

Łukasz Ciupiński, Elżbieta Fortuna-Zaleśna, Halina Garbacz, Tomasz Onyszczyk, Andrzej Koss, Janusz Mróz, Anna Zatorska, Krzysztof Chmielewski, Elżbieta Jeżewska, Piotr Zambrzycki, Marek Jeziorowski, Jan Marczak, Marek Strzelec, Antoni Sarzyński, Roman Ostrowski, Wojciech Skrzeczanowski, Antoni Rycyk, Christina Spaarschuh, Barbro Wedvik

Projekt MATLAS – Zaawansowane metody inżynierii materiałowej w diagnostyce dzieł sztuki poddanych renowacji laserowej za pomocą kształtowanych, wysokoenergetycznych impulsów promieniowania

MATLAS project – Advanced methods of materials engineering in diagnostics of art works after renovation by means of shaped, high-energy laser radiation pulses

1. Motywacja

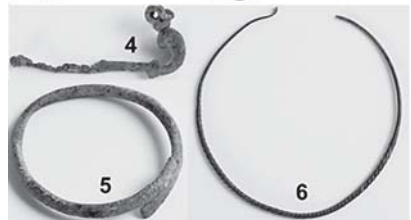
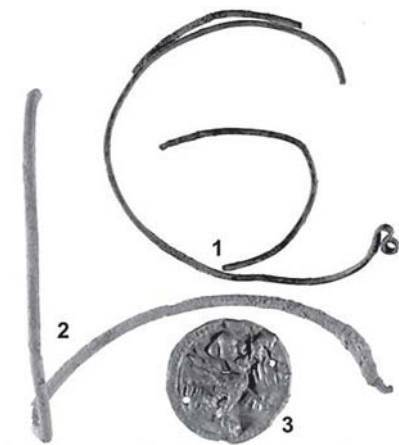
Unikalny charakter zabytków i dzieł sztuki tworzących dziedzictwo kultury i dostarczających bezcennego źródła informacji o historii regionów i cywilizacji wymaga takich metod oceny i renowacji, które nie spowodują uszkodzeń powierzchni i zapewnią ich długookresową perspektywę szeroko pojętego „wykorzystania”. Lasery impulsowe i ciągłego działania, szeroko wykorzystywane w różnych, przemysłowych procesach mikroobróbki, dają również możliwość renowacji obiektów historycznych. Odnotować należy wiele prac ukierunkowanych na wykorzystanie laserów w konserwacji metali, w których z różnymi wynikami końcowymi stosowano lasery, między innymi do usuwania warstw korozji i wtórnych pokryć z powierzchni różnych metali (Siano & Salimbeni 2001, Koh & Sarady 2003, Pini et al. 2000, Klotzbach et al. 2008, Stavrou et al. 2004). Niemniej nie rozwiązano dotychczas wszystkich związanych z tym problemów, a zastosowanie laserów w konserwacji metalu nie jest powszechnie akceptowane. Najważniejsze kwestie związane są z zachowaniem powierzchni oryginalnej, zrozumieniem fizyki formowania się niepożądanych, zmienionych laserowo warstewek, końcową morfologią naświetlanych powierzchni i opracowaniem metodyki wdrożenia na co dzień czyszczenia laserowego do praktyki konserwatorskiej (Korenberg & Baldwin 2006).

Naukowe cele projektu MATLAS są następujące: (1) – opracowanie metod diagnostyki powierzchni dzieł sztuki wykonanych z metali lub ich stopów,

dla ich bezpiecznej renowacji laserowej; (2) – opracowanie systemu laserowego umożliwiającego generację impulsów o wymaganym w renowacji, kontrolowanym kształcie i czasie trwania; (3) – dokonanie analiz zjawisk indukowanych przez impulsy laserowe na naświetlanych powierzchniach obiektów historycznych. Projekt otrzymał finansowanie z Islandii, Liechtensteinu i Norwegii w ramach Mechanizmu Finansowego EOG/Norweskiego Mechanizmu Finansowego (grant PL0259-GAE-00129-E-VI-EEA FM).

Do proponowanych metod analitycznych zaliczyć należy badania struktury powierzchni i defektów podłoża, pomiary naprężeń szczątkowych i mikro/nanotwardości, badania wpływu ablacji laserowej na mikrostrukturę materiałów, ich odporność na korozję i chropowatość powierzchni. Badania nieniszczące prowadzone są w celu oceny degradacji powierzchni i zmian chemicznych oraz fazowych warstw powierzchniowych. W diagnostyce dzieł sztuki nowoczesne metody inżynierii materiałowej uzupełniane są metodami spektroskopii laserowej i technikami optoelektronicznymi, między innymi indukowaną laserowo spektroskopią przebicia (LIBS) oraz spektroskopią Ramana.

W kategoriach minimalizacji uszkodzeń naświetlanych laserowo materiałów wstępne analizy i prace eksperymentalne faworyzują impulsy laserowe z zakresu dziesiątek nanosekund do kilku mikrosekund. Systemy z takimi impulsami oraz elastycznością w zmianie ich parametrów nie są dostępne komercyjnie, choć pewne wyniki prac w tym kierunku można już znaleźć w literaturze (Margheri et al. 2000,



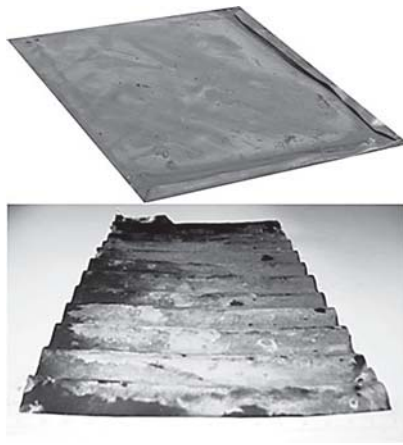
Ryc. 1. Obiekty archeologiczne wybrane do testów czyszczenia laserowego i diagnostyki: 1, 2 – kablęczki, własność Muzeum Pałac w Wilanowie; 3 – fragment okucia, wykopaliska Gdańsku; 4 – fibula, 5 – bransoleta, 6 – naszyjnik, własność klasztoru na Jasnej Górze, Częstochowa

Fig. 1. Historical archaeological objects selected for diagnostics and laser cleaning tests: 1, 2 – bows, property of Wilanów Palace Museum; 3 – ferrule, excavations in Gdańsk; 4 – fibula, 5 – bracelet, 6 – necklace, property of Pauline Fathers Jasna Góra Monastery



Ryc. 2. Para putt z brązu z pozłotą: lewa fotografia – putto z wawrzynem; prawa fotografia – putto z pochodnią
Fig. 2. Pair of bronze putti with gilding: left photo – putto with laurel; right photo – putto with torch

Ryc. 8. Względne zmiany koncentracji pierwiastków metalicznych w funkcji głębokości (ilości impulsów laserowych) w blasze miedzianej z pokrycia dachowego Pałacu w Wilanowie, zmierzone metodą LIBS: a) nawarstwienie; b) czysta blacha miedziana
Fig. 8. Relative in-depth change of elements in copper sheet, measured during LIBS experiment: a) encrustation; b) clean copper sheet



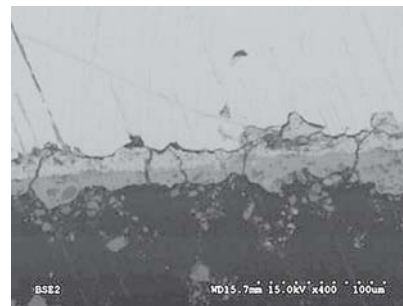
Ryc. 3. Blachy miedziane ze starego poszycia dachowego Pałacu Karola Poznańskiego w Łodzi (górna fotografia) i Pałacu w Wilanowie w Warszawie (dolna fotografia)
Fig. 3. Copper sheets from old roofing of Charles Poznański Palace in Łódź (upper photo) and Wilanów Palace in Warsaw (bottom photo)



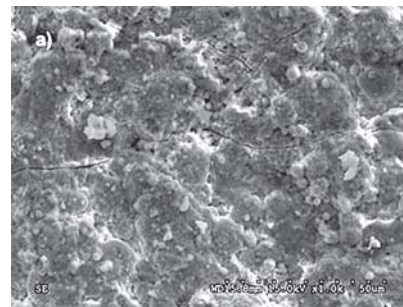
Ryc. 4. Ikona św. Paraskiewy, obraz olejny na podkładzie drewnianym z sukienką haftowaną przy wykorzystaniu różnych nici metalowych
Fig. 4. Icon of St. Praskiewa, wooden support of oil painting with dress embroidered using different metal threads



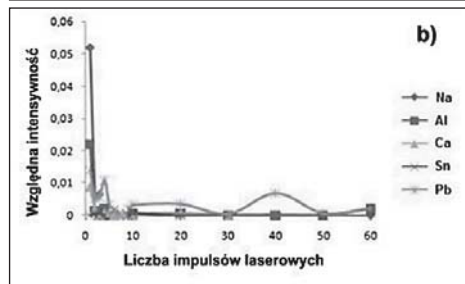
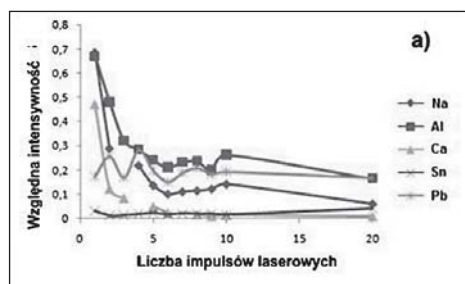
Ryc. 5. Fragment drewnianej ramy obrazu z pozłotą i przemalowaniem, własność NIKU
Fig. 5. Fragment of wooden painting frame with gilding and overpainting, property of NIKU



Ryc. 6. Zdjęcie SEM mikroszlifu nawarstwienia na poszyciu dachowym
Fig. 6. SEM image of the roofing deposit cross-section



Ryc. 7. Zdjęcia SEM topografii nawarstwień na powierzchni poszycia dachowego z widocznymi pęknięciami i strukturami kulistymi: a) topografia (mod SE); b) różnice w składzie chemicznym (mod BSE)
Fig. 7. SEM images of roofing deposits topography/surface with visible cracks and globular forms: a) topography (SE mode); b) differences in chemical composition (BSE mode)



Salimbeni et al. 2003). Należy także odnotować fakt dalekiego od pełnego zrozumienia zjawisk towarzyszących oddziaływaniu lasera z metalem oraz konieczność dalszych starań w optymalizacji i ocenie przewidywalności wyników procesu czyszczenia laserowego, w szczególności w przypadku obiektów wielowarstwowych (Marczak et al., w druku).

Interdyscyplinarna weryfikacja czyszczenia laserowego wymaga udziału w pracach zarówno specjalistów z dziedziny inżynierii materiałowej, jak i konserwatorów dzieł sztuki (specjalizujących się w obiektach metalowych i metalizowanych), co przewiduje zresztą niniejszy projekt. Wybór właściwej metody diagnostyki powierzchni oraz procedury renowacji laserowej oparty jest na danych specjalnie opracowanej i uzupełnianej na bieżąco bazy danych. Oczekiwany wynikiem projektu będzie specyficzna technologia precyzyjnej renowacji laserowej dzieł sztuki, które zbudowane są z metali lub ich stopów albo zawierają metale w warstwach powierzchniowych. Uzyskiwane wyniki rozpowszechniane są za pośrednictwem Internetu, tematycznych konferencji, spotkań roboczych, warsztatów i wystaw. Nabyta wiedza włączana jest w programy edukacyjne Wydziału Konserwacji i Restauracji Dzieł Sztuki ASP oraz Wydziałów Inżynierii Materiałowej PW i WAT.

2. Konsorcjum projektu

Jak to opisano wyżej, projekt ma charakter w pełni interdyscyplinarny i opiera się na współpracy pomiędzy Politechniką Warszawską – Wydziałem Inżynierii Materiałowej (WIM), Akademią Sztuk Pięknych w Warszawie – Międzyuczelnianym Instytutem Konserwacji i Restauracji Dzieł Sztuki (MIK), Wojskową Akademią Techniczną – Instytutem Optoelektroniki (IOE MUT) oraz Norweskim Instytutem Badań nad Dziedzictwem Kultury (NIKU).

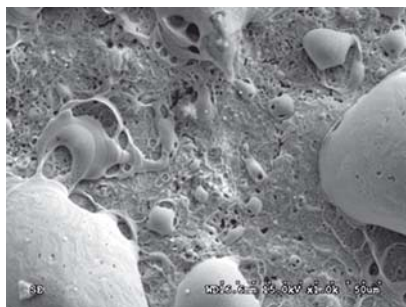
Przejrzysta struktura prac w ramach projektu podzielona jest na trzy zasadnicze Działania tematyczne (A), które krótko określić można jako Diagnostykę (A1), Lasery (A2) i Ocena (A3), wspiera-

ne przez dwa Działania wykorzystujące wyniki projektu: Prezentacje (A4) i Rozpowszechnianie (A5) oraz dwa czysto administracyjne zadania WIM: Zakup Sprzętu (A6) oraz Zarządzanie/Informacja (A7).

Koordinator projektu MATLAS (WIM), będący spadkobiercą Oddziału Metalurgii i Inżynierii Materiałowej założonego w 1929 r. przez prof. J. Czochralskiego (sławnego wynalazcę metody wzrostu pojedynczych kryształów), stał się niezależnym Wydziałem w 1991 r. Z prawie stuletnim doświadczeniem w nauczaniu i pracach badawczo-wdrożeniowych w inżynierii materiałowej, WIM znajduje się obecnie na pierwszym miejscu w Polsce w tej dziedzinie nauki. Poza koordynacją całego projektu udział WIM polega na koordynacji Działania A1 i uczestnictwie w Działaniach A1 i A3. Prace te polegają na badaniach i opracowaniu metod inżynierii materiałowej do diagnostyki powierzchni dzieł sztuki (A1) oraz udziale w opracowaniu ocen czyszczenia laserowego, udziale w prowadzeniu i uzupełnianiu bazy danych, rozpowszechnianiu wyników oraz działaniach pokazowych i szkoleniowych (A3-A5).

Instytut MIK utworzony został w 1999 r., na podstawie uchwał Senatów Akademii Sztuk Pięknych w Warszawie i Krakowie, jako międzyuczelniana jednostka badań nad ochroną i restauracją dzieł sztuki. Obie macierzyste uczelnie chlubią się ogromnym doświadczeniem w pracach badawczo-rozwojowych w tej dziedzinie kultury. MIK koordynuje w Polsce i za granicą sporą liczbę dużych i prestiżowych projektów konserwatorskich. W ramach projektu MIK uczestniczy w trzech głównych Działaniach oraz koordynuje Działanie A3. Rola MIK w projekcie obejmuje udział w porównawczych i uzupełniających badaniach materiałów, warstw i obiektów przy wykorzystaniu metod laserowych, optoelektronicznych i fizykochemicznych (A1) oraz konsultacjach i udziale we wstępnej fazie opracowania systemów i technologii laserowych (A2). Ponadto MIK koordynuje oceny wyników czyszczenia, opracowanie bazy danych oraz przedsięwzięcia związane z rozpowszechnianiem wyników, pokazami i szkoleniami (A3-A5).

IOE WAT jest największym w Polsce ośrodkiem naukowo-badawczym i edukacyjnym w dziedzinie fotoniki, urządzeń i systemów optoelektronicznych i technologii laserowych. Personel Laboratorium Zastosowań Laserów specjalizuje się w laserowej ablacji ciał stałych, włącznie z opracowaniem nowych impulsowych źró-



Ryc. 9. Fotografia SEM topografii nawarstwienia po pojedynczym impulsie laserowym. Gęstość energii – 4.7 J/cm²
Fig. 9. SEM image of encrustation topography after a single laser shoot. Fluence – 4.7 J/cm²



Ryc. 10. Fotografia SEM topografii podłoża miedzianego po naświetleniu kilkoma impulsami laserowymi. Gęstość energii – 5.3 J/cm²
Fig. 10. SEM image of copper substrate topography after a multiple laser shoot. Fluence – 5.3 J/cm²

deł laserowych oraz zastosowaniem laserów w nanotechnologii i czyszczeniu laserowym. Instytut Optoelektroniki WAT uczestniczy we wszystkich trzech Działaniach i koordynuje A2. Podobnie jak MIK, IOE WAT bierze udział w porównawczych i uzupełniających badaniach materiałów, warstw i obiektów przy wykorzystaniu metod laserowych, optoelektronicznych i fizykochemicznych (A1). W obszarze Działania A2 IOE WAT opracowuje podzespoły, systemy i technologie czyszczenia laserowego metalowych dzieł sztuki. W ramach A3-A5 Instytut uczestniczy w przedsięwzięciach związanych z rozpowszechnianiem wyników, pokazami i szkoleniami.

NIKU jest autonomiczną instytucją z doświadczeniem ukierunkowanym na zachowanie miejsc i zabytków kultury. Zasadnicze dziedziny ekspertyzy NIKU związane są z historią sztuki, konserwacją, etnologią, archeologią, architekturą i inżynierią. NIKU zapewnia szeroki zakres konsultacji i badań projektom dziedzictwa kultury prowadzonym przez organa nadzoru nad dziedzictwem, planistów, deweloperów i prywatnych właścicieli wartościowych dzieł sztuki. Partner norweski bierze udział w badaniach porównawczych i uzupełniających (A1) oraz jest proszony o konsultacje w opracowaniu technologii czyszczenia laserowego. W Działaniach A3-A5 NIKU dołącza do innych partnerów projektu w ocenie wyników czyszczenia, konsultuje opracowanie bazy danych i uczestniczy w pokazowych i szkoleniowych akcjach oraz w rozpowszechnianiu wyników projektu.

Podsumowując, projekt jest realizowany we współpracy dwóch zespołów konserwatorskich (MIK i NIKU) zatrudniających profesjonalistów doświadczonych w restauracji dzieł sztuki. Ich ścisłe współdziałania ze specjalistami techniki laserowej z IOE WAT oraz koordynującymi projekt ekspertami inżynierii materiałowej z WIM, zapewniają naukowe i techniczne podstawy konieczne do prowadzenia wiarygodnych eksperymentów i obiektywnej, wspólnej oceny wyników projektu.

3. Obiekty historyczne

Metalowe dzieła sztuki, objęte badaniami w ramach projektu, wybrane zostały spośród kilku kolekcji udostępnionych do testów metod diagnostyki i czyszczenia laserowego.

Pierwsza grupa (ryc. 1) przedstawia znaleziska archeologiczne z różnych miejsc, aktualnie będące głównie w posiadaniu Muzeum Pałacu w Wilanowie i klasztoru Ojców Paulinów na Jasnej Górze w Częstochowie. Tak jak w przypadku innej opisywanych w literaturze biżuterii z brązu (Pini et al. 2000), próbki reprezentują sobą różne rodzaje zmian powierzchniowych, typowo widocznych

jako nawarstwienia będące wynikiem korozji oraz pochodzące od materiałów otaczających miejsce ich znalezienia.

Rycina 2 przedstawia dwa kolejne obiekty, pochodzącą z końca XVII wieku parę putt z brązu. Ich ekspozycja w miejscu elementów dekoracyjnych fasady ogrodów Pałacu w Wilanowie spowodowała znaczne zabrudzenie, powstanie lokalnych korozji stopu pod pozłotą oraz licznych uszkodzeń mechanicznych. Obie figurki włączone zostały w pełny program konserwacji z wykorzystaniem tradycyjnych i laserowych metod czyszczenia powierzchni.

Zestaw skorodowanych próbek testowych starego pokrycia dachowego (ryc. 3) reprezentuje satysfakcjonujący naukowców przykład powierzchni obiektu historycznego, która w ogromny sposób ucierpiała od wpływu zanieczyszczeń atmosferycznych.

Interesujący obiekt historyczny przedstawia rycina 4. Ikona św. Paraskiewy z XVIII wieku z okładem wykonanym w technice haftu kładzionego nici metalowymi (srebro i srebro złoczone). Dodatkowo użyte zostały metalowe cekiny, bajorki oraz szeroka blaszka. Stan zachowania obiektu jest raczej dobry, z wyjątkiem znacznego ubytku blaszki na krawędziach oraz ogólnego zabrudzenia i korozji nici metalowych, co wpływa na zatarcie kontrastów kolorystycznych między partiami w kolorze srebrnymi i złotym. Opracowanie programu konserwacji okładu będzie wyzwaniem dla zespołu konserwatorów, choć podobne obiekty były już czyszczone przy wykorzystaniu techniki laserowej.

Rycina 5 przedstawia z kolei fragment drewnianej ramy obrazu z pozłotą, pokrytą nawarstwieniem i brązową farbą, udostępniony do badań przez norweskich partnerów projektu.

4. Wstępne wyniki prac

W pierwszym roku realizacji projektu prowadzone były badania i prace ukierunkowane na:

- testowanie metod diagnostyki cech, struktur i składu materiałów;
- projekty, konstrukcje i badania podzespołów laserowych;
- numeryczne modelowanie oddziaływania promieniowania laserowego z metalami;
- prace projektowe i oprogramowanie bazy danych;
- testowanie metod diagnostyki z punktu widzenia oceny wyników czyszczenia laserowego.

Testy czyszczenia laserowego prowadzone były za pomocą dostępnych systemów laserowych, to znaczy urządzeń ReNOVALaser pracujących w reżimie z Q-switchem i swobodnej generacji (Koss et al. 2007).

Wstępny etap badań nad opracowaniem jednokanałowego i dwukanałowego stanowiska eksperymentalnego lasera Nd:YAG, charakteryzującego się zmienną długością równych impulsów wyjściowych w skali czasu od nanosekund do mikrosekund, przedstawiono w 2009 r. w trakcie Laser Metrology Conference (Marczak et al. 2009). Aktualne badania obejmują testowanie pierwszego stopnia wzmacniacza (pręty laserowe o średnicy 8 mm) i badania jego współpracy z impulsami generatora laserowego, charakteryzującymi się obecnie długościami impulsów ograniczonymi do około 50 ns.

Opracowany, nowy model numeryczny pozwolił na opis oddziaływania impulsów laserowych o niższej gęstości mocy (10^6 W/cm²) z wielowarstwowymi próbkami metali (Marczak et al. 2009a). Najbardziej interesujące uzyskane wyniki opisują topnienie i dyfuzję wewnętrznych warstw metalicznych o niższej temperaturze przemiany bez naruszania (ablacji) warstw zewnętrznych. Wyniki te, potwierdzone później eksperymentalnie, pozwoliły na wyciągnięcie podstawowych wniosków ważnych przy laserowym czyszczeniu wielowarstwowch, metalowych obiektów dziedzictwa kultury – jak wysoko prawdopodobne i możliwe są ich fizyczne i chemiczne modyfikacje i oddziaływania wzajemne w przypadku różnych punktów topnienia metali.

4.1. Badania materiałowe

Pierwsza grupa obiektów wybranych do kompleksowych badań składała się z blach miedzianych (ryc. 3) i pary putt z brązu (ryc. 2). Prezentowany w dalszej części opis i rysunki przedstawiają przede wszystkim materiały i struktury pokrycia dachowego z Pałacu w Wilanowie. Rezultaty uzyskane przy badaniach putt można znaleźć w równoległej publikacji konferencji (Garbacz et al., this issue).

Skład fazowy osadzeń pobranych z blach miedzianych pokrycia dachowego określano za pomocą dyfraktometru rentgenowskiego Philips 1830 z gonometrem X-Pert (promieniowanie CuK_α). Pomiar prowadzono przy geometrii $\Theta/2\Theta$, w zakresie 2Θ 20–100° z krokiem 0.05° i czasem próbkowania 3 sekundy na krok. Jako główne składniki zidentyfikowano kupryt, brochantyt i kwarc. Nie można jednak wykluczyć obecności niewielkich ilości innych związków, takich jak antleryt, paramelaconit i węglan miedzi.

Struktury próbek badano przy wykorzystaniu skaningowego mikroskopu elektronowego Hitachi S-3500N (mod SE i BSE z przystawką EDS (analizy punktowe składu chemicznego). Przykładową strukturę warstwy utworzonej na blachach miedzianych przedstawiono na ryc. 6. Jej grubość sięga 65 μ m i składa się ona z dwóch warstw o porównywalnej grubości. Nawarstwienie jest kruche i posiada

Tabela 1. Wyniki punktowych analiz EDS powierzchni nawarstwienia
Table 1. Results of EDS point analyses from deposit surface

wt.%	C	O	Al	Si	P
1	3.17	37.34	0.48	0.52	0.83
2	3.40	25.75	0.35	0.67	0.62
3		32.96	0.41	1.00	0.85
wt.%	S	Cl	Ca	Fe	Cu
1	6.37	0.60	–	1.02	49.68
2	7.09	0.87	–	–	61.25
3	7.27	1.06	0.20	–	56.26

szereg pęknięć powstałych w trakcie przygotowania próbek. Widma EDS ujawniły obecność tlenków miedzi (miedź i tlen) w dolnej części warstwy z kilkuprocentowym dodatkiem siarczynu miedzi w części górnej. Materiałem cząstek o średnicy 30 μ m w zewnętrznej warstwie okazał się kwarc.

Topografię powierzchni blachy miedzianej przedstawia ryc. 7. Skład chemiczny wierzchniej warstwy przedstawiono również w tabeli 1. Zasadniczymi składnikami warstwy są tlenki miedzi i siarka. Wykryto również niewielkie ilości aluminium, krzemu, chloru, żelaza i fosforu.

Stratyfografię rozkładu pierwiastków metalicznych w nawarstwieniu pokrycia dachowego analizowano przy wykorzystaniu spektrometru LIBS ESA 4000 (układ optyczny typu echelle) o zakresie widmowym 200–780 nm i rozdzielczości $\lambda/\Delta\lambda \sim 20000$. Energia impulsów laserowych 266 nm wynosiła 12 mJ przy długości impulsów 4 ns. Na ryc. 8 przedstawiono względne intensywności pików linii NaI 589.59, AlI 394.40, CaI 445.48, SnI 286.33 i PbI 405.78 nm względem linii miedzi CuI 521.80 nm w funkcji głębokości pomiaru (liczby impulsów lasera).

4.2. Testy czyszczenia laserowego

W ablacji różnych nawarstwień na próbkach miedzianych wykorzystano podczerwony laser Nd:YAG (ReNOVALaser 5) pracujący na długości fali 1064 nm w reżimie swobodnej generacji. Przedstawione w niniejszym artykule wyniki ograniczono wyłącznie do oddziaływania najkrótszych impulsów swobodnej generacji około 100 μ s. Więcej wyników znaleźć można w (Garbacz et al., in press).

Oddziaływanie pojedynczego impulsu laserowego z osadzeniami na powierzchni powodowało ich topnienie (ryc. 9), odparowanie i rozpylenie. Zastosowanie wielokrotnych impulsów laserowych w zakresie gęstości energii 4.72–7.8 J/cm² powodowało co prawda całkowite usunięcie nawarstwienia, ale z jednoczesnym nadtopianiem miedzianego podłoża (ryc. 10), co jest zresztą oczekiwanym wynikiem dla długich impulsów laserów Nd:YAG (Salimbeni et al. 2003).

5. Wnioski

Przedstawione szczegółowe badania struktur i składu historycznych próbek materiałów przy wykorzystaniu technik diagnostycznych SEM-EDS, XRD i LIBS są użyteczne również w ilościowej analizie skuteczności czyszczenia oraz w wyróżnieniu specyficznych problemów i zakresu możliwości techniki laserowego czyszczenia metali. Jednak przedstawione testy samego czyszczenia należy traktować wyłącznie jako rutynowe przygotowanie próbek do badań narzędzi diagnostycznych, a nie jako zoptymalizowany proces.

Bibliografia

- Garbacz, H. et al. *Bronze putti from Wilanów Palace garden façade – conservation studies and tests of laser cleaning*. This issue.
- Garbacz, H. et al. *Laser cleaning of copper sheets*. Applied Physics A. In press.
- Klotzbach, U. et al. 2008. *Potential and limitations of laser technology in restoration of metallic objects of art and cultural heritage*. Materials and Corrosion 59: 220.
- Koh, Y. & Sarady, I. 2003. *Cleaning of corroded iron artefacts using pulsed TEA CO₂ and Nd:YAG lasers*. Journal of Cultural Heritage. 4(S1): 129-133.
- Korenberg, C. & Baldwin, A. 2006. *Laser cleaning tests on archaeological copper alloys using an ND:YAG Laser*. Laser Chemistry (2006): Article ID 75831.
- Koss, A. et al. 2007. *Experimental investigations and removal of encrustations from interior stone decorations of King Sigismund's Chapel at Wawel Castle in Cracow*. In: J. Nimrichter, W. Kautek, M. Schreiner (eds), *Springer Proceedings in Physics*: 116, 125-132.
- Marczak, J. et al. *Numerical modeling of laser-matter interaction in the region of „low” laser parameters*. Applied Physics A. In press.
- Marczak, J. et al. 2009. *Set of advanced laser cleaning heads and systems*. Proceedings SPIE 7391: 73910T.
- Margheri, F. et al. 2000. *SMART CLEAN: a new laser system with improved emission characteristics and transmission through long optical fibres*. Journal of Cultural Heritage. 1(S1): 119-123.
- Pini, R. et al. 2000. *Tests of laser cleaning on archeological metal artefacts*. Journal of Cultural Heritage. 1(S1): 129-S137.
- Salimbeni, R. et al. 2003. *A variable pulse width Nd:YAG laser for conservation*. Journal of Cultural Heritage 4(S1): 72-76.
- Siano, S. & Salimbeni, R. 2001. *The Gate of Paradise: physical optimisation of the laser cleaning approach*. Studies in Conservation 46: 269-281.
- Stavrou, R. et al. 2004. *Laser cleaning on Roman coins*, Applied Physics A. 79: 1111-1115.

Streszczenie

Projekt MATLAS PL0259, realizowany w ramach Mechanizmu Finansowego EOG/Norweskiego Mechanizmu Finansowego, w Obszarze Priorytetowym „Konservacja Europejskiego Dziedzictwa Kultury”, został z powodzeniem rozpoczęty w lipcu 2008 r. Naukowe cele projektu obejmują opracowanie metod diagnostyki powierzchni dzieł sztuki wykonanych z metali (stopów) w celu ich bezpiecznej renowacji laserowej, opracowanie systemu laserowego zdolnego do generacji impulsów o wymaganym w renowacji, kontrolowanym kształcie i czasie trwania oraz analizy zjawisk indukowanych przez impulsy laserowe na powierzchni obiektów historycznych. Artykuł przedstawia uczestniczące w projekcie ośrodki naukowe, projekt i wykonanie laserowego systemu czyszczącego oraz metodykę badań eksperymentalnych. Podsumowuje on również najnowsze wyniki projektu oraz przedstawia metalowe dzieła sztuki wybrane do badań, wraz z ich analizami historycznymi i strukturalnymi.

Abstract

MATLAS project PL0259 successfully started in July 2008 under the EEA Financial Mechanism/Norwegian Financial Mechanism and in the Key Priority Section “Conservation of European Cultural Heritage”. The scientific aims of the project include: development of diagnostic methods for analysis of metal (alloy) artworks surfaces for safe laser renovation; development of a laser system capable of generating pulses with controlled shape and time duration required for renovation, and analysis of phenomena induced by laser pulses in the treated surfaces of historical objects. The paper presents participating scientific teams, design and realization of laser cleaning system and methodology of experimental investigations. It also summarizes the latest project results and presents metal artworks selected for examination with their historical and structural analysis.