

BADANIA NIENISZCZĄCE OBIEKTÓW DZIEDZICTWA KULTURY

NON-DESTRUCTIVE TESTING OF CULTURAL HERITAGE OBJECTS

Mgr inż. Jan KIELCZYK, jan@kielczyk.pl

Inspecta Polska Sp. z o.o., Warszawa

*Artykuł recenzowany

Streszczenie

Dziedzictwo kultury jest i zawsze było ważnym czynnikiem rozwoju socjalno-ekonomicznego. Badania nieniszczące od wielu lat są skutecznie stosowane do obiektów dziedzictwa kultury. Celem badań nieniszczących tych obiektów najczęściej jest: – uzyskanie wiedzy o stanie technicznym obiektów aby zapobiec dalszym uszkodzeniom i opracowanie planu konserwacji; – określenie czasu, miejsca i w niektórych przypadkach autorstwa dzieła; – określenie rodzaju używanych materiałów artystycznych, szlaków handlowych. Badania nieniszczące stosowane są do: – obrazów na płótnie, drewnie i tynku; – rzeźb z drewna, metalu i marmuru; – budowli z cegły, kamienia i drewna; – wyrobów rzemiosła artystycznego, dokumentów. Stosowane są głównie badania wizualne, radiograficzne, ultradźwiękowe, termograficzne w podczerwieni i metodą fluorescencji rentgenowskiej (XFR). Poniżej kilka wybranych przykładów zastosowań.

Słowa kluczowe: badania nieniszczące, obiekty dziedzictwa kultury.

Abstract

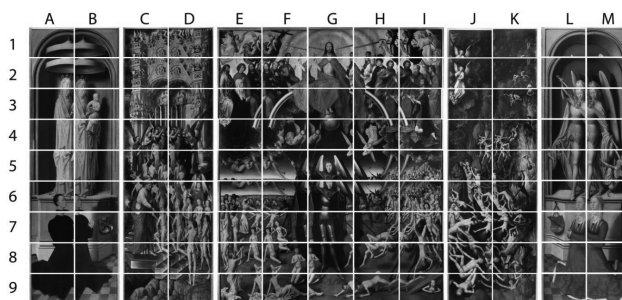
Cultural heritage is and always was important factor of social-economic development. Non-destructive testing has been successfully applied in objects of cultural heritage for many years. The aim of non-destructive testing most often is: – providing knowledge of technical condition of objects in order to better understand how to prevent its further deterioration and conserve it; – determination time and place of objects creation and in some cases their authorship; – revealing fraud, kind of artistic materials used, trade routes. Non-destructive testing is applied to: – paintings on canvas, wood and plaster; – wood, metal and marble sculptures; – buildings made of brick, stone and wood; – artistic craft products, documents. Visual, radiographic, ultrasonic, infrared thermographic and X-ray fluorescence testing is applied.

Keywords: non-destructive testing, cultural heritage objects.

1. Badania radiograficzne

1.1 Badanie obrazu Hansa Memlinga „Sąd ostateczny” [1]

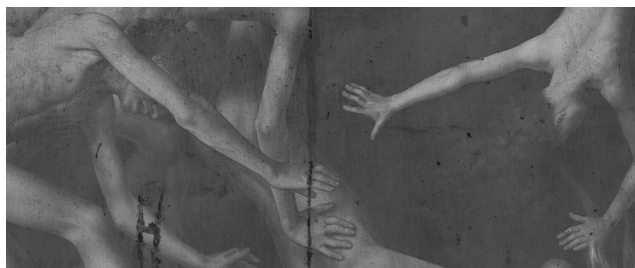
Obraz zlokalizowany w Muzeum Narodowym w Gdańsku jest tryptykiem wykonanym na drewnie dębowym w technice tempery. Wymiary głównego obrazu: 241x180,8 cm, wymiary skrzydeł bocznych, malowanych dwustronnie, 242x90 cm. Obraz powstał w roku 1473. Badanie przeprowadzono w lutym 2015. Wykonano fotografie w świetle widzialnym i ultrafioletowym oraz radiogramy. Obrazują budowę i aktualny stan obrazu, ale także dają możliwość obserwacji i monitorowania ewentualnych zmian na powierzchni lub w strukturze wewnętrznej obiektu. Zdjęcia wykonano aparatem CANON 5D Mark III z obiektywem CANON 100 mm f/2.8 USM Macro. Do zdjęć VIS stosowano oświetlenie halogenowe 2x500W, natomiast fotografie fluorescencji w ultrafiolecie wykonano przy użyciu świetlówek UV 40W, GE F40 Black Light Blue EX, pracujących w zakresie 368 nm. Powierzchnię obrazu fotografowano we fragmentach, stosując pojedyncze kadry o tej samej wielkości. Rys. 1.1 prezentuje podział powierzchni obiektu na poszczególne kadry.



Rysunek 1.1. Podział obiektu na 117 kadrów podczas fotografowania w świetle widzialnym (VIS) i ultrafioletowym (UV)

Do badań radiograficznych zastosowano system DIX-Ray, który oparty jest o bezprzewodowy detektor promieniowania w postaci panelu o wymiarach 46x38 cm oraz lampę rentgenowską ORANGE 1040 HF. Parametry ekspozycji: 40kV i 40mAs. Podobnie jak w przypadku fotografii zastosowano sekwencję naświetlań przesuując względem nieruchomego obiektu układ lampa-detektor. Wielkość kadru wynika z formatu detektora, kolejne kadry nieznacznie na siebie zachodziły. Obraz główny wykonano w 36 pionowo ustawionych kadrach, a każde z skrzydło w 18 poziomych, co daje łączną ilość 72 ekspozycji. Złożoną z poszczególnych kadrów panoramę przedstawiającą

obraz główny poddano dodatkowo obróbce komputerowej, w wyniku której wirtualnie „usunięto” listwy parkietarzu znajdujące się na odwrociu deski. Pozwala to lepiej zobrazować budowę oryginalnych desek podobrazia i warstwy malarskiej. Fotografie obrazują stan zachowania warstwy malarskiej. Widoczna jest siatka spękań i ich charakter, określono przyczyny ich występowania. Makrofotografie obrazują liczne odspojenia, pęknięcia i ubytki farby odsłaniające skorodowane podłoże. Widoczne są miejsca wcześniej powstałych uszkodzeń oraz ślady konserwacji, jakim poddawano obraz w przeszłości. Można zaobserwować też miejsca pęknięć na łączeniach desek, niewielkie ubytki, których część wypełniona jest kitem i pokryta retuszem a część jedynie wyretuszowana. Fotografie w ultrafiolecie pokazują fluorescencję werniksu oraz wyraźnie zarysowane ślady wszystkich wtórnych interwencji. Lokalnie widoczne są nierówności w warstwie werniksu, różną grubość warstwy, niewielkie zacieki, smugi od pędzla, ślady lokalnego przemycia. Fotografie w ultrafiolecie przede wszystkim dobrze dokumentują wszystkie retusze przykrywające mniejsze lub większe ubytki lub przetarcia farby. Widoczne są w wielu miejscach w postaci ciemnych plam o różnej intensywności i barwie. Zróżnicowanie to wynika zarówno z różnego wieku jak i rodzaju użytych materiałów malarskich. Na powierzchni widoczne są także drobne punktowe nawarstwienia o różnym pochodzeniu. Są to drobne zabrudzenia, zachłapania oraz odchody owadów. Miejsce przyklejonego odspojenia widoczne jest na Rys. 1.2



Rysunek 1.2 Fragment obrazu w ultrafiolecie z przyklejonym odspojeniem

Radiografia cyfrowa umożliwiła ocenę budowy i stanu zachowania drewnianego podobrazia. Można zobaczyć regularne przyrosty roczne desek. Widoczne są także miejsca ich połączeń, a szczególnie gniazda i wpuszczane w nie kołki, którymi wzmocniono spoiny. Wyraźnie widoczne są kity zawierające wypełniacz silnie absorbujący promieniowanie rentgenowskie. Radiogram pokazuje także sposób opracowania warstwy malarskiej. Dzięki dużej zawartości bieli ołowiowej można zaobserwować miejsca ubytku farby wraz z gruntem. Na Rys. 1.3 pokazany jest fragment obrazu z twarzą Portinariego utworzony metodą VIS, UV i RTG.

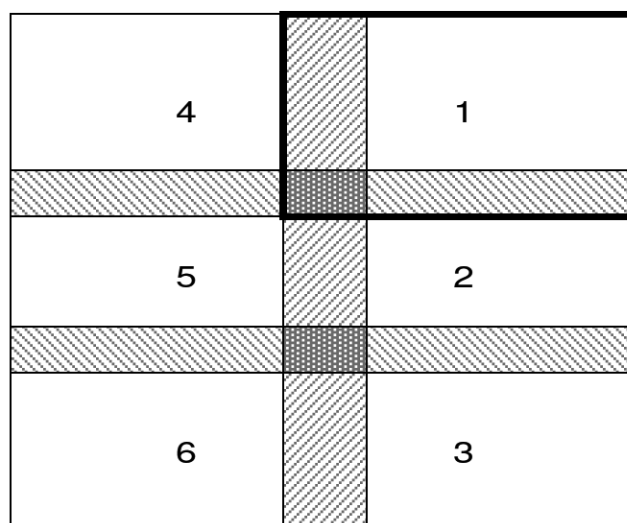


Rysunek 1.3 Twarz Poltinariego na fotografii VIS, na radiogramie i fotografii UV

Wykonane badania dają obraz stanu powierzchni malowidła, a także jego wewnętrznej struktury, ilustrując wszystkie charakterystyczne rodzaje uszkodzeń. Powstała w ten sposób graficzna baza danych daje możliwość kontroli obiektu i monitorowania ewentualnych zmian.

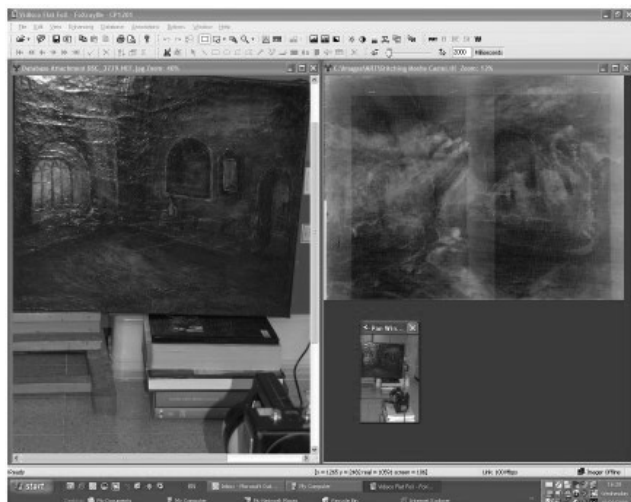
1.2 Obraz na płótnie Moshe Castela „Synagogue on Saturday” [2]

Namalowany na początku 20 wieku obraz olejny poddano badaniu radiograficznemu celem potwierdzenia podejrzenia, że pod malowidłem istnieje inny obraz, i że nie popełniono oszustwa. Zastosowano przenośny impulsowy aparat rentgenowski o napięciu 270 kV i 40 impulsów ($\approx 2,8$ sekundy) oraz detektor cyfrowy typu płaski panel. Aparat ustawiony był 1200 mm przed obrazem. Ponieważ wymiar detektora (28x40 cm) był mniejszy niż wymiar obrazu, dla zarejestrowania całego malowidła wykonano 6 ekspozycji wg. schematu pokazanego na Rys. 1.4



Rysunek 1.4 Mapa ekspozycji

Za pomocą profesjonalnego oprogramowania rentgenowskiego zszyto poszczególne obrazy i utworzony został obraz rentgenowski całego malowidła. Wynik badania wykazał pod właściwym obrazem portret kobiety.



Rysunek 1.5 Fotografia malowidła i odpowiadający mu obraz rentgenowski

1.3 Wykorzystanie metody radiologicznej z użyciem promieniowania rentgenowskiego i neutronowego w konserwacji drewnianych dzieł sztuki nasyconych impregnantem Karbolineum [3]

Drewniane dzieła sztuki przechowywane od stuleci w kościołach ulegały procesom gnilnym spowodowanym obecnością robaków drzewnych. Aby zatrzymać ten proces ok. 100 lat temu zaczęto pokrywać rzeźby smołowym preparatem *Karbolineum*. Preparat spowodował wystąpienie ciemnych plam na powierzchni rzeźb (Rysunek 1.6) i uwalnianie do atmosfery szkodliwych substancji wyczuwanych jak typowy zapach oleju smołowego.

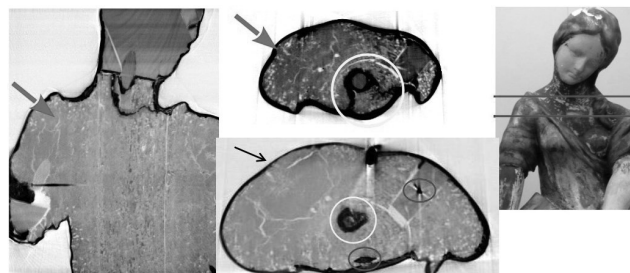


Rysunek 1.6 Plamy na rzeźbie spowodowane impregnantem

Postanowiono pozbyć się tych substancji, aby uzyskać czyste środowisko wolne od zagrożeń zdrowia wewnątrz kościołów i odzyskać pierwotne piękno dzieł sztuki. Roz-

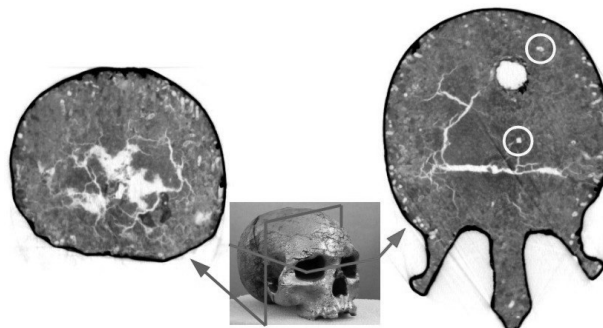
wiązanie tego problemu wymaga uzyskania wiedzy o naturze zanieczyszczającej cieczy i jej rozkładzie w badanym obiekcie. Zastosowano rentgenowską (XCT) i neutronową (nCT) tomografię komputerową. Badania wykazały rozkład impregnanta w rzeźbie a także ujawniły ślady poprzednich zabiegów konserwacyjnych. Jak oczekiwano, XCT pokazała wyraźnie więcej szczegółów struktury wewnętrznej niż nCT. Natomiast nCT pozwoliła na zaobserwowanie różnic w materiale zawierającym wodór jako składnika impregnanta.

Badaniom poddano figurkę VoH i czaszkę. Wewnętrzny widok figurki z użyciem promieniowania rentgenowskiego, jak to widać na Rysunku 1.7 pokazał, że jej części zostały całkowicie wymienione przypuszczalnie w czasie prac konserwatorskich w roku 1903 i dokonano impregnacji. Widoczne jest klejone połączenie między zastąpioną głową a pozostałą częścią rzeźby. Przekroje pokazują gęsty materiał wypełniający w rejonie centralnej części figurki i kawałek gwoździa. Ślady pozostawione przez robaczki drzewne są wyraźnie widoczne w obszarze ramion.



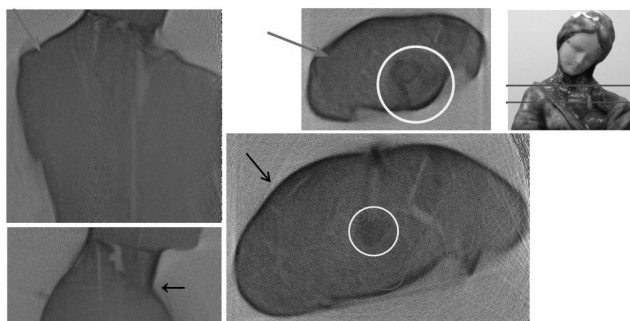
Rysunek 1.7 XCT figurki VoH, podłużny i poprzeczny przekrój. Czerwone strzałki pokazują miejsca uszkodzone, czarna strzałka pokrycie farbą. Czerwone okręgi pokazują gwoździe, kółka turkusowe-centralne wzmocnienia.

Sekcja przez czaszkę na Rysunku 1.8 ujawniła otwory w zewnętrznym regionie jako oczywiste pozostałości biologicznej degradacji i pęknięcia w rejonie centralnym. Badania CT wykorzystano do obliczenia objętości, co w połączeniu z pozyskanym ciężarem pozwoliło określić gęstość elementu (0,88 g/ml). W poziomej sekcji na Rysunku 1.8 widoczne są dwa otwory w żółtym kółku, co było interesujące w porównaniu z wynikami badania nCT.

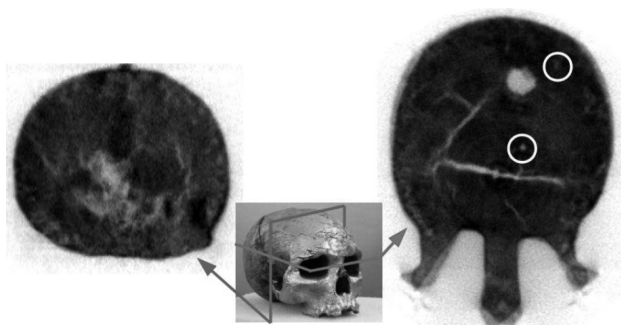


Rysunek 1.8 XCT rzeźby czaszki

Obrazy nCT figurki VoH i czaszki pokazano na Rysunkach 1.9 i 1.10



Rysunek 1.9 nCT figurki VoH, podłużne sekcje od frontu (u góry po lewej) i z boku (u dołu po lewej). Obszary uszkodzone pokazane są czerwonymi strzałkami jak na rysunku 1.7. Czarne strzałki pokazują obszary o dużej gęstości w połączeniu z farbą pokryciową, wzmocnienia (turkusowe okręgi) wyglądają bliżej, gwoździe są niewidoczne (czerwone okręgi)



Rysunek 1.10 nCT rzeźby czaszki

Badania XCT i nCT pozwoliły na ujawnienie wewnętrznej struktur badanych obiektów, uszkodzenia wcześniejszej degradacji biologicznej i szczegóły poprzednich prac konserwatorskich. Pokazały rozkład impregnanta w obiektach, co ułatwia dekontaminację.

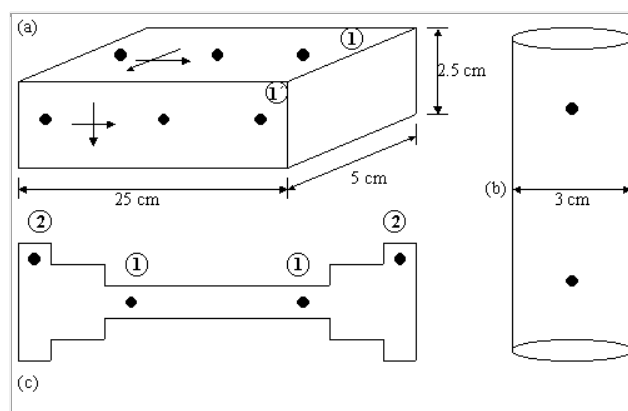
Badania CT są na bieżąco wykorzystywane w pracach konserwatorskich.

2. Badania ultradźwiękowe monumentów z marmuru [4]

W starożytnej Grecji marmur był dość powszechnie stosowany w budowie obiektów. Do bardziej znanych monumentów greckiego dziedzictwa kultury należy świątynia Partenon na Akropolu w Atenach (448-432 p.n.e.), Hermes Praksytelesa (IV w. p.n.e.), Nike z Samotraki (początek II w. p.n.e.) i Afrodyta z Milos. Obiekty z marmuru z czasem ulegają powolnej degradacji. Eksperti pracujący nad projektami restauracji obiektów starożytnych potrzebują dokładnej wiedzy o własnościach mechanicznych różnych elementów strukturalnych tych monumentów.

Marmur jest uważany jako produkt metamorfizmu złóż wapiennych. Powstaje w wyniku działania niezależnie od siebie ciepła i ciśnienia albo pod działaniem jednocześnie obu tych czynników. Składa się głównie ze skryształizowanych ziaren wapienia (CaCO_3), albo dolomitu (MgCO_3), lub jako ich mieszanka. Kolor marmuru zależy od domieszek substancji obcych, jak muskowit i chlorin.

Bardzo dobre własności fizyczne i mechaniczne, takie jak wysoka odporność na ścieranie i podatność na polewanie (w przeciwieństwie do innych materiałów skalistych), wysoka wytrzymałość i twardość powodują, że marmur jest powszechnie stosowanym materiałem w budownictwie i rzeźbiarstwie. Niestety większość odmian marmuru ma naturę anizotropową i cechuje się dużą kruchością. Określenie ich własności mechanicznych przy stosowaniu konwencjonalnej niszczącej metody badania materiałów jest trudne technicznie i nieakceptowalne w przypadku zabytków o dużej wartości archeologicznej. Wstępne próby zastosowania badań ultradźwiękowych do określania własności mechanicznych marmuru wykazały, że wyniki są porównywalne z wynikami niszczących badań mechanicznych. Wykonano badania porównawcze obu tych metod. Do badań mechanicznych wykonano próbki pokazane na Rys. 2.1.



Rysunek 2.1 Kształt, wymiary i punkty pomiarowe próbek do próby rozciągania

Próbki wycinano z trzech kierunków anizotropowych. Próbę na rozciąganie przeprowadzono na maszynie INSTRON z maksymalnym obciążeniem 250 kN. Do badań ultradźwiękowych zastosowano aparat USIP-1 z głowicami K2G przy częstotliwości 2 MHz. Przy gęstości marmuru ok. 2730 g/cm^3 i prędkości fali ultradźwiękowej c_l i c_t dla fal podłużnych i poprzecznych można określić moduł sprężystości, E , moduł sztywności, G , i współczynnik Poissona, ν stosując wzory:

$$E = \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \rho c_\lambda^2, \quad G = \rho c_t^2, \quad \nu = \frac{(c_\lambda / c_t)^2 - 2}{2[(c_\lambda / c_t)^2 - 1]}$$

Próbki (typ 3, Rys. 2.1) poddano najpierw badaniom ultradźwiękowym. Pomiaru dokonano w dwóch punktach każdej próbki - w punkcie (1) wzdłuż kierunków równoległych do podłużnej osi każdej próbki i w punkcie (2) wzdłuż kierunków prostych do podstawy próbki. W wyniku pomiarów określono wartości E , G i ν . Porównawcze wyniki zawarto w Tablicy 2.1.

Tablica 2.1 Porównanie wartości elastycznych próbek cylindrycznych uzyskanych metodą ultradźwiękową i metodą rozciągania

Nr.	Pomiar	Badania nieniszczące					Badania niszczące		
		c_1 m/sek	c_2 m/sek	E GPa	G GPa	ν	E GPa	G GPa	ν
0202	1	3025,7	3368,2	78,7	30,9	0,270	79,5	31,3	0,27
	2	6038,4	3429,3	80,9	32,1	0,260			
	Śr.			79,8	31,5	0,265			
1201	1	6000,3	3409,7	80,0	31,7	0,260	81,0	32,0	0,26
	2	6001,6	3412,5	80,2	31,8	0,260			
	Śr.			80,1	31,8	0,265			
1202	1	5764,7	3164,7	70,0	27,3	0,280	73,1	28,9	0,26
	2	5587	3166,1	69,0	27,4	0,260			
	Śr.			69,5	27,4	0,270			
1203	1	5920	3305,1	75,8	29,8	0,280	76,2	30,1	0,26
	2	5863,6	3324,6	76,1	30,2	0,260			
	Śr.			76,0	30,2	0,265			
1206	1	6273,1	3384,5	80,7	31,2	0,290	82,3	32,4	0,27
	2	5805,4	3187,1	71,0	27,7	0,280			
	Śr.			72,4	28,3	0,280			
1213	1	5920	3250	73,8	28,8	0,280	72,3	28,5	0,27
	2	5805,4	3187,1	71,0	27,7	0,280			
	Śr.			72,4	28,3	0,280			
1303	1	5934,8	3258,1	74,2	29,0	0,280	74,0	29,1	0,27
	2	5846,9	3170,7	70,8	27,5	0,290			
	Śr.			72,5	28,3	0,285			

Wszystkie próbki wycięto z tej samej bryły marmuru. Powyższe eksperymenty wykazały dużą zgodność wyników uzyskanych próbą rozciągania i badaniem ultradźwiękowym, mieszczą się w granicach do 10%. Badania wykazały również, że wartości E i G są zdecydowanie wyższe wzdłuż kierunków równoległych do warstw marmuru niż wzdłuż kierunków prostopadłych. Odwrotnie jest w przypadku współczynnika Poissona ν .

Wyniki badań pokazują, że pomiary ultradźwiękowe starożytnych monumentów i rzeźb mogą być stosowane do określania ich własności mechanicznych. Znajomość tych własności jest pomocna do prac konserwatorskich.

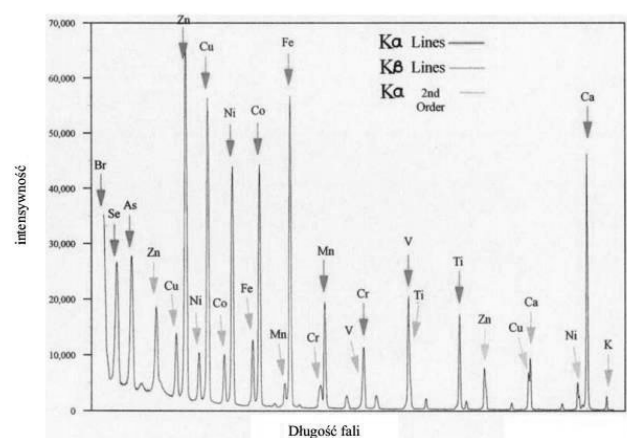
3. Badania metodą fluorescencji rentgenowskiej (XRF) [5]

3.1 Podstawy fizyczne

Do badania materiałów archeologicznych i historycznych stosuje się fluorescencję rentgenowską (X-ray fluorescence-XRF). Jest to system przenośny i może być stosowany do dowolnego obiektu stałego. System na szeroką skalę stosuje się od lat 70-tych XX wieku, gdy zastosowano detektory półprzewodnikowe chłodzone termoelektrycznie i skonstruowano miniaturową lampę rentgenowską.

Zasady fizyczne fluorescencji rentgenowskiej polegają na wtórnej emisji promieniowania rentgenowskiego (fluorescencji) z materii, która została wzbudzona za pomocą wysokoenergetycznego promieniowania rentgenowskiego lub gamma. Na skutek wybicia elektronów z wewnętrznych powłok atomu następuje wypełnienie powstałych luk przez

elektrony z wyższych powłok, a towarzyszy temu emisja nadmiaru promieniowania w postaci fotonu promieniowania rentgenowskiego. Każdy atom ma ściśle określone poziomy energetyczne dostępne do obsadzenia przez elektrony, więc możliwe energie emitowanych kwantów rentgenowskich są charakterystyczne dla tych atomów. Powstałe widmo pozwala na identyfikację pierwiastków znajdujących się w badanym materiale. Wyjaśnia to Rys. 3.1



Rysunek 3.1 Typowy wygląd widma fluoroscencyjnego

Wzbudzenie fluorescencji rentgenowskiej dokonywane jest przy użyciu miniaturowego aparatu rentgenowskiego z okienkiem berylowym o maksymalnym napięciu do 40 kV, prądzie 1 mA i mocy do 9 kW. Mogą też być stosowane źródła radioizotopowe: Cd-109, Fe-55, Am-241. Do rejestracji promieniowania fluorescencji rentgenowskiej stosuje się detektory półprzewodnikowe. Odpowiednia ka-

libracja spektrometru pozwala przejść od obserwowanych natężeń linii widmowych promieniowania charakterystycznego do koncentracji pierwiastków w badanym materiale. Ze względu na pochłanianie promieniowania rentgenowskiego o niskiej energii przez powietrze i okienko berylowe aparatu rentgenowskiego nie są wykrywane materiały lżejsze niż sód ($Z=11$).

Ze względu na pochłanianie w badanym materiale, tylko promieniowanie emitowane z pierwszych warstw pod powierzchnią (głębokość penetracji 0,01-0,1 mm) może być rejestrowane przez detektor. Generalnie powierzchnia badanego materiału nie musi być przygotowywana. Jeśli jednak powierzchnie materiałów archeologicznych wykazują duże zmiany i w składzie różnią się od pozostałej części materiału, pomiary ilościowe mogą wymagać starcia zmienionej powierzchni. W tym przypadku pomiaru nie można uważać jako ściśle nieniszczącego.

3.2 Zastosowania

Dane dotyczące składu chemicznego często stosowane są do badania materiałów historycznych i archeologicznych pod kątem ich pochodzenia i techniki wytwarzania. Pomagają na odróżnienie materiałów nie oryginalnych, a w szczęśliwych przypadkach na zidentyfikowanie fałszyfikatów. Rzadziej stosuje się to zjawisko w konserwacji.

Ceramika

Bliskie powiązania chemiczne między obiektem a surowcem, jak też jednorodność składu pierwiastków śladowych w złożu pozwalają w wielu przypadkach na dokładną identyfikację pochodzenia gliny. Badanie wykorzystywane jest do określania pochodzenia i dróg handlowych.

Stopy miedzi

W przeciwieństwie do ceramiki, metale nie utrzymują bliskiego powiązania między surowcem i stopem, ponadto mogą być przetopione. To generalnie wyklucza możliwość opartej na składzie chemicznym pochodzenia. Tym niemniej różnice w podstawowym składzie mogą się znacząco różnić w kontekście wytwarzania. Przykładowo części nie oryginalne mogą być zidentyfikowane w figurach, drzwiach i innych złożonych obiektach. W połączeniu z technikami mikrostrukturalnymi, zasadnicze analizy mogą dostarczać informacje o technologii wytwarzania, szczególnie w przypadku odlewania, lutowania i napraw.

Szkło

Podobnie jak w przypadku metali, skład szkła nie może być jednoznacznie odniesiony do pochodzenia, gdyż szkło poddawane było recyklingowi. Jednak podstawowe analizy mogą dostarczać ważne informacje o technologii wytwarzania, ze szczególnym odniesieniem do zastosowania różnych topników-które z kolei mogą być powiązane z różnymi obszarami geograficznymi i okresami

historycznymi – barwnikami i substancjami zmętniającymi szkło.

Malowidła

Część materiałów używanych w malarstwie, jak płótno, drewno, klej, media wiążące, niektóre pigmenty czy lakiery są pochodzenia organicznego i dlatego nie nadają się do podstawowych analiz, za wyjątkiem pierwiastków śladowych. Natomiast inne ważne elementy, jak np. podkład i pigmenty są nieorganiczne i mogą być charakteryzowane drogą podstawowej analizy. Mając na uwadze świadomość i znaczenie ilościowych ustaleń należy brać pod uwagę, że: a) rozcieńczenie z innymi kolorami wyklucza możliwość ilościowych pomiarów składu podstawowych kolorów i b) trudno jest próbować wybrane warstwy w tak niejednorodnych materiałach. Proste jakościowe analizy są często wystarczające do identyfikacji pigmentów. Pigment może być zidentyfikowany przez jednego lub dwóch charakterystycznych pierwiastków.

Istotną zaletą opisywanej metody jest możliwość badania obiektów stacjonarnych. Czułość przenośnej aparatury jest gorsza niż laboratoryjnej, musi być jednak na tyle wysoka, aby badanie miało sens.

4. Badanie termograficzne w podczerwieni (IRT) [6]

Stare, historyczne budowle, głównie kościoły, wykonywane z cegieł i kamienia posiadały elewacje w postaci tynków, często pokrytych freskami lub płytkami. Elewacje z czasem ulegają różnym uszkodzeniom, spowodowanym najczęściej wilgocią i wymagają konserwacji. Występujące zwykle uszkodzenia to pustki, rozwarstwienia, pęknięcia, rozpad materiału, odrywanie się płytek lub fresków od podłoża. Uszkodzenia należy wykrywać jak najwcześniej, aby rozpocząć konserwację i unikać większych uszkodzeń. Wykrywanie uszkodzeń zawsze należy rozpoczynać od badania wizualnego. Stosowano też metodę opukiwania, monitorowania pęknięć, technikę światłowodową czy tensometrię laserową, które dawały tylko informacje lokalne. Coraz częściej i z dobrym skutkiem stosuje się badanie termograficzne w podczerwieni. Istotą tego badania jest analiza termicznej odpowiedzi materiału na stymulację zewnętrznym źródłem energii. W tej odpowiedzi zawierają się informacje o nieciągłościach, których właściwości termiczne różnią się od właściwości badanego materiału. Jeśli do powierzchni materiału doprowadzimy pewną ilość energii, przykładowo w postaci impulsu cieplnego, to po jego wygaśnięciu temperatura powierzchni będzie się zmieniać. Dzięki dyfuzji ciepła, front termiczny przesuwa się w głąb materiału. Obecność obszarów różniących się właściwościami termicznymi (zawierających nieciągłości) od obszarów jednorodnych wywołuje zmianę szybkości tej dyfuzji. Zatem monitorując pole temperatury na powierzchni stygnącej próbki, mamy możliwość uwidocznienia głębokości zalegania owych nieciągłości.

Przedmioty pod wpływem impulsu cieplnego emitują promieniowanie elektromagnetyczne, które rejestrowane

jest przez detektor termograficzny. Widmo promieniowania elektromagnetycznego można umownie podzielić na kilka zakresów długości. Jednym z nich jest zakres promieniowania podczerwonego (od 0,75 do 100 μm). Jest to promieniowanie niewidzialne. Moc promieniowania elektromagnetycznego emitowanego przez powierzchnię danego ciała, w całym spektralnym zakresie, zależy od temperatury tej powierzchni, a maksymalna promieniowana moc, dla temperatury od kilku do kilku tysięcy kelwinów, zawiera się w podczerwieni. Znając zależność mocy promieniowania od temperatury emitującej powierzchni oraz zależność sygnału na wyjściu detektora od tej mocy, można w sposób bezkontaktowy wyznaczyć temperaturę badanej powierzchni.

Jeśli w badaniu nie stosuje się dodatkowej stymulacji cieplnej (oświetlenie naturalne), mamy do czynienia z termografią pasywną (bierną). Przy aktywnej termografii podczerwieni badany materiał jest nagrzewany przy użyciu sztucznych źródeł ciepła.

Badanie termograficzne w podczerwieni może być stosowane do badania dużych powierzchni w krótkim czasie i przy niskich kosztach. Ilościowe użycie IRT pozwala na skuteczne badanie zniszczeń i identyfikację przyczyn osłabienia materiału. Mogą być analizowane różne obiekty i formy zniszczeń. Przykładowo można wykrywać:

- rozwarstwienia, co jest szczególnie ważne dla tynków pokrytych freskami;
- odrywanie się płytek i fresków od podłoża;
- pustki, wtrącenia;
- pęknięcia;
- nagromadzenie wilgoci;
- rodzaj materiału ukrytego pod tynkiem-przydatne do analizy strukturalnej.

Czasem wyniki badań zależą od badanej objętości, która jest typowa dla każdej metody. Głębokość badanej warstwy w dużym stopniu zależy od termicznych właściwości materiału i zwykle nie przekracza kilku centymetrów.

Istotnym elementem badania termograficznego jest znalezienie wiarygodnej procedury badania i algorytmu procesu zdolnego przetwarzać rozkład temperatury powierzchni lub jej zmian w czasie na szukane informacje, tj. identyfikację, lokalizację i charakteryzowanie tego, co wstępnie może być uznane za wadę badanego elementu.

Przykład zastosowania termografii pasywnej

Zastosowano naturalne źródło światła. Rys. 4.1 po lewej pokazuje wnętrze zabytkowego budynku służącego jako szkoła, a po prawej termogram tego samego miejsca. Ujawnił się poprzedni układ budynku. Pod oknem znajdował się otwór później zamurowany, zaznaczony na fotografii. Widoczny jest na termogramie duży zimny obszar wskazujący na parowanie wody z nieszczelnej pękniętej rury oraz różny kształt cegieł użytych do wypełnienia otworu pod obecnym oknem (zaznaczony na fotografii czerwonymi kropkowymi liniami). Widoczny jest regularny wzór bloków kamiennych ściany.

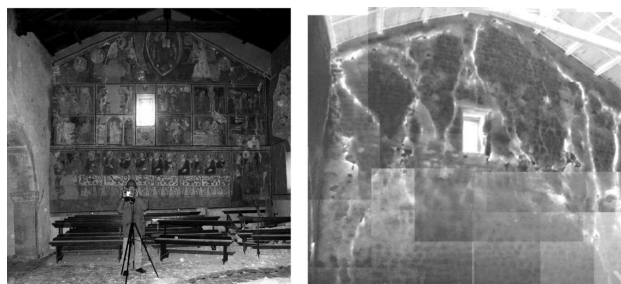


Rysunek 4.1 Fotografia i termogram wnętrza budynku

Przykład zastosowania termografii aktywnej

Powierzchnię obiektu poddano działaniu lampy, pistoletu powietrznego i urządzenia powodującego wibrację. Temperaturę pobudzonej powierzchni mierzono metodą termografii podczerwieni. Obiektem badanym był kościół S.Lucia (Rocca di Cambio, AQ, Włochy) a badanie wykonano kilka dni po trzęsieniu ziemi w kwietniu 2009 r. Rys. 4.2 pokazuje część dużego fresku (setki m^2) badanego celem podjęcia natychmiastowej decyzji, czy usunąć go ze ściany. Przeglądu dokonano w ciągu jednego dnia. Powietrze w pomieszczeniu ogrzewano propanową dmuchawą (moc 25 kW, wydajność 900 m^3/h). Uzyskano 220 termogramów.

Jaśniejsze obszary ujawniają uszkodzone strefy, a co ważniejsze, ciepłe powietrze czyni cieplejszymi niż normalnie obszary dotknięte przez pęknięcia strukturalne. Wzory pęknięć i słabsze punkty wskazane przez termografię dały podstawę do podjęcia decyzji o pilnym podparciu całej ściany aby zapobiec jej zawaleniu.



Rysunek 4.2 Fresk zagrożony w wyniku trzęsienia ziemi. Fotografia i termogram pokazujący rozwarstwienia i pęknięcia strukturalne

Termografia w podczerwieni jest szeroko stosowana we współczesnym budownictwie. Typowym przykładem jest badanie niedoskonałości izolacji cieplnej ścian budynków.

Literatura

- [1] *Sprawozdanie z badań radiograficznych i radiografii cyfrowej obrazu Hansa Memlinga „Sąd Ostateczny” z Muzeum Narodowego w Gdańsku.* Piotr Frączek, Michał Obarzanowski. Laboratorium Analiz i Nieniszczących Badań Obiektów Zabytkowych. Muzeum Narodowe w Krakowie.
- [2] *Leading X-ray technologies for NDT.* Ron Pincu, Ofra Kleinberger. Vidisco Ltd. Art 2011.

- [3] *X-ray and neutron radiological methods to support the conservation of wooden artworks soaked with a polluting impregnant "Carbolineum"* Kurt R. S. OSTERLOH, Amelie NUSSER ECNDT 2014
- [4] *Marble monuments examining using the NDT method of ultrasounds*. I.N. Prassianakis, S.K. Kourkoulis, I. Vardoulakis. National Technical University of Athens. WCNDT 2000.
- [5] – *Fluorescencja rentgenowska (XRF)*. Marta Kasprzyk. Wikipedia.
– *XRF Spectrometers for Non-Destructive Investigations in Art and Archaeology: the Cost of Portability*. Claudio Caneva, Marco Ferretti. WCNDT 2000.
- [6] – *Termografia podczerwieni w nieniszczących badaniach materiałów i urządzeń*. Wiera Oliferuk. Wydawnictwo Biuro Gamma, 2008
– *IR Thermography Applied to the Cultural Heritage Conservation*. Ermanno Grinzato. WCNDT 2012
– *Characterisation of Historic Facades using Active Thermography with Solar Heating and Optical Methods*. Christiane Maierhofer, Mathias Rölling, Henrik Steinfurth, Sven Augustin, Rüdiger Mecke, Michael Schiller, Alexa Kernchen, Uwe Kalisch, Jeannine Meinhardt, Christiane Hennen, Ernst Thomas Groll, Torsten Arnold. WCNDT 2016

UPRAWNIENIA ENERGETYCZNE

Egzaminy eksploatacja i dozór

Grupa 1 - pkt 2, 3, 4, 7, 9 i 10

Grupa 2 - pkt 2, 4, 5, 6, 7 i 10

Grupa 3 - pkt 6, 7 i 10

Kontakt w sprawie egzaminu:

Biuro Oddziału Warszawskiego SIMP

pon. - pt. 10:00 - 16:00 tel. 22 827 02 44

Adam BARYŁKA tel. 605 660 292

Robert NIWIŃSKI tel. 601 355 403

Dostępne materiały szkoleniowe:



Komisja Egzaminacyjna nr 614 przy Oddziale Warszawskim Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Mechaników Polskich
www.ow-simp.pl/uprawnienia.html