

## **Wykorzystanie technik termowizyjnych i radiacyjnych w badaniach i konserwacji dzieł sztuki**

Dr inż. Jan Perkowski

Międzyresortowy Instytut Techniki Radiacyjnej, Politechnika Łódzka, ul. Wróblewskiego 15, 93-590 Łódź. tel: 042 6313181, fax: 042 6840043, e-mail:japerepi@mitr.p.lodz.pl

Dr. hab. inż. Bogusław Więcek

Instytut Elektroniki, Politechnika Łódzka, 90-924 Łódź, ul. Wólczańska 211/215, email: wiecek@p.lodz.pl

Rozwój cywilizacji to z jednej strony coraz większe zanieczyszczenie środowiska powodujące wiele zagrożeń i zniszczeń, z drugiej to rozwój nowoczesnych metod przeciwdziałania oraz usuwania zaistniałych skutków. Te właśnie zagadnienia w pełnej skali występują w problematyce przechowywania i konserwacji różnorodnych dzieł sztuki. Związane jest ono przede wszystkim z profilaktyką, czyli stosowaniem właściwych warunków przechowywania i wystawiennictwa dzieł sztuki oraz koniecznością badania obiektów aby w sposób obiektywny ustalić stan zabytku oraz ewentualnie ustalić czas i metodę jego konserwacji.

### ***Nowoczesne metody badania obiektów zabytkowych***

Dawniej badania obiektów zabytkowych ograniczały się do oglądu widocznych na powierzchni zmian i subiektywnej ich oceny. Rozwój fizyki i chemii pozwolił na opracowanie różnego typu metod analitycznych dających odpowiedź co do składu, struktury i rozkładu przestrzennego materiałów z których jest on wykonany.

W obecnej chwili konserwator zabytków i badacz dzieł sztuki dysponuje całym arsenałem tradycyjnych i nowoczesnych metod. Są wśród nich analizy chemiczne, fizyczne i fizykochemiczne. Od klasycznego chemicznego określania składu do wysoce specjalistycznych analiz mikrośladowych wymagających bardzo drogiej aparatury. Jednak cały czas trwają badania nad opracowaniem dokładnych i nieniszczących metod badania dzieł sztuki. Chodzi o to by do analizy nie trzeba było pobierać jakichkolwiek próbek z badanego obiektu lub by jej ilość była minimalna. Największe nadzieje wiąże się z nieniszczącymi metodami bezstykowymi do których należą:

1. rentgenografia i tomografia komputerowa,
2. termowizja,
3. sonografia.

Dwie pierwsze w swym działaniu wykorzystują fale elektromagnetyczne o różnej długości natomiast trzecia fale dźwiękowe.

### ***Metody rentgenowskie***

Największe osiągnięcia na obecna chwilę odnotowuje technika rentgenowska, a zwłaszcza jej najnowsza modyfikacja tomografia komputerowa. Metoda ta pozwala bardzo dokładnie wnikać w strukturę dzieła sztuki i zbadać poszczególne jego warstwy. Trzeba pamiętać jednak o jej wadach. Promieniowanie jonizujące (jakim jest promieniowanie rentgenowskie) powoduje zmiany chemiczne i fizyczne w prześwietlanym materiale i choć w trakcie

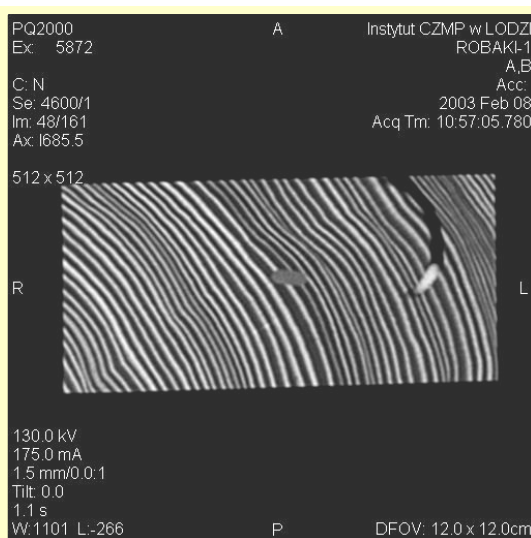
pojedynczej analizy stosowane dawki promieniowania są niewielkie dzięki czemu zmiany są praktycznie niezauważalne to jednak częste stosowanie tej techniki lub długotrwałe analizy mogą doprowadzić do niekorzystnych zmian w materiale dzieła sztuki. Problemem jest też koszt aparatury i analizy oraz konieczność przestrzegania rygorystycznych zasad bezpieczeństwa pracy.

Zastosowanie technik rentgenowskich w badaniu dzieł sztuki jest bardzo szerokie. Jednym z najczęściej podawanych jest wykrywanie przemalowań obrazów [1]. Badania zakażeń biologicznych są względnie nowym zagadnieniem. W Polsce było ono wnikliwie badane i opisane przez Krajewskiego i współpracowników [2]. W ramach tych badań wykonano po raz pierwszy w naszym kraju zdjęcia rentgenowskie larw spuszczela pospolitego w drewnie sosny o grubości 2 cm. Zdjęcia nie pozwoliły jednoznacznie stwierdzić ile i które larwy były żywe. Jakość zdjęć rentgenowskich drewna o dużej grubości, silnie stoczonego przez owady nie była zbyt dobra. Uzyskiwane obrazy były konsekwencją nakładania się widoku poszczególnych warstw drewna. Gęsta sieć chodników zawierających zbitą mączkę z drewna może utrudniać lub wręcz uniemożliwiać rozróżnienie poszczególnych żerowisk.

Tomografia komputerowa jest metodą cyfrowej obróbki sygnału, czyli jego przetworzeniem w celu uzyskania obrazu badanego obiektu. W ramach tomografii występują: rentgenowska tomografia komputerowa, tomografia komputerowa rezonansu magnetycznego oraz tomografia komputerowa wykorzystująca fale dźwiękowe.

Rentgenowska tomografia komputerowa jest metoda badania radiologicznego odznaczającą się bardzo dużą rozdzielczością. Pozwala uzyskiwać obrazy przekrojów poprzecznych ciał o odmiennych właściwościach występujących w badanym obiekcie.

W metodzie tej wiązka promieni rentgenowskich, których źródło obraca się wokół badanego obiektu przenika przezeń. Promieniowanie, które nie zostało całkowicie pochłonięte zostaje zarejestrowane przez detektory znajdujące się na pierścieniu otaczającym obiekt. Programy matematycznej obróbki zarejestrowanego sygnału pozwalają stworzyć obrazy pochłaniania promieniowania X w wielu płaszczyznach. W ten sposób powstają zdjęcia warstwowe tzw. tomogramy dające obraz danego obiektu na wybranej głębokości i pozwalające określić dokładnie jego strukturę.



Rys.1 Obraz uzyskany metodą tomografii komputerowej larwy spuszczela w drewnianej deseczce (przekrój poprzeczny)

Pierwsze w kraju badania tą techniką i detekcja żywych larw owadów zawartych w drewnie zostały wykonane przy współpracy trzech jednostek Politechniki Łódzkiej, Centrum

Zdrowia Matki Polki w Łodzi oraz SGGW w Warszawie [3,4]. Uzyskano bardzo precyzyjne zdjęcia larw żerujących w drewnie oraz ich chodników, w tym zarówno pełnych jak i wypełnionych mączką drzewną i odchodami. Wykrywalność larw jest 100% oraz można określić, które larwy są żywe. Wykonując zdjęcia w poprzek włókien uwidaczniają się bardzo dokładnie poszczególne przyrosty roczne z rozróżnieniem drewna wczesnego i późnego.

### *Metody termowizyjne*

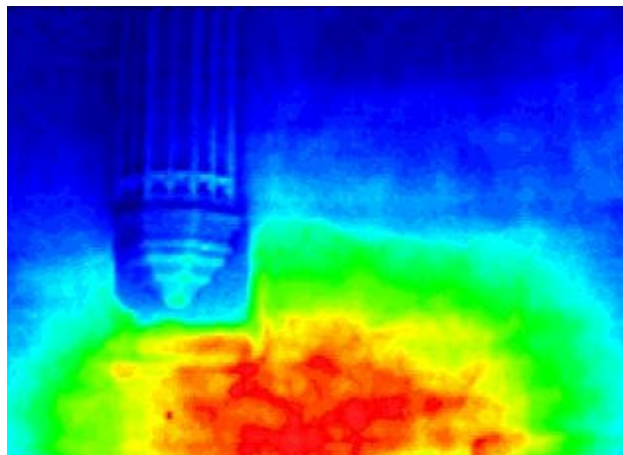
Obecnie poszukuje się nowych, nieinwazyjnych metod badań obiektów zabytkowych, które są bezpieczne, zarówno dla badanych przedmiotów jak i dla otaczającego środowiska, w tym także dla personelu obsługującego aparaturę badawczą. Do takich metod należy metoda termowizyjna wykorzystująca promieniowanie podczerwone (nie powodujące jonizacji). Na razie uzyskiwane efekty nie zapewniają tak dobrych wyników jak techniki rentgenowskie. Przy dalszym szybkim rozwoju można liczyć na szersze jej zastosowanie w badaniu obiektów zabytkowych [5-22].

Termowizja to metoda pomiaru natężenia promieniowania podczerwonego w zakresie 3-5 $\mu\text{m}$  (SWIR – termowizja krótkofalowa) lub 8-12 $\mu\text{m}$  (LWIR – termowizja długofalowa), w sposób bezstykowy i nieinwazyjny za pomocą kamery termowizyjnej. Promieniowanie zależy od temperatury badanego obiektu, co oznacza, że w sposób pośredni termowizja może być wykorzystywana do oceny stanu cieplnego badanej struktury, w tym do określenia wartości temperatury. Duży wpływ na pomiar termowizyjny ma stan badanej powierzchni, w tym głównie jej chropowatość. W technikach termowizyjnych niezbędna jest znajomość emisyjności badanego obiektu, której wartość zmienia się w zakresie 0-1 i która określa zdolność badanej powierzchni do emisji promieniowania przy uwzględnieniu stanu powierzchni (chropowatości), rodzaju materiału z jakiego jest wykonana, oraz długości fali promieniowania w jakim działa aparatura termowizyjna. Im większa wartość współczynnika emisyjności, tym więcej energii emituje badany obiekt i tym bardziej kontrastowy jest obraz termowizyjny. W konsekwencji do kamery dociera więcej informacji, która może być wykorzystana w badaniach konserwacyjnych. Czułość współczesnej kamery termowizyjnej wynosi 0,1K, co oznacza, że można rozróżnić punkty obrazu, których temperatura różni się o 0,1K. Nie jest to równoważne z dużą dokładnością sprzętu termowizyjnego. Błąd pomiaru temperatury za pomocą kamery termowizyjnej osiąga typowa wartość 2%, co przy zakresie pracy kamery, np. 20-100°C, oznacza błąd na poziomie 4°C. Na szczęście, w badaniach obiektów zabytkowych bezwzględna wartość temperatury nie jest tak istotna. Bardziej użyteczna jest różnica temperatury między wybranymi obszarami obrazu (regionami zainteresowania), a ta wynika nie z dokładności aparatury, lecz z jej czułości.

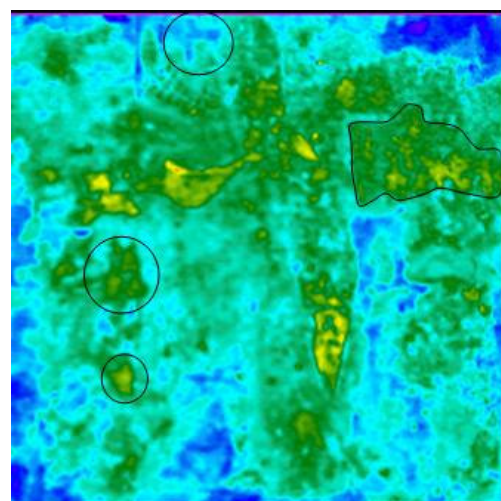
Zastosowania termowizji w badaniach obiektów zabytkowych są coraz szersze, a rozpoczęły się od badań obiektów architektonicznych [22]. Pierwsze udokumentowane badania termowizyjne dotyczyły wykrywania przemurowań, identyfikacji wątku ceglanoego pod tynkiem oraz prób poszukiwań malowideł ukrytych pod zewnętrzną warstwą tynku. Prace prowadzono w Kościele NMP na Zamku Wyższym w Malborku [22]. Zastosowano dwa alternatywne podejścia badawcze, tzw. termowizji pasywnej i aktywnej. Metoda termowizji pasywnej (statycznej) polega na pomiarze własnego promieniowania obiektu, które jest zróżnicowane z powodu zarówno różnej wartości temperatury jak i emisyjności badanej powierzchni. Termografia aktywna, czasem zwana synchroniczną lub dynamiczną, polega na dostarczeniu do badanego obiektu energii w postaci impulsów cieplnych (fali cieplnej), które ogrzewają strukturę na powierzchni i na niewielkiej głębokości. Ciepło rozchodzi się w badanym obiekcie zależnie od struktury materiałowej oraz właściwości termicznych. Metale lepiej przewodzą ciepło i fala cieplna wnika głębiej, podczas gdy drewno lub cegła stanowią przeszkodę dla przepływu energii. Efekty różnego przenoszenia energii cieplnej widoczne są

na powierzchni w postaci „wzoru” termicznego uzależnionego od wewnętrznej struktury badanego obiektu. Niewielka głębokość wnikania ciepła w typowych obiektach architektonicznych istotnie ogranicza możliwość penetracji cieplnej badanej struktury. Z praktyki badań termowizyjnych z zastosowaniem metody fali cieplnej wynika, że przy użyciu termowizji aktywnej można badać warstwy przypowierzchniowe na głębokości co najwyżej kilku mm. Większe możliwości aplikacyjne może ta metoda znaleźć przy badaniach obrazów i malowideł z udziałem materiałów wykorzystujących metale. Często spotyka się na obrazach dodatkowe elementy, np. złote ozdoby przykryte zewnętrzną warstwą malarską. W cennych malowidłach niektóre warstwy malarskie wykonane są za pomocą farb opartych na metalach, np. ołowiu lub cynku. Takie warstwy można identyfikować za pomocą metody termografii aktywnej.

Przykłady zastosowań termowizji pasywnej i aktywnej przedstawiono na przykładach badań wykonanych w ramach projektu badawczego realizowanego przez Politechnikę Łódzką i Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu [22], który dotyczył Zamku Wyższego w Malborku, w tym Kościoła NMP i kapitulacza, które usytuowane są w bliskim sąsiedztwie. Na rys. 2 przedstawiono przemiarowanie na jednej ze ścian kapitulacza, gdzie widoczny obszar o wyższej temperaturze jest fragmentem nowym, który posiada inne właściwości termiczne i emisyjne w porównaniu z jego otoczeniem. Badanie wykonano stosując metodę termografii pasywnej – statycznej.

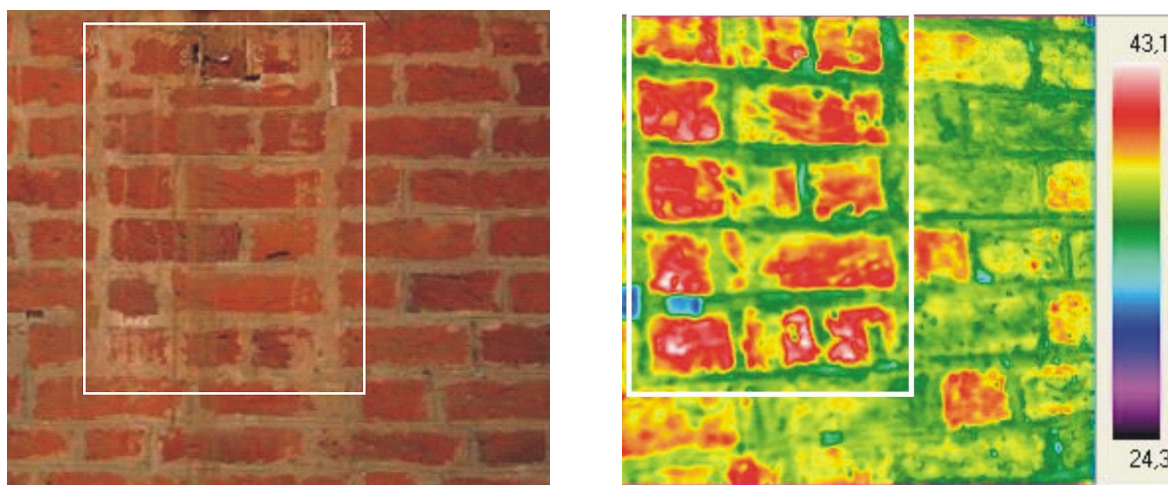


Rys. 2. Przemiarowanie z kapitulacza na zamku w Malborku



Rys. 3. Kościół NMP w Toruniu, fotografia w zakresie widzialnym i podczerwieni. Zaznaczono miejsca odpowiadające charakterystycznym obszarom widocznym na termogramie a niewidocznym w świetle widzialnym

Termogramy dostarczają dodatkowej informacji, która może być wykorzystana przy interpretacji dzieła zabytkowego. Charakterystyczne obszary „widziane” w podczerwieni (rys.3) niosą informację o innych właściwościach fizyko-chemicznych, w tym o składzie chemicznym warstwy zewnętrznej. Różny skład chemiczny powoduje, że właściwości termiczne materiału są różne. Zmienia się dyfuzyjność warstwy malarskiej lub tynku, co może być uwidocznione na termogramach. Często warstwy te mają różne właściwości promienne (emisyjność), co jest konsekwencją innego stanu powierzchni i różnej chropowatości materiałów.

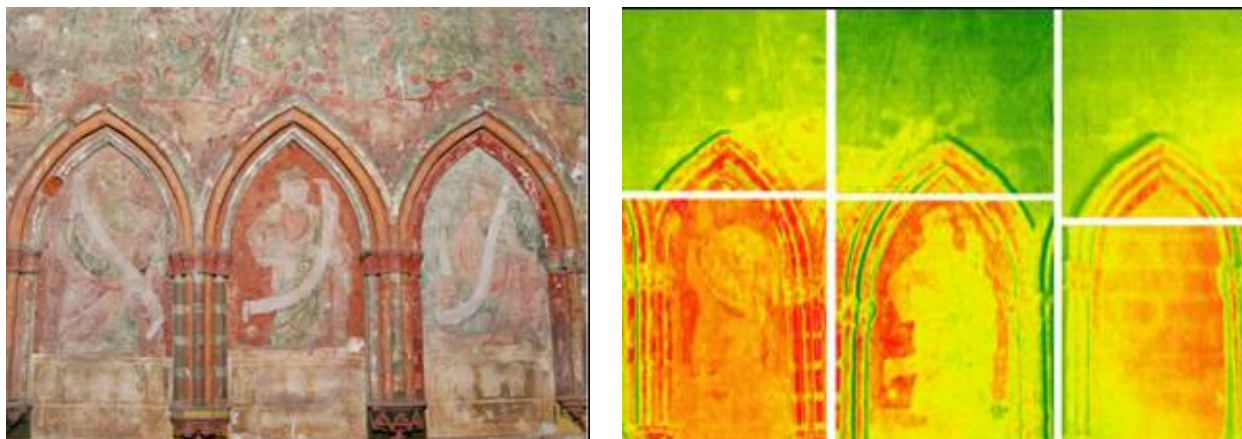


Rys. 4. Kościół NMP w Malborku, przemurowanie z okresu średniowiecza zarejestrowane kamerą termowizyjną

Kamera termowizyjna może być zastosowana do datowania fragmentów zabytku. Na rys.4. przedstawiono przemurowanie średniowieczne, które wyraźnie odróżnia się od pozostałej części muru. Wykorzystano tu inne właściwości refleksyjne w zakresie podczerwieni (8-12 $\mu$ m) cegieł wykonanych w różnym okresie.

Na rys. 5 przedstawiono wążek ceglany ukryty pod tynkiem i średniowiecznym malowidłem. Grubość tynku wynosi kilka mm., a zastosowana metoda to termowizja pasywna, całkowicie nieinwazyjna i bezdotykowa. Zobrazowanie tego typu można wykonać z dużej odległości, często w części obiektu, która jest niedostępna. Badanie jest szybkie i polega na komputerowej rejestracji kilku obrazów, które potem należy opracować przy użyciu narzędzi komputerowych.

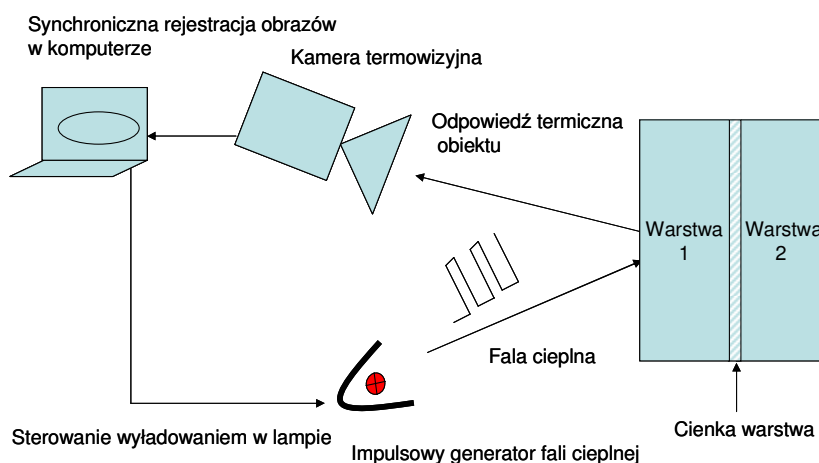




Rys. 5. Kościół NMP w Malborku, przemiarowanie z okresu średniowiecza zarejestrowane kamerą termowizyjną

Zgodnie z wcześniej przedstawioną koncepcją termowizji aktywnej, do badanego obiektu należy dostarczyć energii zmiennej w czasie – w formie pojedynczego impulsu, ciągu impulsów lub periodycznie zmieniającego się pobudzenia (rys. 6). Źródłem zmiennej w czasie energii może być lampa na podczerwień o bardzo wysokiej mocy.

W ramach wspólnych badawczych Instytutu Elektroniki Politechniki Łódzkiej i Instytutu Zabytkoznawstwa i Konserwatorstwa, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu, wykonano multispektralny system komputerowy do badań optycznych i termicznych obiektów zabytkowych (rys. 7) [22]. System służy zarówno do badań w zakresie termografii pasywnej jak i aktywnej, oraz w trzech pasmach światła widzialnego System pozwala na badania obiektów w zakresie światła widzialnego podzielonego na trzy podpasma (R, G, B), w zakresie bliskiej podczerwieni (NIR – 0,9 $\mu$ m) oraz podczerwieni LWIR (8-12 $\mu$ m). System umożliwia badania statyczne i dynamiczne. Do systemu podłączony jest sterowany komputerem optyczny generator promieniowania podczerwonego o wysokiej mocy (4kW) do badań za pomocą termografii aktywnej.

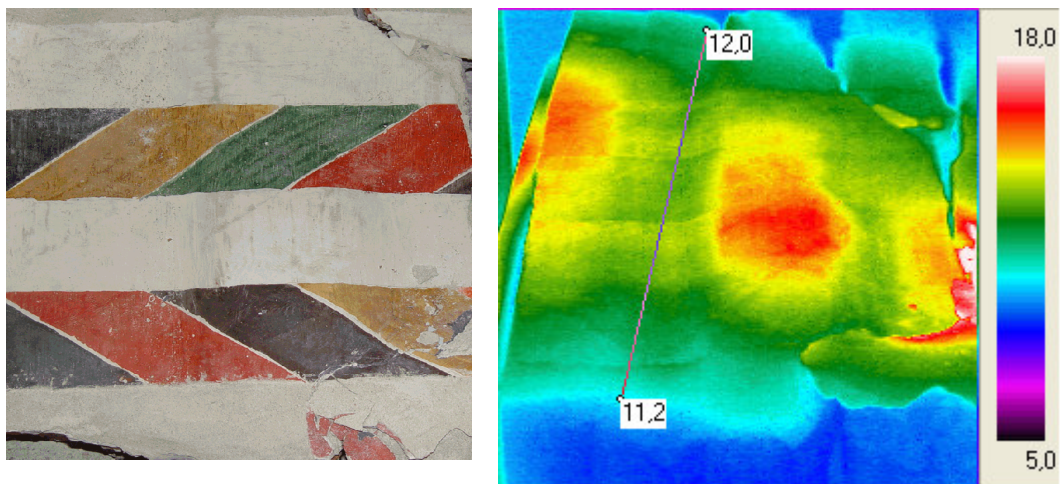


Rys. 6. Istota metody fali cieplnej



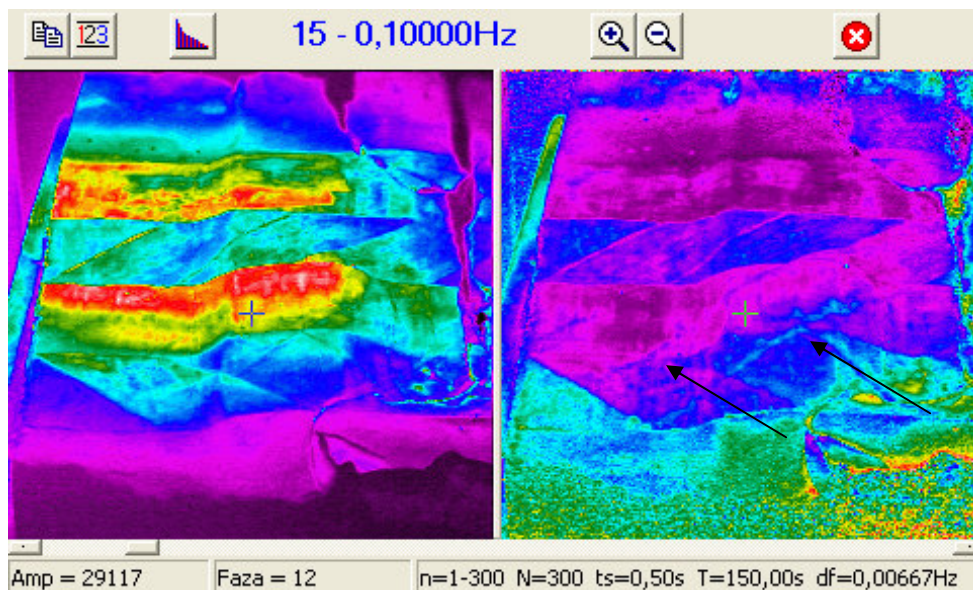
Rys. 7. System termowizyjny do statycznych i dynamicznych badań obiektów zabytkowych

Nowe możliwości zastosowania termografii w badaniach zabytków niesie termografia aktywna, wspomagana analizą częstotliwościową (rys. 8-9). Jako przykład zastosowania metody fali cieplnej w badaniach obiektów architektonicznych przedstawiono badania modelu muru średniowiecznego wykonanego z materiałów z zamku w Malborku [18]. Badania przeprowadzono dostarczając do badanego obiektu energię w postaci promieniowania o częstotliwości ok.  $f=0,1\text{Hz}$ . Zarejestrowano 300 obrazów z okresem  $T=0,5\text{s}$  i poddano je analizie częstotliwościowej. Jedną z metod analizy sekwencji termogramów uzyskanych przy periodycznym pobudzeniu badanego obiektu jest analiza częstotliwościowa. Dla każdego ciągu obrazów uzyskuje się obraz amplitudy i fazy dla wybranej składowej częstotliwości widma sygnału. W każdym punkcie obrazu można wyznaczyć sygnały harmoniczne, w tym wartość amplitudy i fazy dla częstotliwości równej częstotliwości pobudzenia energetycznego  $f=0,1\text{Hz}$  (rys. 8-9). Wyniki pokazały, że można „zajrzeć” do wnętrza struktury i zobaczyć warstwy ukryte pod zewnętrzną powłoką malarską lub tynkiem.



Rys. 8. Obraz optyczny modelu muru, pojedyncza klatka z sekwencji termograficznej 300 obrazów z linią, wzdłuż której wyznaczany jest rozkład temperatury

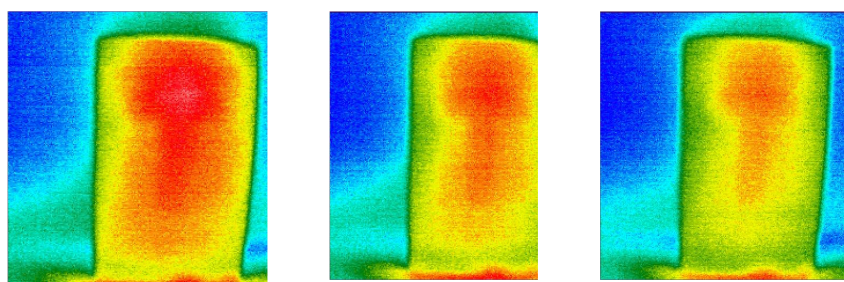




Rys. 9. Wynik analizy częstotliwościowej,  $f = 0,1\text{Hz}$ , 15-ta harmoniczna (amplituda po prawej, faza po lewej stronie)

Podjęto próbę zastosowania termografii dynamicznej do analizy przemalowań na powierzchni obiektów drewnianych. Celem sprawdzenia możliwości wykorzystania technik termowizyjnych do analizy przemalowań przeprowadzono badania na obiektach modelowych. Na deski nakładano podkład klejowo wapienny, a po jego wyschnięciu na deskach malowano literę T (rys. 10). Stosowano różne rodzaje farb: akrylową, olejną, akwarele i temperę. Tak przygotowane próbki po wyschnięciu dokładnie zamalowywano olejną lub akrylową farbą maskującą. Suche deseczki poddawano analizie metodą aktywnej termografii. Na powierzchnię deseczki (gdzie został zamalowana litera T) kierowano strumień ciepły z generatora, a następnie zapisywano sekwencję obrazów w czasie stygnięcia. Doświadczenia miały na celu ustalenie czy zamalowane powierzchnie pobudzone termicznie objawiają swoją obecność na powierzchni badanego obiektu.

Pozytywne rezultaty uzyskano jedynie gdy litera T była namalowana farbą olejną (czarną, czerwoną lub żółtą) i została przykryta białą farbą akrylową. Uzyskane termogramy wykazują istnienie namalowanego na desce znaku rozpoznawczego (rys. 10). Farba olejna dzięki swojej większej emisyjności jest bardziej widoczna dla kamery termowizyjnej niż farba akrylowa. Rodzaj koloru (użytego pigmentu) wpływa na mniejszą lub większą wykrywalność zamalowanego znaku. Farba olejna tworzy warstwę gładką, jakoby polerowaną, świecąca, a farba akrylowa czy akwarela – warstwę chropowatą, bardziej matową. Na uzyskane termogramy miał wpływ współczynnik emisyjności poszczególnych warstw, tworzących strukturę badanego modelu.



Rys. 10. Obraz termowizyjny stygnięcia drewna gdy literę T namalowano farbą olejną a następnie powierzchnie zamalowano farbą akrylową.



## ***Sonografia***

Wykorzystanie fal dźwiękowych i różnic w ich rozchodzenia się w różnych ośrodkach i przy przechodzeniu pomiędzy nimi są podstawą budowy różnego typu aparatury określającej strukturę badanego obiektu. Podobnie jak w przypadku badań termowizyjnych, możliwe są badania przy wykorzystaniu fali zewnętrznej dostarczonej do badanego obiektu, lub wykorzystując falę głosową pochodzącą z wnętrza obiektu, np. generowaną przez larwę żerującego owada.

W Polsce podejmowane były próby wykorzystania tej techniki w odniesieniu do obiektów zabytkowych. W pracy Mańkowskiej i Pietrusińskiej [23] zastosowano typowy układ wykorzystywany w medycynie w do zbadania struktury obrazu namalowanego na drewnie (drewnianego podobrazia)

Jednym z większych problemów właściwego metodzie właściwego zewnętrznym źródłem fali akustycznej jest zapewnienie właściwego wprowadzenia fali do badanego obiektu. Stosowane w medycynie substancje nie nadają się do badania dzieł sztuki gdyż pozostawiają trwałe ślady.

W przypadku wykrywania larw owadów w drewnianych obiektach zabytkowych najważniejsze jest właściwa lokalizacja sond pomiarowych. Możliwe jest stworzenie dwu lub trójwymiarowej mapy impedancji falowej dla ośrodka propagującego falę głosową. Poprzez rekonstrukcję (odtworzenie) parametrów propagacyjnych materiału na podstawie pomiaru natężenia fali w wybranych punktach struktury (punktach brzegowych) można zlokalizować źródło fali. Aby tego dokonać należy w procesie rekonstrukcji zidentyfikować parametry modelu rozchodzenia się fali z ośrodka. W ogólnym przypadku nie jest to proste ze względu na bardzo złożony charakter propagacji fal w drewnie i nieznajomości rozkładu parametrów struktury. Można w tym przypadku zastosować modele niefizyczne oparte np. na sieciach neuronowych, które „nauczona” przy pomocy testowych struktur pozwolą z dużym prawdopodobieństwem zlokalizować szkodnika. Precyzyjne zlokalizowanie owada zapewni jego unieszkodliwienie przy użyciu niewielkiej energii cieplnej lub elektromagnetycznej dostarczonej punktowo do obiektu.

Wydaje się, że niewielka liczba prac nad możliwością wykorzystania fal dźwiękowych w badaniach tego typu obiektów wynika przede wszystkim z kwestii finansowych. Kosztowne prace i budowa bardzo specyficznej aparatury związana z niewielkim rynkiem odbiorców nie zapewnia właściwej ekonomiki. Jednak należy sądzić, że ogólny postęp prac i rozwój tej techniki stworzy także możliwości dla bardzo specyficznego jej zastosowanie w badaniu obiektów zabytkowych już w niedługiej przyszłości.

## ***Konserwacja obiektów zabytkowych***

Według statystyk prowadzonych w Centralnym Muzeum Bahemia w Rožtokach (Czechy) około 60% cennych zbiorów wykonanych z drewna jest zaatakowanych przez różnego typu mikroorganizmy: grzyby, pleśnie i owady. Atakowane i niszczone są również tkaniny i wyroby ze skóry.

Stosowane dotychczas metody walki ze szkodnikami takie jak: malowanie, zanurzanie bądź spryskiwanie płynami typu insektycydy i fungicydy są mało efektywne ze względu na ograniczoną penetrację chemikaliów do wewnętrznych warstw obiektów. Lepsze efekty uzyskuje się poddając obiekty muzealne działaniu gazu (głównie tlenku etylenu). Wymaga to jednak stosowania wysokich ciśnień i konieczności budowania specjalnych komór

ciśnieniowych. Jest to niemożliwe do osiągnięcia w terenach o dużej gęstości zaludnienia ze względu na przepisy sanitarne.

Wykrycie zagrożeń w postaci zaatakowania dzieła sztuki przez różnego typu mikroorganizmy lub zniszczeń wymaga kolejnych działań, a mianowicie dokonania odpowiednich zabiegów konserwatorskich.

Likwidacja mikroorganizmów takich jak grzyby, owady i bakterie może być dokonana przy pomocy różnych metod: chemicznych, fizycznych czy też fizykochemicznych.

Do dziś dnia najbardziej rozpowszechnione są metody chemiczne. Stosowane są zarówno na drodze działań zewnętrznych jak i poprzez działanie wstępne w wyniku nasycania porowatych materiałów z których bywa wykonane dzieło sztuki (głównie drewno).

Podstawowe zalety to małe koszty i prostota użycia. Częstość środków te wykazują dużą selektywność i czas działania. Te ostatnie wymienione cechy mogą w zależności od potrzeb odgrywać pozytywną jak i negatywną rolę.

Metody chemicznej dezynfekcji choć najczęściej stosowane posiadają jednak szereg wad.

Skuteczne i efektywne środki chemiczne w stosunku do mikroorganizmów atakujących dzieła sztuki są na ogół także toksyczne dla otoczenia. Wymagają więc całkowitego usunięcia po zabiegu i pełnego unieszkodliwienia. W wielu przypadkach działają jedynie powierzchniowo, nie wnikając w głąb materiału i nie niszcząc znajdujących się tam mikroorganizmów.

Spośród metod fizycznych i fizykochemicznych na szczególną uwagę zasługują techniki radiacyjne [24-30].

### ***Radiacyjna dezynfekcja***

Wykorzystanie techniki radiacyjnej w muzealnictwie jest jedyną technologią radiacyjną nie podporządkowaną kryterium opłacalności ekonomicznej.

Promieniowanie jonizujące nie zagraża środowisku naturalnemu. Przykładowo, promieniowanie gamma pochodzące z Co-60 jest zdolne penetrować obiekty o grubości powyżej 1 m i niszczyć mikroorganizmy w całej napromieniowywanej objętości. Dawki od 250 do 500 Gy są wystarczające do zniszczenia większości szkodników w różnych stadiach rozwoju, a jednocześnie ta ilość zaabsorbowanej energii nie wywołuje żadnych niekorzystnych zmian w drewnie, polichromii, pokryciach olejnych i temperach, skórze, papierze i tekstyliach. W razie konieczności zabieg napromieniowania można powtarzać wielokrotnie bez skutków ujemnych dla konserwowanego obiektu. Niestety metoda choć skutecznie niszczy szkodniki nie zabezpiecza przed powtórny ich atakiem. Dlatego bezpośrednio po zabiegu powierzchnia obiektu musi zostać zabezpieczona chemicznie przez pokrycie insektycydem. Inną wersją procesu radiacyjnej konserwacji jest oprócz wykorzystania promieniowania do bezpośredniego niszczenia szkodników, połączenie tego efektu z jednoczesnym inicjowaniem polimeryzacji monomerem, którym wcześniej został nasycony obiekt (metoda radiacyjno – chemiczna). Tak wykonany zabieg zabezpiecza zbiory przed powtórny infekcją. Pozwala także zwiększyć wytrzymałość mechaniczną obiektu bez zmiany jego wyglądu zewnętrznego. Metoda radiacyjno – chemiczna konserwacji zabytków znalazła zastosowanie w Czechach. W latach 1976 – 1980 w centralnym Muzeum Bohemia w Roztokach koło Pragi wybudowano do tego celu specjalne urządzenie. Mieści się ono w piwnicach bezpośrednio na terenie muzeum i obejmuje pięć pomieszczeń o łącznej powierzchni 120 m<sup>2</sup>. Komora gdzie prowadzone jest napromieniowanie ma wymiary 4,5 x 4,5 x 3,6 m. Ściany o grubości 1,2 m oraz strop 1,25 m zapewniają pełną osłonność urządzenia, zaopatrzonego w źródła Co – 60 o aktywności 66 TBq. W centralnym punkcie komory pod podłogą umieszczony jest adaptowany ołowiany pojemnik KIZ 10000 z którego źródło

kobaltowe wraz z korkiem osłonowym wyprowadzane jest do pomieszczenia (pozycja robocza) za pomocą stalowej liny i mechanizmu krzywkowego napędzanego ręcznie. Wejście do komory zamykane jest stalowymi drzwiami o grubości 15 cm poruszonymi elektrycznie. Produkty radiolizy powietrza usuwane są przez odpowiedni system wentylacyjny. Duże i ciężkie obiekty muzealne wwożone są do komory na wózkach. Urządzenie pracuje od 1982 roku i napromieniowuje średnio rocznie 1850 obiektów różnej wielkości.

Wydaje się, że ta dziedzina zastosowania techniki radiacyjnej powinna być znacznie szerzej rozpropagowana, gdyż dzięki niej można zabezpieczyć dla przyszłych pokoleń wiele cennych zabytków.

Pierwsze doniesienia o bakteriobójczym działaniu promieniowania jonizującego miały miejsce na początku lat dwudziestych. Dopiero jednak w latach 60-tych powstały techniczne warunki w postaci dużych źródeł promieniowania, do praktycznego wykorzystaniem tego zjawiska.

Pomysł wykorzystania promieniowania jonizującego w muzealnictwie powstał około 30 lat temu i związany jest z trzema wymienionymi już wyżej ośrodkami.

W porównaniu z klasycznymi metodami chemicznymi (malowanie, nasączenie czy też zagazowywanie obiektu) lub nowszymi fizycznymi (ultradźwięki, promieniowanie podczerwone i ultrafioletowe) metoda radiacyjna posiada szereg zalet, a mianowicie:

1. niezawodność - dzięki przenikliwości promieniowania gamma żadna część napromieniowywanego obiektu nie pozostaje poza jego zasięgiem.
2. uniwersalność - zabiegowi można poddać obiekt zbudowany z różnego typu materiałów stosując jednakową metodykę dla całości.
3. prostota - obiekt może być poddany dezynfekcji bez zdejmowania ochronnego opakowania transportowego (co jest szczególnie istotne w przypadku podatnych na uszkodzenie dzieł sztuki). Obróbkę prowadzi się w warunkach otoczenia tj. w temperaturze pokojowej i pod panującym ciśnieniem.
4. czystość - metoda nie wymaga stosowania żadnych środków chemicznych.
5. szybkość - w ciągu kilku godzin można wydezynfekować jednocześnie kilka metrów sześciennych materiału.
6. ekonomiczność - w porównaniu z innymi metodami nie jest droga i oszczędza czas konserwatorów dzieł sztuki eliminując długą, żmudną pracę.
7. powtarzalność - możliwe jest kilkukrotne stosowanie metody bez skutków ujemnych dla konserwowanego obiektu.
8. bezpieczeństwo - napromieniowanie obiektu nie wywołuje zjawiska wtórnej promieniotwórczości ani żadnych skażeń innego rodzaju.

Radiacyjnej dezynfekcji poddawano dotychczas na świecie przede wszystkim muzealne obiekty drewniane, a także: wykonane z kamienia, tkaniny, skóry, słomy, urządzenia mechaniczne (np. pianina) i mumie. Zależnie od rodzaju i wielkości zakażenia, a także czynników związanych z rodzajem dezynfekowanego obiektu oraz warunkami otoczenia, stosowane były dawki promieniowania o dużej rozpiętości.

Bardzo interesującym było dokonanie we Francji radiacyjnej konserwacji mumii faraona Ramzesa II. Poprzedziły ją kompleksowe badania w latach 1976 - 1977. Proces przeprowadzono w temperaturze otoczenia i przy naturalnym ciśnieniu bez wprowadzenia żadnych związków chemicznych. Stwierdzono, że dawka 18 kGy będzie optymalna dla dezynfekcji i nie wpłynie negatywnie na właściwości składników mumii. Uzyskane pozytywne rezultaty zachęciły francuskich naukowców z ośrodka ARC - Nucleart w Grenoble do wielu kolejnych dezynfekcji mumii [25].



W Polsce przeprowadzono także kilkanaście zabiegów radiacyjnej dezynfekcji obiektów wykonanych z różnych materiałów.

1. Zabytkowe meble ze sklepu Wedla, własność Wójcicki - pensjonat De Ja Vu w Łodzi -1990r.
2. XVII wieczny ołtarz z kaplicy cmentarnej w Rzęśni woj. łódzkie, 1993r.
3. Ołtarz Matki Boskiej z kościoła w Kurowicach woj. łódzkie, 1995r.
4. Meble z pokoju W. Reymonta, Muzeum Historii Miasta Łodzi, 1998r.
5. Rzeźba gotycka Matki Boskiej z Dzieciątkiem I połowa XV wiek, Muzeum Archidiecezjalne w Łodzi, 1999r.
6. Skrzydła tryptyku z Rosochy koło Moszczenicy I ćwierćwiecze XVI wieku, Muzeum Archidiecezjalne w Łodzi, 1999r.
7. Zabytkowa komoda, własność E. Zbawińska, 2000r.
8. Figura Madonna z Dzieciątkiem wykonana z piaskowca ze zbiorów Sztuki Średniowiecznej, Muzeum Narodowe w Warszawie, 2001r.
9. Obuwie więźniarskie z Państwowego Muzeum na Majdanku, 2001r.
10. Rzeźby drewniane: Świętego Franciszka, Świętego Antoniego i Świętej Anny z Bazyliki Archikatedry w Łodzi, 2002r.
11. Książki z Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej, 2002r.
12. Rzeźba drewniana św. Jana Napomucena z Muzeum Archidiecezjalnego w Łodzi, 2003r.
13. Drewniane maski afrykańskie - 2004r.
14. Regionalne skrzynie i komoda – 2004r.
15. Organy kościelne – 2006r.



Rys.11. Drewniane rzeźby Matki Boskiej z Dzieciątkiem i św. Jana Napomucena z Muzeum Archidiecezjalnego w Łodzi poddane radiacyjnej dezynfekcji

Konsolidacja polega na przekształceniu płynnych monomerów lub żywic syntetycznych, którymi wcześniej nasycono konserwowany obiekt, w stałą masę o odpowiedniej twardości i wytrzymałości. Masa ta wypełniając wolne przestrzenie (pory) łączy się z materiałem obiektu poddanego konsolidacji i utrwała jego strukturę, zabezpieczając przed dalszym rozpadem i niszczeniem przez szkodniki.

Metoda ta jest procesem dwuetapowym:

1. etap nasączenia - impregnacji obiektu ciekłym monomerem, albo żywicą syntetyczną, mieszaniną monomerów lub żywic,
2. etap radiacyjnego utwardzania - w polu promieniowania zachodzą procesy polimeryzacji, sieciowanie i szczypanie.

W pierwszym etapie obiekt umieszczany jest w zbiorniku, w którym na ogół obniża się ciśnienie w celu usunięcia powietrza z porów materiału a następnie wprowadza się czynnik nasycający. Dobór rodzaju i ilości stosowanego impregnatu a także właściwe, równomierne rozłożenie go w całej objętości obiektu jest najtrudniejszym elementem całego procesu. Penetracja impregnatu w głąb struktury jest często wspomagana przez podwyższenie ciśnienia w zbiorniku przez wprowadzenie gazu obojętnego. Etap ten trwa od 0.5 do 24 godzin.

Dobór właściwego czynnika impregnacyjnego powinien uwzględniać następujące przesłanki: lepkość, kurczliwość w czasie polimeryzacji, prężność par, toksyczność, reaktywność, moduł sprężystości otrzymanego polimeru, starzenie się polimeru oraz koszt i dostępność na rynku.

Dane przedstawiane przez francuski ośrodek ARC-Nucleart preferują stosowanie różnego typu żywic głównie mieszaniny poliestrów, akrylanów poliuretanowych bądź epoksyakrylanów. Zalecane jest także stosowanie roztworów żywicy poliestrowej w styrenie.

Drugi etap - radiacyjne utwardzanie - przebiega poprzez złożony mechanizm różnego typu reakcji chemo-radiacyjnych. W przypadku monomerów i ich roztworów promieniowanie inicjuje najpierw szybki proces polimeryzacji, czyli przekształcenie cząsteczek monomerów w łańcuchy polimerowe o różnej wielkości. Następnie łańcuchy te mogą łączyć się ze sobą w procesie radiacyjnego sieciowania. Mogą zachodzić także procesy szczypania polimeru lub monomeru na materiale konsolidowanego obiektu np. przyłączenie cząsteczek polimeru lub monomeru do cząstek celulozy zawartej w drewnie. W żywicach będących mieszaniną monomerów i polimerów przebiegają równoległe procesy polimeryzacji, sieciowania i szczypania.

Radiacyjna konsolidacja charakteryzuje się następującymi zaletami, których pozbawione są inne sposoby inicjowania tego procesu a mianowicie:

1. możliwość prowadzenia procesu konsolidacji w temperaturze pokojowej i pod normalnym ciśnieniem,
2. wyeliminowanie inicjatorów chemicznych pozwala w dowolny sposób regulować czas i szybkość procesu konsolidacji oraz kontrolować reakcje egzotermiczne zachodzące wewnątrz obiektu, dzięki prostej operacji polegającej na zmianie mocy dawki promieniowania,
3. wysoka przenikliwość promieniowania gamma zapewnia utwardzenie polimeru w całej objętości obiektu poddanego procesowi konsolidacji, dzięki czemu uzyskujemy jednolity materiał,
4. monomer (żywica), który nie uległ polimeryzacji może zostać poddany regeneracji i powtórnie użyty,
5. polimeryzacja może zachodzić zarówno w fazie gazowej, ciekłej jak i stałej,

6. możliwość stosowania unikalnych monomerów, które przy stosowaniu zwykłych metod nie podlegają wcale lub bardzo trudno procesowi polimeryzacji.

Godnym podkreślenia jest fakt, że małe dawki promieniowania potrzebne do polimeryzacji, sieciowania i szczepienia nie wpływają negatywnie na materiał wyjściowy. Ilość wchłanianego monomeru lub żywicy przez obiekt zwiększa natomiast jego masę, zmieniając w zasadzie pierwotną budowę zarówno pod względem chemicznym jak i fizycznym. Po procesie utwardzenia uzyskujemy materiał odporny na insekty, o znacznie zwiększonej wytrzymałości mechanicznej oraz niektórych nowych specyficznych cechach (np. materiał niepalny, odporny na wodę itp. ).

Konsolidacja radiacyjna może być stosowana zarówno do całych obiektów jak i do ich fragmentów o różnym wieku i stopniu zniszczenia. Czas wykonywania zabiegu tą metodą w odniesieniu do suchego materiału wynosi od 1 do 4 dni.

Proces radiacyjnej konsolidacji stosowany jest przede wszystkim do drewna. Należy rozróżnić czy wyjściowy materiał jest suchy (naturalna zawartość wilgoci) czy jest nasycony wodą (archeologia, wykopaliska). Sposób postępowania w obu przypadkach jest inny. Oprócz drewna przeprowadzono także prace nad konsolidacją kamienia, wyrobów garncarskich i gipsowych, kości i innych materiałów porowatych jak tektura, pergamin, korek, skóra itp.

#### Konsolidacja drewna suchego

Przy prowadzeniu obróbki należy rozróżnić dwa rodzaje obiektów, a mianowicie: drewno naturalne oraz drewno polichromowane lub pozlącane.

Liczne badania nad procesem utwardzania drewna były prowadzone przeszło trzydzieści lat temu. Dotyczyły one głównie otrzymywania nowego materiału "drewno - polimer" (DP) o unikalnych własnościach fizyko - chemicznych. Opracowane technologie pozwoliły uzyskiwać materiały, które są stosowane do produkcji: mebli, wykładzin podłogowych, ram okiennych, jachtów, sprzętu sportowego i wielu innych. Produkcja materiałów DP metodą radiacyjną na dużą skalę znalazła zastosowanie głównie w Stanach Zjednoczonych. W Polsce prace w tym zakresie prowadzone były w Międzyresortowym Instytucie Techniki Radiacyjnej Politechniki Łódzkiej.

Metoda radiacyjnej konsolidacji drewna do konserwacji obiektów muzealnych została wykorzystana po raz pierwszy na początku lat siedemdziesiątych. Obecnie największe osiągnięcia w tej dziedzinie posiada ARC-Nucleart w Grenoble.

Stosując proces konsolidacji do drewnianych obiektów zabytkowych trzeba brać pod uwagę specyficzne ich cechy w porównaniu z klasycznymi kompozytami drewno - polimer. Chodzi przede wszystkim o wiek drewna sięgający niekiedy kilkuset lub więcej lat oraz fakt jego degradacji wynikającej z działania czynników atmosferycznych, chemicznych i biologicznych. Stosowane w obiektach muzealnych drewno pochodzi na ogół z gatunków wysokowartościowych i w wielu przypadkach zawiera w swojej strukturze naturalne lub syntetyczne substancje będące składnikami klejów, farb, lepiszczy, polichromii itp. Także wymagania co do finalnego efektu są inne. Nie chodzi tu o uzyskanie wyjątkowych parametrów wytrzymałościowych itp., lecz o zabezpieczenie przed całkowitym zniszczeniem, przy maksymalnym zachowaniu cech wyjściowego materiału. Ekonomika procesu, nie jest też sprawą decydującej wagi jednakże i ten element należy się mieć na uwadze.

#### Konsolidacja drewna nasiąkniętego wodą

W tym przypadku chodzi o drewno, które pozostawało całe wieki lub tysiąclecia zanurzone w wodzie albo zakopane w środowisku wilgotnym, tym samym uległo poważnemu



uszkodzeniu. Suszenie za pomocą odparowania wywołuje na ogół nieodwracalne odkształcenie drewna (zarysowania, spękania, ubytki itp.).

Metoda polega na zastąpieniu w ośrodku płynnym, wody z drewna monomerem albo żywicą, które ulegają polimeryzacji. Ponieważ bezpośrednia wymiana nie daje dobrych rezultatów na ogół stosuje się kolejne zamiany: najpierw wody na rozpuszczalnik organiczny a następnie rozpuszczalnika na żywice. Odwadnianie drewna prowadzone jest przy pomocy takich rozpuszczalników jak aceton lub etanol. Jest oczywiste, że w przypadku możliwości zastosowania monomeru rozpuszczającego się w wodzie użycie rozpuszczalnika nie jest konieczne, ponieważ następuje wtedy bezpośrednia wymiana woda - monomer. Żeby spowolnić szybkość wymiany proponuje się stosować na początku procesu rozcieńczony zarówno rozpuszczalnik jak i monomer.

Impregnacja drewna nasyconego wodą za pomocą metakrylanu butylu czy też roztworem żywicy poliestrowej poprzedzona jest procesem wymiany z użyciem rozpuszczalników. W przypadku metakrylanu butylu mogą być stosowane aceton i etanol, natomiast w przypadku żywicy jedynie aceton. Pomiary gęstości i analizy metodą chromatografii gazowej pozwalają kontrolować poszczególne etapy odwadniania i impregnacji.

W obecnej chwili uważa się, że monomery rozpuszczalne w wodzie nie spełniają stawianych im wymagań. Wynika to ze zbyt dużej lepkości i prężności pary, wykazują spory skurcz objętościowy, a przede wszystkim mamy do czynienia z inhibitującym działaniem tlenu na proces polimeryzacji. Teoretycznie proces może być prowadzony w atmosferze azotu, lecz ze względu na liczne komplikacje techniczne wersja ta jest mało praktyczna. Preferuje się natomiast użycie roztworu żywicy poliestrowej w styrenie. Mamy wtedy do czynienia z niewielkim skurczem, otrzymujemy twardą nieklejącą się powierzchnię, pomimo obecności tlenu. Konieczne jest jednak prowadzenie podczas impregnacji procesu stopniowej wymiany przez rozpuszczalnik, na ogół aceton.

Ważnym zagadnieniem jest możliwość powstawania pęknięć. Mogą one występować zarówno przy stosowaniu polimerów o dużym jak i niestety małym skurczu. Dlatego też proces musi być prowadzony wolno i dokładnie, woda i rozpuszczalnik muszą zostać usunięte prawidłowo, tak by drewno pozostało niezmienione nawet w warunkach zmiennej temperatury i wilgotności otoczenia.

Procesowi konsolidacji można poddawać także wyroby wykonane z kamienia, gliny i gipsu.

Metoda radiacyjnej konsolidacji rozwija się we Francji od roku 1970 osiągając bardzo dobre rezultaty. Wstępne badania w tej dziedzinie prowadzono także w Szwajcarii i Holandii. Konsolidacja radiacyjna jest obecnie wykorzystywana do konserwacji obiektów archeologicznych, których maksymalną długość określają rozmiary źródła promieniowania. W ARC-Nuclear Grenoble przeprowadza się obróbkę przedmiotów wykonanych z jednego kawałka drewna o długości nieprzekraczającej dwóch metrów. Uzyskane rezultaty zależą od charakterystycznych cech danego obiektu: rodzaju drewna, z którego jest wykonany, stopnia zniszczenia, kształtu itp. Są one na ogół zadawalające, choć czasami daje się zauważyć naprężenia albo rysy spowodowane skurczeniem się drewna podczas polimeryzacji.

Zainteresowanie metodą radiacyjną ze strony archeologów wiąże się zwłaszcza z trwałością przedmiotów poddanych konsolidacji. Cecha ta jest szczególnie ważna gdy organizowane są prezentacje eksponatów na wystawach czasowych, przewożonych z miejsca na miejsce. Inną zaletą to zapewnienie drewnu dużej odporności, co umożliwia w wielu przypadkach magazynowanie i wystawianie eksponatów w mało sprzyjających warunkach np. przy wysokiej wilgotności czy na otwartym powietrzu.

W ciągu 25-ciu lat ARC-Nuclear wykorzystując promieniowanie, przeprowadziła we Francji konserwację około 200 obiektów archeologicznych o bardzo różnych wymiarach i stopniu zniszczenia, od pionków szachowych po fragmenty wielometrowej pirogi. Obiekty te

pochodzą przy tym z odległych od siebie epok począwszy od pirogi skonstruowanej 600 lat przed naszą erą po przedmioty wydobyte z XVIII wiecznych wraków.

W naszym kraju dotychczas nie opracowano technologii radiacyjnej konsolidacji obiektów zabytkowych a co za tym idzie nie przeprowadzono takiego zabiegu.

W latach w Międzyresortowym Instytucie Techniki Radiacyjnej prowadzone były badania nad radiacyjną modyfikacją drewna zdrowego celem poprawy jego własności chemicznych i mechanicznych.

W Polsce w ostatnim czasie, w roku 2005 podjęto próby konsolidacji radiacyjnej silnie skorodowanego drewna w odniesieniu do małych próbek. Konieczne są jednak dalsze prace wiążące się z budową specjalistycznej aparatury pozwalające na pracę z dużymi obiektami. Budowa i użytkowanie wielkogabarytowego układu wymaga dokładnego opracowania całej technologii a tym samym znacznych nakładów finansowych.

### ***Podsumowanie***

Podjęte próby połączenia nowoczesnej metody detekcji głównie larw owadów z wykorzystaniem techniki radiacyjnej do ich unieszkodliwiania jak na razie pozwoliły uzyskać połowiczny sukces.

Zastosowanie tomografii komputerowej pozwala stwierdzić obecność „żywych” larw owadów w obiektach drewnianych. Uzyskujemy dokładne dane co do miejsca ich żerowania i wewnętrznych zniszczeniach obiektu. Proste zdjęcia rentgenowskie nie pozwalają na uzyskanie tak dokładnych i jednoznacznych danych. Jednak nawet uproszczona (w porównaniu z aparatem stosowanym w medycynie ) aparatura jest bardzo droga a koszt jednostkowej analizy wysoki. Dodatkową wadą jest w zasadzie konieczność dostawy obiektu zabytkowego do miejsca pracy aparatu.

Owad żerujący w drewnie jest źródłem fali akustycznej, przenoszonej przez drewno i słyszanej przez ucho ludzkie. Dźwięki te mogą zostać odebrane przez detektory dźwięku. Aby wyselekcjonować dźwięki dochodzące z wnętrza przedmiotu drewnianego i odseparować je od tła, celowe wydaje się zastosowanie detektorów kontaktowych, odbierających drgania bezpośrednio z badanego przedmiotu.

W naszej pracy chcemy zarejestrować falę akustyczną wytwarzaną przez drewnojady (spuszczele i kołatki), uzyskać jej widmo a następnie poddać je analizie przy pomocy programu komputerowego. Wyodrębnienie cech charakterystycznych, pozwoli odróżnić badany dźwięk od innych,

Kolejny etap to zbudowanie układu monitorującego, który załączy urządzenie rejestrujące w okresie aktywności drewnojadów (gdy wytwarzają fale dźwiękowe), a w dowolnie długich okresach ich spoczynku będzie w stanie czuwania. W omawianej metodzie chcemy wykorzystać falę akustyczną (20Hz – 20kHz), jednak analiza w szerokim zakresie częstotliwości może dać pozytywne efekty również powyżej progu słyszalności ( w zakresie ultradźwięków).

Osobnym, i jak się zdaje najtrudniejszym etapem pracy jest zbudowanie urządzenia lokalizującego źródło fali akustycznej (lub ponadakustycznej). W tym przypadku konieczne będzie zastosowanie wielu detektorów drgań, a następnie obróbka sygnałów za pomocą odpowiedniego programu komputerowego.

Opisany sposób wykrywania drewnojadów żerujących w przedmiotach drewnianych może być stosowane w miejscu gdzie znajduje się dany przedmiot. Z tego powodu i ze względu na relatywnie niski koszt aparatury jest tani.

Metody termowizyjne stwarzają pewne możliwości ich wykorzystania w ramach badania obiektów zabytkowych jednak zastosowanie ich do wykrywania żerujących owadów

w drewnianych zabytkach na obecnym etapie wydaje się być mało realne. Konieczne jest prowadzenie dalszych badań w tym zakresie i stworzenie nowej, bardziej czułej aparatury.

Technika radiacyjna może być z powodzeniem wykorzystywana w procesach dezynfekcji obiektów zabytkowych wykonanych z różnych materiałów. Jest to metoda nad wyraz uniwersalna i niezawodna. Wymaga jednak specyficznej aparatury (komory radiacyjnej) a tym samym konieczności dowozu obiektu na miejsce zabiegu. Należy także mieć na uwadze by każdorazowo przeanalizować przebieg samego procesu i jego ewentualny wpływ na dezynfekowane dzieło sztuki.

Radiacyjna konsolidacja skorodowanego obiektu w Polsce praktycznie nie była dotychczas ani razu zastosowana. W oparciu o dane pochodzące przede wszystkim z Francji należy stwierdzić, że w pewnych przypadkach może być jedyną metodą ratowania zabytkowych obiektów. Jednakże należy ją wnikliwie w naszych warunkach przebadać i każdorazowo przeanalizować konsekwencje jej zastosowania.

## **Bibliografia**

- [1] Ligęza M., Rutkowski J. Zastosowanie promieniowania rentgenowskiego i jądrowego do badania dzieł sztuki. Symp. Technika Radiacyjna i Izotopowa w Konserwacji Zabytków, Łódź, 23 - 24.04.1996 materiały konferencyjne str. 42 - 51
- [2] A.Krajewski, T. Biegański, J.Perkowski, K. Rybka, P. Witomski Postępy w wykrywaniu ksylofagicznych owadów niszczących drewno zabytków w Polsce. Biuletyn Informacyjny Konserwatorów Dzieł Sztuki vol.15 No. 3-4, 58-59, 2004
- [3] T. Biegański, K. Rybka, J. Perkowski, M. Wysocki, A. Krajewski Wstępne wyniki polskich badań nad wykrywaniem owadów w drewnie za pomocą tomografii i termografii Postępy Techniki Jądrowej vol 46, z.3. str. 17 – 20, 2003
- [4] T. Biegański, A.Krajewski, J.Perkowski, K. Rybka, P. Witomski Tomografia komputerowa jako metoda wykrywania i obserwowania owadów w drewnie Przemysł drzewny 12, grudzień 2003 str 17 –18. ISSN 0373-9856
- [5] Almond D. P., Patel P. M. *Photothermal science and techniques*. London, Chapman & Hall, 1996, p. 108.
- [6] Almond D. P., Lau C. K. *Defect sizing by transient thermography. I. An analytical treatment*. J. Phys. D: Appl. Phys., 27, 1994, p.1063-1069.
- [7] Krapez J.-C., Balageas D. *Early detection of thermal contrast in pulsed stimulated infrared thermography*. In: Proc. of the Eurotherm Seminar 42 "Quantitative Infrared Thermography-QIRT'94", Aug.23-26, 1994, Sorrento, Italy, p.260-266.
- [8] Krapez J.C., Gardette G., Balageas D., *Proc. 3rd Int. Workshop on Advanced IR Techn. and Appl.*, Capri (It.), Sept. 19-20, 1995, pub. Fondazione G. Ronchi (Firenze), 1995, p. 219-237.
- [9] Krapez J.-C., Legrandjacques L., Lepoutre F., Balageas D., *Optimization of the photothermal camera for crack detection*, Proc. of the Eurotherm Seminar 60 "Quantitative Infrared Thermography-QIRT'98", Sep.7-10, 1998, Łódź, Poland, pp.305-310.
- [10] Krapez J.C. *Compared performances of four algorithms used for modulation thermography*, Proc. of the Eurotherm Seminar 60 "Quantitative Infrared Thermography-QIRT'98", Sep.7-10, 1998, Łódź, Poland, p. 148-153.
- [11] Maldague X., Marinetti S. *Pulse phase infrared thermography*. J. Appl. Phys., 79, 1996, p.2694-2698.
- [12] Mikołajczyk Z., Więcek B., Michalak M. *Thermovision method in stress analysis of textile materials*,. Proc. of the Eurotherm Seminar 60 "Quantitative Infrared Thermography-QIRT'98", Sep.7-10, 1998, Łódź, Poland, p. 140-146
- [13] Netzelmann U., Walle G. *High-speed pulsed thermography of thin metallic coatings*, Proc. of the Eurotherm Seminar 60 "Quantitative Infrared Thermography-QIRT'98", Sep.7-10, 1998, Łódź, Poland, p. 81-85
- [14] Rantala J., Wu D., Busse B. *NDT of polymer materials using lock-in thermography with water-coupled ultrasonic excitation*. NDE & E. Intern., 31, 1998, No.1, p.43-49.
- [15] Salerno A., Dillenz A., Wu D., Rantala J., Busse G. *Progress in ultrasound lockin thermography*, Proc. of the Eurotherm Seminar 60 "Quantitative Infrared Thermography-QIRT'98", Sep.7-10, 1998, Łódź, Poland, p.
- [16] Vavilov V., Marinetti S., Grinzato E., Bison P. *Thermal tomography, characterisation and pulse phase thermography of impact damage in CFRP, or why end-users are still reluctant about practical use of transient IR thermography*. Snell (J.R.) and Wurzbach (R.N.) eds., Thermosense-XX, SPIE Proc. 3361, 1998, p.275-281.
- [17] Vavilov V., Maldague X., Picard J. et al. *Dynamic thermal tomography: new NDE technique to reconstruct inner solids structure using multiple IR image processing*. Thompson (D.O.) and Chimenti (D.E.) eds., Rev. of Progress in Quant. NDE, vol.11, Plenum Press, New York, 1992, p.425-432.



- [18] Vavilov V., Almond D. P., Busse G., Grinzato E., Krapez J.C., Maldague X., Marinetti S., Peng W., Shirayev V., Wu D. *Infrared thermographic detection and characterisation of impact damage in carbon fibre composites: results of the round robin test*, Proc. of the Eurotherm Seminar 60 "Quantitative Infrared Thermography-QIRT'98", Sep.7-10, 1998, Łódź, Poland, p. 43-52
- [19] M. Michalak, I. Krucińska, B. Więcek, Application of thermography for slow and fast varying thermal processes in textile research, Proc. Quantitative Infrared Thermography, QIRT 2000, Reims, July, 2000.
- [20] Wu D., Salerno A., Schönbach B., Halin H., Busse G. *Phase-sensitive modulation thermography and its applications for NDE*. Wurzbach (R.N.) and Burleigh (D.D.) eds., Thermosense-XIX, SPIE Proc. 3056, 1997, p.176-183.
- [21] Zweschper Th., Wu D., Busse G. *Detection of loose rivets in aeroplane components using lockin thermography*, Proc. of the Eurotherm Seminar 60 "Quantitative Infrared Thermography-QIRT'98", Sep.7-10, 1998, Łódź, Poland, p. 161-166
- [22] Nowe metody badań fizykochemicznych w diagnostyce konserwatorskiej zabytków sakralnych, M. Poksińska, B. Więcek, KK nt. „Potrzeby Konserwatorskie Obiektów Sakralnych na Przykładzie Makroregionu Łódzkiego – stan, zagrożenia i możliwości przeciwdziałania”, Łódź, 9-10.12.2005, s.39-50.
- [23] Mańkowski P., Pilecka – Pietrusińska E. Badania ultradźwiękowe drewna zabytkowego. Biuletyn Informacyjny Konserwatorów Dzieł Sztuki. Vol. 12, no. 2 (45) 12 – 17 (2001)
- [24] Perkowski J., Pękala W. Promieniowanie dla zabytków Spotkania z Zabytkami, 19, 1, 41 - 42 (1995)
- [25] Chyżewski A., Galant S., Perkowski J. Zastosowanie promieniowania jonizującego w konserwacji zabytków Postępy Techniki Jądrowej, 39, 4, 22 - 30 (1996)
- [26] Perkowski J. Technika radiacyjna w pracach konserwatorskich i renowacyjnych Renowacje III (14) nr.4. rok 2000 str. 12 – 17
- [27] Perkowski J. Wpływ promieniowania gamma na dzieło sztuki w procesie dezynfekcji i dezynsekcji. Biul. Informacyjny Konserwatorów Dzieł Sztuki 9, 1 (32) 33 - 35 (1998)
- [28] Perkowski J., Zajączkowska – Kłoda J. Konserwacja rzeźby Madonna z Dzieciątkiem Biul. Informacyjny Konserwatorów Dzieł Sztuki 12, 2 (45) 42 - 47 (2001)
- [29] Krajewski A., Perkowski J. 15 lat stosowania promieni gamma do konserwacji zabytków w Polsce. Postępy Techniki Jądrowej vol.47, z.4. str. 28 - 32, 2004
- [30] Krajewski A., Perkowski J. Stan badań a praktyka zastosowania promieni gamma do dezynsekcji i dezynfekcji drewna zabytkowego Materiały XXII Sympozjum – Ochrona drewna. Wydawnictwo SGGW. Warszawa 2004 str. 75 – 86
- [31] Ramiere R. *Protection de L'environnement Culturel par les Techniques nucleares*. Conference Internationale sur Les Applications Industrielles de la technologie des Radioisotopes et des Rayonnements Grenoble, France 28 Septembre - 2 octobre 1981 IAEA - CN - 40/113
- [32] Perkowski J. Radiacyjna konsolidacja obiektów muzealnych Symp.Technika Radiacyjna i Izotopowa w Konserwacji Zabytków, Łódź, 23 - 24.04.1996 materiały konferencyjne str. 31 - 41
- [33] Ramiere R. Konserwacja dzieł sztuki promieniami gamma we Francji Symp.Technika Radiacyjna i Izotopowa w Konserwacji Zabytków, Łódź, 23 - 24.04.1996 materiały konferencyjne str. 68 - 78