jest reakcja chemiczna na powierzchni rozdziału (wiązanie chemisorpcyjne) z powstawaniem powierzchniowej warstwy związku chemicznego. Miarą adhezji jest siła (lub praca) oderwania ciał, przypadająca na jednostkę powierzchni kontaktu.

W procesie czyszczenia powierzchni za pomocą promieniowania laserowego, odrywania cząstek za pomocą strumienia fotonów, wykorzystuje się zjawisko ablacji³. Ablacja — odjęcie, oznacza np. w geologii stopniowe niszczenie, kruszenie się powierzchni łądu, także lodowca, na skutek działania wody, wiatru, temperatury: w technice lotniczej jest sposobem chłodzenia powierzchni bardzo szybkich statków powietrznych podczas lotu w gęstych warstwach atmosfery przez odparowanie, sublimację niektórych metali lub tworzyw sztucznych stanowiących zewnętrzną warstwę pokrywy tych statków. W procesie czyszczenia powierzchni strumieniem fotonów oznacza gwałtowne odparowanie zanieczyszczających cząsteczek w bardzo krótkim czasie.

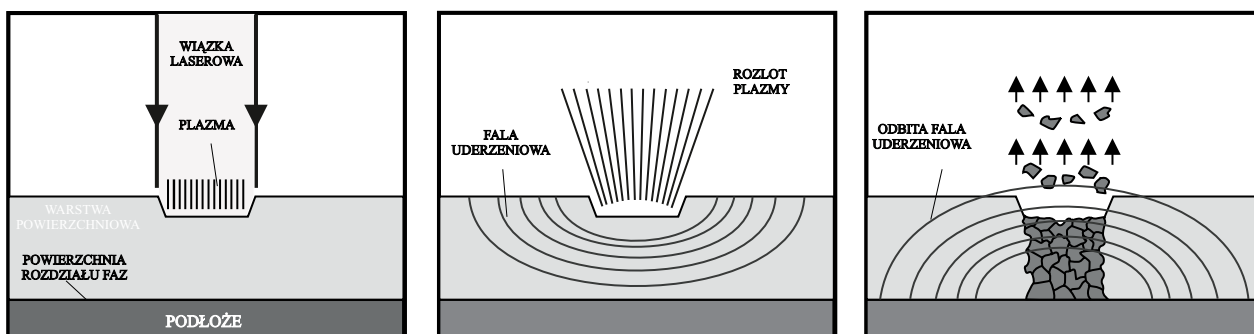
Aby więc pokonać ogromne siły przylegania cząsteczek do powierzchni bez uszkodzenia podłoża, stosuje się czyszczenie wiązką laserową, wykorzystując zjawisko ablacji laserowej. W wyniku intensywnej absorpcji promieniowania laserowego w warstwie przypowierzchniowej (patyna, tłuszcze, oleje, tlenki, farby, lakiery, grzyby, okopcenia spowodowane pożarem i inne organiczne i nieorganiczne składniki), pojawia się jako jej skutek, silny i gwałtowny wzrost temperatury — powstaje plazma. Transport energii z plazmy w wyniku konwekcji i elektronowego przewodnictwa ciepłego, odbywa się do wnętrza materiału, gdzie promieniowa-

nie laserowe już nie dociera oraz w kierunku przeciwnym. Powstaje granica zwana frontem ablacji, na której występują silne gradienty gęstości i temperatury plazmy. Front ablacji oddziela więc dwa obszary, w których kierunki ruchu materii są przeciwne. Z obszaru bliższego zewnętrznej powierzchni następuje odparowanie — ucieczka nagrzanego materiału w kierunku lasera i prostopadłym do oświetlanej powierzchni. W obszarze drugim ruch materii jest skierowany w głąb podłoża. Występuje tu wąski obszar słabo podgrzanej materii, ściśniętej przez falę uderzeniową, która jest reakcją układu na bardzo szybkie odparowanie materii z powierzchni. Jeśli nawarstwienia są bardzo cienkie, fala uderzeniowa po odbiciu się od powierzchni podłoża (granicy międzyfazowej) zmienia kierunek propagacji, zwielfokrotniając efekt wyrzucania zanieczyszczających cząsteczek. W przypadku gdy usuwana warstwa jest gruba, wystąpi przejście fali uderzeniowej w falę dźwiękową powodującą drgania litego podłoża w miejscu oświetlanym i również zwielfokrotnienie efektu czyszczenia — usuwania zanieczyszczenia.

Po usunięciu nawarstwień oryginalna powierzchnia jest już chroniona przed wszelkim dalszym uszkodzeniem, ponieważ nie istnieje już granica ośrodków — faz. Kolejny impuls już nie wytworzy fali uderzeniowej, niewielka część energii promienistej pochłonięta przez podłoże nie spowoduje jego uszkodzenia. Towarzyszy temu również bardzo słaby efekt akustyczny, świadczący iż większość energii została odbita.

Głębokość frontu ablacji zależy przede wszystkim od długości fali promieniowania laserowego i waha się od 0,3 do 1 mikrometra. Oznacza to, że możliwe jest zdejmowanie w sposób kontrolowany jednej warstwy po drugiej, co przedstawia il. 1.

Oczywiście, proces ten zachodzi pod warunkiem odpowiedniego doboru parametrów oświetlenia. Parametry wiązki laserowej jesteśmy w stanie zmieniać, tzn. czas trwania impulsu, szczytową gęstością mocy i częstotliwość repetycji impulsów. Dostarczona moc jest na tyle wysoka, aby w sposób natychmiastowy, gwałtowny, wytworzyć szybki transfer ciepła do cząstki



1. Schematyczne zobrazowanie czyszczenia zabrudzonych powierzchni za pomocą impulsu laserowego o dużej gęstości mocy

1. Scheme of cleaning polluted surfaces with the aid of a high power density laser impulse

2. Encyklopedia fizyki, Warszawa 1972.

3. Tamże.

lub materiału zanieczyszczającego, wymagany do eksplozyjnego odparowania cząstek lub cienkich warstw, oraz na tyle niska, aby nie przekroczyć progu uszkodzenia powierzchni samego podłoża.

Wiązka laserowa odrywa cząsteczki z ogromnym przyspieszeniem. Przy założeniu, że w czasie działania impulsu lasera o czasie trwania około 20×10^{-9} s, chwilowe ciśnienie wynosi ok. 200 barów, można obliczyć, że cząstka doznaje przyspieszenia 10^{12} cm/s², a prędkość parowania cząstki wynosi 10^4 cm/s. Wielkości te obrazują gwałtowność, z jaką przebiega zjawisko odrywania cząstek. Na pierwszy rzut oka dziwne jest więc, że nie uszkadza się podłoże, a jego struktura zostaje zachowana nawet z towarzyszącym mu pierwotnym zabarwieniem. Jest tak dlatego, że w wyniku gwałtownego odparowania, chwilowa wartość temperatury nie przekracza 300°C i również w sposób gwałtowny jej wielkość osiąga wartość temperatury otoczenia. Mała wartość średniej mocy termicznej, ok. ≤ 20 W, pozwala uniknąć wszelkich niebezpiecznych efektów termicznych oraz pracować bez obaw na obiektach zarówno o podłożach metalowych, jak i delikatniejszych, kruchych, takich jak: kamień, drewno, szkło — witraż, porcelana, kość słoniowa, tektura, tkanina, ptasie pióra, futra itp.

Zwykle efekt działania impulsu laserowego z powierzchniami kontrolowany (obserwowany) jest na bieżąco za pomocą mikroskopów optycznych lub elektronowych, a obszar oddziaływania pokazywany jest na monitorze telewizyjnym. Wizualizacja ta ma na celu zapobieżenie ewentualnemu uszkodzeniu materiału podłoża. Oczywiście, profesjonalne czyszczenie specyficznych powierzchni wymaga użycia dalszych specjalistycznych przyrządów diagnostycznych.

Laserowe czyszczenie powierzchni charakteryzuje się ogromną prostotą w porównaniu z stosowanymi dotychczas metodami. Nie wymaga ono stosowania dużych ilości wody, często z dodatkiem piasku, kryształków lodu, ścierniw i detergentów — preparatów chemicznych używanych w technice konwencjonalnej. Dalsze spłukiwanie wodą powierzchni czyszczonych roztworami kwasów zanieczyszcza środowisko — spływają one do gruntu. Oderwane cząstki z powierzchni w wyniku procesu ablacji laserowej mogą być zasysane odpowiednim systemem do pojemników, a tym samym nie pozostają żadne inne produkty wtórne, które należy dodatkowo usunąć lub zneutralizować.

Używając zwartego, prostej konstrukcji lasera, pantografu lub światłowodu energetycznego, możliwe jest wniknięcie wiązki laserowej do dowolnego zanieczyszczonego miejsca na powierzchni.

Opis procesu czyszczenia powierzchni kamiennych grobu

Do czyszczenia powierzchni wybranych kamiennych elementów Grobu Nieznanego Żołnierza w War-

szawie zastosowano technikę laserową. Do prac wstępnych wybrano kamienną podstawę kolumny o powierzchni, na której zalegały twarde, bardzo szczelne czarne nawarstwienia. Wstępne prace czyszczenia tej powierzchni przeprowadzono za pomocą urządzenia laserowego ReNOVALaser 1, charakteryzującego się następującymi parametrami:

- długość fali promieniowania — 1,06 μ m;
- maksymalna energia wyjściowa — 120 mJ;
- czas trwania impulsu — 8 ns;
- częstotliwość generacji impulsów — (1±20) Hz;
- średnica plamki laserowej — 6 mm.

Urządzenie ReNOVALaser 1 wraz z kolimatorem optycznym umożliwiało uzyskiwanie gęstości energii wyjściowej w przedziale od 0,05 J/cm² do 2 J/cm², co odpowiadało szczytowej gęstości mocy wyjściowej w przedziale od 5 do 200 MW/cm². Przedział gęstości energii (mocy) był w zupełności wystarczający do przeprowadzenia wstępnych badań efektywności i jakości czyszczenia kamiennej podstawy kolumny.

Zdjęcie na il. 2 przedstawia fragment oczyszczonej powierzchni kamiennej podstawy kolumny. Na oczyszczonym fragmencie powierzchni, o wymiarach ok. 9×25 cm², można zauważyć różne jej zabarwienia: od koloru jasnego, poprzez brązy do koloru czarnego. Oznacza to, że na kamiennej powierzchni podstawy kolumny nie pozostaje żadna brudna warstwa (kolor jasny — całkowicie oczyszczony, oryginalny kolor kamienia); pozostaje kamienna patyna o różnej grubości (odcienie brązu) oraz czarne nawarstwienia nie naruszone promieniowaniem laserowym. Odcienie brązu świadczą o różnej grubości zdejmowanych czarnych nawarstwień. Grubość zdejmowanej warstwy zależy od gęstości energii (mocy) padającego promieniowania oraz od współczynnika absorpcji warstwy dla danej



2. Fragment oczyszczonej powierzchni kamiennej podstawy pod kolumnę Grobu Nieznanego Żołnierza w Warszawie. Wszystkie fot. P. Zambrzycki

2. Fragment of a cleaned stone surface of the base for the column of the Tomb of the Unknown Soldier in Warsaw. All photos: P. Zambrzycki



3. Fragmety czyszczonych powierzchni kamiennych podstaw pod kolumny Grobu Nieznanego Żołnierza w Warszawie

3. Fragments of cleaned stone surfaces of bases for the column of the Tomb of the Unknown Soldier in Warsaw

długości fali promieniowania laserowego. Użyta długość fali lasera ($\lambda=1,06 \mu\text{m}$) jest długością silnie pochłanianą przez warstwy o kolorach ciemnych i czarnych. Grubość zdejmowanej warstwy wahała się w przedziale od kilku do kilkudziesięciu mikrometrów. Aby usunąć warstwę o znacznej grubości (dochodzącej niekiedy do kilku milimetrów), należało dokonywać wielokrotnej ekspozycji tego samego miejsca.

Z przeprowadzonych badań wstępnych czyszczenia powierzchni kamiennej podstawy kolumny wynika, że proces nie występuje dla pewnego, ale ściśle określonego progu gęstości energii (mocy) promieniowania laserowego. Powierzchnia czarnego, twardego nawarstwienia pozostaje nienaruszona. Nie występuje więc żadne oddziaływanie krótkiego impulsu laserowego o czasie trwania od 5 do 30 ns i gęstości mocy promieniowania poniżej pewnego, ale ściśle określonego progu. Gdy wielkość gęstości energii (mocy) promieniowania laserowego przekracza pewien górny próg, również ściśle określony dla danej usuwanej warstwy, promieniowanie laserowe może uszkodzić lite podłoże. Powstająca fala uderzeniowa może powodować mikropęknięcia i zwiększyć wpływ na zeszklenie się kamienia.

W tzw. oknie — przedziale pomiędzy dolnym i górnym poziomem wartości gęstości energii (mocy) promieniowania laserowego, występuje „samokontrola” (samoregulacja) oddziaływania promieniowania laserowego na usuwaną warstwę. W tym przedziale oddziaływania można precyzyjnie kontrolować grubość usuwanej warstwy. Wraz ze zwiększaniem się grubości usuwanej warstwy następuje stopniowe rozjaśnianie się powierzchni podłoża. Pozostająca kamienna patyna o różnym kolorze (różnej grubości) jest wynikiem zmienianej gęstości energii (mocy) padającego promieniowania. Samokontrola przebiegu zjawiska, a tym samym kontrola wielkości grubości zdejmowanej warstwy następuje w wyniku powstania tzw. warstwy krytycznej w generowanej plazmie, oddzielającej dwa obszary materii, o czym była mowa wcześniej.

Ilustracje 3a i 3b przedstawiają widok stanu powierzchni dwóch kamiennych podstaw kolumn oczyszczonych częściowo za pomocą promieniowania laserowego emitowanego z urządzenia ReNOVALaser 2 o poniższych parametrach:

- długość fali promieniowania — $1,06 \mu\text{m}$;
- maksymalna energia wyjściowa — 550 mJ ;
- czas trwania impulsu — 6 ns ;
- częstotliwość generacji impulsów — $(1+15) \text{ Hz}$;
- średnica plamki laserowej — 8 mm .

Wielkość gęstości energii (mocy) dobrano tak, aby celowo pozostawić na kamieniu brązową patynę. Oznaczało to po pierwsze, że nie oczyszczamy kamiennej podstawy do powierzchni pozbawionej patyny na materiale, a po drugie — dysponujemy pewnym „zapasem” — grubością zanieczyszczającej warstwy, przeznaczonej do dalszego jej ewentualnego usunięcia. Tak przygotowane powierzchnie kamiennych podstaw kolumn poddano z kolei czyszczeniu strumieniem wody o wysokim ciśnieniu — „kärcher”.



4. Fragment powierzchni kamiennej podstawy pod kolumnę oczyszczony dwiema metodami: wstępnie — laserową, a następnie metodą „kärcher”

4. Fragment of a stone surface of the base for the column cleaned by two methods: initially — laser, and subsequently by the “kärcher” method

Ilustracja 4 przedstawia stan powierzchni kamiennej podstawy kolumny po łącznym zastosowaniu: wstępnego czyszczenia laserem, metody „kärcher”, a następnie ponownego czyszczenia wiązką laserową. Z przedstawionych zdjęć widać, że pierwotne, czarne, twarde nawarstwienia zostały częściowo usunięte po zastosowaniu samej tylko metody „kärcher”, a oczyszczona wstępnie laserem część powierzchni została ponownie zabrudzona. Brud osiadł na powierzchni podstawy został tylko częściowo rozmyty i pozostał w postaci niejednorodnych ciemnych plam w miejscu gdzie powierzchnia była czyszczona laserem. Z kolei część powierzchni podstawy nie czyszczona laserem pozostała w dalszym ciągu czarna — brak na niej jakiegokolwiek efektu czyszczenia.

Ilustracja 5 przedstawia efekt przeprowadzonego ponownego czyszczenia kamiennej podstawy z il. 4 za pomocą urządzenia ReNOVALaser 2. Obraz ten pokazuje ponowny efekt czyszczenia powierzchni kamiennej podstawy kolumny za pomocą wiązki laserowej o różnej gęstości mocy. Świadczą o tym różne kolory oczyszczonego wycinka powierzchni: od koloru czarnego poprzez brązy po kolor pierwotny kamienia. Technologia czyszczenia promieniowaniem laserowym o odpowiedniej gęstości energii (mocy) po raz wtóry unaocznia ogromne możliwości czyszczenia powierzchni kamiennych.

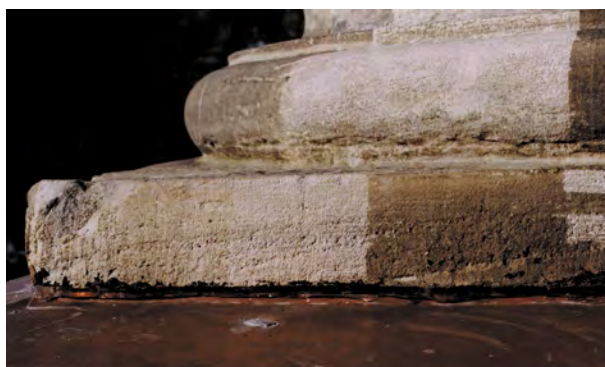
Na il. 6 widać stan powierzchni kilku tralek oczyszczonych wstępnie metodą chemiczną. Na środkowej tralce, widocznej na zdjęciu, jej lewa część została poddana dalszemu procesowi czyszczenia wiązką laserową. Widać, że z tej części powierzchni została usunięta pozostająca w dalszym ciągu po czyszczeniu chemicznym brudna warstwa — zalegający rozmyty chemicznie brud.

To zdjęcie unaocznia nam, że nawet po dokładnym czyszczeniu chemiczno-mechanicznym i splukiwaniu czyszczonej powierzchni wodą, promieniowanie laserowe jest jeszcze w stanie dokładniej oczyścić taką powierzchnię.

Ilustracja 7 przedstawia fragment powierzchni kamiennej balustrady oczyszczonej za pomocą urządzenia laserowego ReNOVALaser 2. Jak można na nim zauważyć, wiązka laserowa nie wyróżniła zarzeźbień „szlaku” wykonanego na powierzchni balustrady. Materiał i naniesiony na nim relief są zabezpieczone przed zniszczeniem.

Zalety i wady laserowej techniki renowacji kamiennych powierzchni

Metoda laserowego czyszczenia powierzchni posiada ogromną przewagę w porównaniu z metodami stosowanymi dotychczas. Jest metodą bezkontaktową, uniwersalną i bezpieczną. Nie powoduje uszkodzeń nawet bardzo delikatnych i kruchych powierzchni, ponieważ pozwala w pełni kontrolować stopień doczyszczenia materiałów.



5. Fragment powierzchni kamiennej podstawy pod kolumnę oczyszczony ponownie promieniowaniem laserowym

5. Fragment of a stone surface of the base for the column cleaned additionally by laser radiation



6. Powierzchnia kamiennej tralki po oczyszczeniu: jej prawa część czyszczona metodą chemiczną, a lewa część — doczyszczona laserem

6. Surface of a stone banister after cleaning: the right hand side was cleaned by a chemical method and the left hand side was additionally cleaned by laser

Użycie lasera przy czyszczeniu powierzchni:

1. Jest przyjazne dla środowiska.

W technice tej nie używa się wody, ścierniw, żrących rozpuszczalników, roztworów i chemikaliów stosowanych w technice konwencjonalnej. Nie istnieją więc



7. Zdjęcia przedstawiające fragment oczyszczonej powierzchni kamiennej balustrady na Grobie Nieznanego Żołnierza w Warszawie
7. Photographs presenting a fragment of the cleaned surface of a stone banister on the Tomb of the Unknown Soldier in Warsaw

żadne inne produkty wtórne, które należy dodatkowo usunąć ze środowiska lub je zneutralizować. Całkowicie eliminuje niebezpieczeństwo użycia chemicznych środków czyszczenia.

2. Ma bardzo mały wpływ na podłoże.

Jedną z najważniejszych przewag czyszczenia laserowego, przy odpowiednio dobranych parametrach wiązki laserowej jest to, że podłoże (kamienne, drewniane, metalowe i inne) nie doznaje uszczerbku w trakcie ekspozycji wiązką laserową. Istnieje pełna kontrola grubości usuwania zanieczyszczającej warstwy. W metodach konwencjonalnych jest to często utrudnione i zależne od świadomości i doświadczenia. W wyniku stosowania wszelkiego rodzaju rozpuszczalników, ścierniwi, piaskowania czy uderzeń kryształkami lodu, warstwa wierzchnia zostaje zniszczona nieodwracalnie. Powierzchnia oczyszczona laserem nie wymaga polerowania.

3. Gwarantuje selektywne usuwanie warstw z zabrudzonej powierzchni.

Wiązka laserowa może być precyzyjnie umiejscawiana na dowolnej części powierzchni przy użyciu wiązki celowniczej pochodzącej z innego lasera, np. półprzewodnikowego, emitującego fale o długości z widzialnego obszaru widma. Ponadto w celu usunięcia występujących różnego rodzaju warstw zanieczyszczających powierzchnie jednocześnie, można selektywnie dobrać parametry promieniowania laserowego dla każdej z tych warstw oddzielnie. Dobrane długości fali oraz gęstości mocy wiązki laserowej, zdejmują tę, a nie inną

zalegającą, brudną plamę z powierzchni. Jest więc metodą uniwersalną.

4. Zabezpiecza relief, wypukłości lub płaskości faktury po obróbce materiału.

Wiązka laserowa nie wyróżnia rozwinięcia formy, a sam materiał i naniesiony na nim relief są zabezpieczone przed uszkodzeniem.

5. Jest metodą wygodną.

Używając zwartego lasera o prostej konstrukcji oraz światłowodu energetycznego można doprowadzić wiązkę laserową do dowolnego miejsca, nawet na odległość do kilkudziesięciu metrów. Jest więc to metoda wygodna, zwłaszcza przy operacjach konserwatorskich wykonywanych z wysokich rusztowań. Trzymany w rękę „skalpel operacyjny” wraz z np. głowicą sterującą laserem czyni tę pracę bardzo łatwą.

6. Jest metodą niezastąpioną.

Większość powierzchni zwiertzałego materiału jest tak kruchych, delikatnych i cennych, że konwencjonalne metody czyszczenia przy ograniczonych możliwościach kontroli są nie do przyjęcia. Promieniowanie laserowe wykonuje tę czynność bez obawy o stan zachowania dzieła sztuki lub detalu w architekturze.

Laserowa metoda czyszczenia wszelkich powierzchni uznana została za technikę najbardziej efektywną i efektywną, a przede wszystkim za najmniej agresywną i przyjazną dla środowiska. Precyzja czyszczenia wymaga czasu i odpowiednich warunków chroniących oczy postronnych w czasie realizacji prac, a tego nie można zaliczyć do negatywnych stron metody.

Laser Cleaning of Select Stone Surfaces of the Tomb of the Unknown Soldier in Warsaw

The article discusses the use (the first in Poland) of the Nd:YAG laser with Q modulation for the purposes of cleaning the surface of select stone elements of the Tomb of the Unknown Soldier in Warsaw. The authors consider the impact of the parameters of the laser beam upon the rapidity of the process and the thickness of the removed hard, black layers which amassed for the past several decades.

The laser method of cleaning surfaces is the most effective and efficient, and, at the same time, the least aggressive and the most environment-friendly technique. It guarantees a selective removal of layers from the polluted surface and is highly convenient, especially in the case of conservation performed on high scaffolding.