



## Nowe metody badań fizykochemicznych w diagnostyce konserwatorskiej zabytków sakralnych

Maria Poksińska<sup>1</sup>, Bogusław Więcek<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instytut Zabytkoznawstwa i Konserwatorstwa, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu

<sup>2</sup> Instytut Elektroniki, Politechnika Łódzka

### Wprowadzenie

Szybki rozwój badań w różnych dziedzinach nauki sprawił, że obecnie zidentyfikować możemy każdy materiał stanowiący tworzywo zabytku. Nie jest to jednak jednoznaczne ze zbadaniem samego dzieła będącego najważniejszym źródłem informacji - jego dziejów, budowy technicznej, technologii, przyczyn zniszczeń itp. Wykonując badania fizykochemiczne, które są integralnym elementem w procesie konserwacji dzieł sztuki, często stajemy przed barierą niemożności rozwiązania problemów badawczych pojawiających się w trakcie prac konserwatorskich.

Naczelnym zadaniem w diagnostyce konserwatorskiej zabytkowych budowli jest potrzeba odróżnienia materiałów oryginalnych od późniejszych uzupełnień, które często także mają charakter zabytkowy. Kolejny problem stanowi możliwość chronologicznego rozwarstwienia struktury budowli, a więc jej datowanie. Także istotna w praktyce konserwatorskiej odpowiedź, o technikę wykonania pierwotnego opracowania malarskiego i techniki występujących w zabytku przemalowań, jest też często niemożliwa do uzyskania, pomimo zastosowania zaawansowanych metod badawczych. Wynika stąd trudność w ocenie przyczyn niszczenia dzieła i przewidywania, czy i w jakim kierunku przebiegać będą procesy jego dalszej degradacji. Tak, więc potrzeby adaptacji i opracowania nowych metod badawczych w dziedzinie konserwacji, wydają się nieograniczone, zważywszy jak niewiele zabytkowych dzieł sztuki doczekało się wnikliwej i pełnej analizy. Na kilku przykładach zabytków gotyckiej architektury sakralnej przybliżymy wymienione wyżej problemy, wskazując jak w świetle stosowanych dotąd metod fizykochemicznych kształtuje się możliwość ich rozwiązania. Zaprezentujemy też najnowsze badania gotyckiej architektury metodą termowizyjną [1].

### 1. Rozwarstwienie chronologiczne zabytku

Podstawowym kryterium zaliczenia obiektu do grupy zabytków jest jego autentyczność, rozumiany jako pozostająca poza wszelkimi kryteriami estetycznymi autentyczność substancji zabytkowej [2].

Rzeźba gotycka *Święta Anna Samotrzcę* z kościoła Mariackiego w Gdańsku Rys. 4, jest dobrym przykładem możliwości wyróżnienia faz chronologicznych i określenia partii oryginalnych, w oparciu o badania fizykochemiczne [3].

Wykonana z wapienia pełnoplastyczna rzeźba św. Anny (wys.125cm), trzymającej na lewym ramieniu Marię z Dzieciątkiem, była w całości wielokrotnie polichromowana. Na podstawie analizy stylistycznej określono jej powstanie na koniec XV wieku [4]. Tak też można datować pierwsze opracowanie malarskie ustalone w wyniku badań laboratoryjnych śladów zachowanej polichromii. Rys. 5 a. Pigmenty użyte w oryginalnej polichromii: biel ołowiowa, cynober, minia, czerwień żelazowa, ugier, azuryt i ziemia zielona, były typowe dla malarstwa gotyckiego. Ustalono, że rzeźba ta do czasu konserwacji w 1984 roku, była pięciokrotnie przemalowana. Rys. 5 b-f. Szczególnie bogate było pierwsze przemalowanie, gdy całe postacie, także ich twarze, pokryły złocenia i srebrzenia, z wielobarwnymi laserunkami. Ta warstwa zachowała się na dość znacznej powierzchni. Bieg historii wpłynął na pojawienie się kolejnych przemalowań, tak by w końcu, w wieku XX, skryć piękno rzeźby pod brudną warstwą pokostu. Niektóre pigmenty występujące w przemalowaniach były pomocne w ustaleniu chronologii tych warstw. Przykładem błękit – smalta  $\text{CoO} \cdot n\text{K}_2\text{SiO}_3$ , który dodano do bieli ołowiowej w drugim przemalowaniu rzeźby. Rys. 5 c. W malarstwie smalta była stosowana już pod koniec XV wieku, szczególnie chętnie w XVII i XVIII stuleciu, a od końca XVIII wieku zastępowano ją błękitem kobaltowym [5]. Analizy mikrochemiczne

i chromatograficzne kolejnych warstw przemalowań oraz występujących w nich charakterystycznych pigmentów dały możliwość uporządkowania chronologii opracowań malarskich i określenia przyczyn zniszczeń.

Przeprowadzone badania pozwoliły na spełnienie dwóch reguł dotyczących ochrony dzieł sztuki – dały podstawy do podjęcia decyzji konserwatorskich oraz stanowiły dokumentację naukową będącą świadectwem, jak się w przyszłości okazało jedynym, mówiącym o jej bogatej historii.

## 2. Określenie techniki malarskiej

Podobnie jak w przypadku smalty w przemalowaniach opisanej wyżej rzeźby *św. Anny Samotrzeciej* rodzaj pigmentu może przybliżyć chronologię opracowania malarskiego, tak użycie odpowiedniego spoiwa decyduje o technice malarskiej i konsekwencjach jego zastosowania. Przykładem do rozważań będą malowidła ściennie. W okresie średniowiecza malowidła ściennie wykonane w technice fresku, zaliczanej do technik mineralnych, były często przemalowane w technikach o spoiwach organicznych. Takim spoiwem o wielu zaletach było spoiwo jajowe, które przenikało do chudych warstw spodnich. W wielu zabytkach kształt polichromii udało się zarejestrować jedynie w promieniowaniu ultrafioletowym, gdyż wierzchnie warstwy przemalowań uległy całkowitemu zniszczeniu. Przykładem malowidła na zamku krzyżackim w Malborku [6], w kościele *św. Jakuba* w Toruniu [7], Rys. 6 a i 7 a, czy kamienicy gotyckiej w Toruniu przy ulicy Szerokiej 22 [8], Rys. 8 a, b, c.

Kluczem do rozwiązania problemu okazały się tak zwane badania nieniszczące. Pozwoliły one odtworzyć, niewidoczny dla oka w świetle naturalnym, prawdziwy obraz kształtu oryginalnej polichromii, Rys. 6 c i 8 b, a równocześnie określić zastosowaną technikę malarską. Jako spoiwo malarskie zastosowano tu prawdopodobnie temperę jajową. Badania metodami chromatografii gazowej i cienkowarstwowej wykazały występowanie w tych miejscach tłustego spoiwa organicznego oraz pigmentów miedziowych [9].

## 3. Stan zachowania zabytku a jego autentyczność

Powróćmy tu do rozważań nad autentyczną substancją zabytkową, jej materialną postacią, w zabytku bardzo zniszczonym i poddanym licznym zabiegom konserwatorskim.

Problem odstonięcia i ekspozycji oryginalnej polichromii wystąpił między innymi w górnej części chóru katedry w Kwidzynie Rys. 9 a oraz w kościele Najświętszej Marii Panny na zamku krzyżackim w Malborku, Rys. 10. W Kwidzynie podczas prowadzonych w 2000 roku prac konserwatorskich potwierdzono występowanie XIV-wiecznych malowideł ściennych pod XVI-wiecznymi przemalowaniami [10]. Określono też zasięg ich występowania. Wykonany transfer nad postaciami mistrzów krzyżackich, Rys. 9 a, pokazał jak dobrze zachowała się oryginalna polichromia, Rys. 9 b. Konserwatorzy stanęli przed trudnym problemem wartościowania materiału autentycznego i późniejszych, też autentycznych, przemalowań. W rezultacie górną strefę XVI-wiecznych przemalowań wyłączono z działań konserwatorskich. Próbowano jednak dotrzeć do całej strefy XIV-wiecznej polichromii, aby określić bliżej jej tematykę, stosując metodę termograficzną. Zarejestrowany materiał jest w trakcie opracowania.

Kolejny zabytek, w którym metoda termografii znalazła wykorzystanie jest wspomniany już kościół NMP na zamku krzyżackim w Malborku. Burzliwe losy tej budowli sprawiły, że bardzo trudno jest ustalić zakres występowania oryginalnej materii pierwszego kościoła zamkowego i jego wystroju. Największe zniszczenia powstały jednak w 1945 roku, gdy w wyniku ostrzału artyleryjskiego runęły sklepienia kościoła, a jego część wschodnia uległa całkowitemu zniszczeniu Rys. 10 a i b. W latach sześćdziesiątych odbudowano bryłę kościoła i podjęto trwające do dziś prace badawcze i konserwatorskie w jego wnętrzu. W ramach Projektu Komitetu Badań Naukowych rozpoczęto w 2003 roku interdyscyplinarne badania historyczne, źródłowe i technologiczno-chronologiczne, wykorzystując nowe techniki radiacyjne. Uzyskane wyniki powinny pozwolić na określenie materiałów oryginalnych i zakresu późniejszych ingerencji. Zbudowano też Multispektralny System Termooptyczny z oprogramowaniem Thermoscope, co było jednym z zadań Projektu [11]. Przedstawione tu termogramy uczytelniają zniszczenia

zabytkowych polichromii we wnętrzu kościoła zamkowego, Rys. 11 c oraz fragmenty murów, które uległy przebudowie, Rys. 12 b.

#### **4. Termografia statyczna jako metoda badań obiektów zabytkowych**

Termografia statyczna zwana także pasywną polega na pomiarze rozkładu temperatury lub współczynnika emisyjności obiektu w warunkach ustalonych lub quasiustalonych, tzn., gdy temperatura nie zmienia swej wartości, a obiekt spełnia reguły równowagi termodynamicznej, tj. ilość ciepła dostarczanego jest równa ilości energii odprowadzanej do otoczenia. W badaniach zabytków architektonicznych, których wielkość i masa są znaczne, takie warunki są z dobrym przybliżeniem spełnione. Należy podkreślić, że poziom promieniowania podczerwonego, zarówno w zakresie krótkofalowym (3-5 $\mu$ m) i długofalowym (8-12 $\mu$ m) zależy istotnie od wielu parametrów obiektu, co może być wykorzystane do rozróżniania składu materiałowego, okresu wykonania obiektów, stanu ich zniszczenia, itd. Do podstawowych czynników wpływających na „widzenie” obiektów w podczerwieni można zaliczyć:

- stan powierzchni i wartości emisyjności (chropowatość),
- skład materiałowy badanego obiektu,
- temperaturę,
- poziom wilgoci, np. muru,
- zawartość organizmów żywych, typu bakterie czy grzyby,
- działanie chemiczne i biologiczne, np. fermentacja czy procesy gnilne.

Ponadto należy zauważyć, że większość badanych obiektów ma strukturę warstwową, a to może oznaczać, że warstwy wewnętrzne, często o większej grubości mogą mieć wpływ na rozkład temperatury na powierzchni obiektu. W termicznych stanach quasiustalonych, pojemność cieplna warstw wewnętrznych wpływa bez wątpienia na wyniki pomiarów termograficznych powierzchni obiektów zabytkowych. Pojemność cieplna materiałów zależy głównie od ciepła właściwego i gęstości materiału. Tak więc gęste i cieplnie pojemne podłoża akumulują ciepło przez długi czas, co objawia się, zwiększoną temperaturą długo po zaniku czynnika grzejącego. Można więc sformułować scenariusz badań termograficznych, w których np. obiekt architektoniczny nagrzany za dnia promieniowaniem słonecznym jest badany nocą, przy niskiej wartości temperatury otoczenia, w celu uwidocznienia wewnętrznych warstw, np. przemurowań lub muru, który jest pod tynkiem i został wykonany z różnych materiałów.

Przykładowe badania termograficzne przeprowadzono w kościele NMP na zamku w Malborku. Na Rys. 13 pokazano obrazy optyczne i termograficzne zarejestrowane jednocześnie. Badanie termograficzne uzupełniono badaniami reflektometrycznymi w różnych przedziałach widmowych światła widzialnego i w bliskiej podczerwieni. W ramach wspólnych prac badawczych Instytutu Elektroniki Politechniki Łódzkiej i Instytutu Zabytkoznawstwa i Konserwatorstwa Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu, wykonano system komputerowy do badań optycznych i termicznych obiektów zabytkowych (Rys. 15).

System ten służy obecnie zarówno do badań w zakresie termografii pasywnej jak i aktywnej. Na Rys. 14 przedstawiono fragmenty polichromii zobrazowanej w różnych przedziałach widmowych. Okazało się, że za pomocą reflektometrii widmowej, w tym także w zakresie podczerwieni, można uwidocznić różne elementy obiektu, co może prowadzić do prostej i skutecznej analizy składu materiałowego. Na powyższym rysunku różne elementy polichromii widoczne są w różnych zakresach pasma promieniowania.

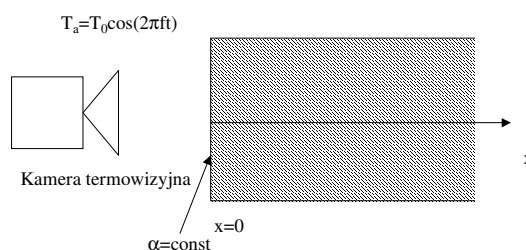
#### **5. Zastosowanie termografii dynamicznej w ocenie stanu obiektów zabytkowych**

Termografia dynamiczna to nowa metoda badań nieniszczących, w której obiekt pobudza się energią, energia ta zamienia się na ciepło, a kamera termowizyjna mierzy zmienny w czasie rozkład temperatury. Często termografię dynamiczną określa się mianem termografii aktywnej. Przykładem takich badań mogą być badania obiektów zabytkowych, gdzie źródłem energii jest lampą emitująca promieniowanie ciepłe, jak na Rys. 15.

Ciepło w materiałach stałych rozchodzi się drogą dyfuzji, co silnie zależy od właściwości termicznych badanych struktur. Szczególne zainteresowanie badaczy budzą struktury

wielowarstwowe (Rys. 15), w przypadku, których odpowiedź termiczna na frontowej stronie obiektu na pobudzenie energetyczne zależy od właściwości warstw wewnętrznych. W przypadku termografii synchronicznej (ang. Lock-in) pobudzenie, jak i odpowiedź, mają charakter periodyczny i synchroniczny. Prosta analiza cieplna struktur pozwala wykazać, że zarówno amplituda jak i faza odpowiedzi termicznej zależy od parametrów badanych materiałów.

Rozważmy praktyczny przypadek metody fali cieplnej, który polega na dostarczeniu modulowanego w czasie strumienia ciepła. W tym czasie ma miejsce synchroniczne monitorowanie rozkładu temperatury na powierzchni badanej próbki. Jest to przypadek bardzo podobny do przedstawionego na Rys. 1. Temperatura otaczającego płynu zmienia się periodycznie, a próbka przejmuje energię drogą konwekcji ze stałym współczynnikiem przyjmowania  $\alpha$ .



Rys. 1. Przykład badania metodą fali cieplnej

Dla struktury jednowarstwowej odpowiedź na wymuszenie harmoniczne postaci:

$$\varphi(t) = -\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = \alpha (T_0 \cos(2\pi f t) - T(0, t)) \quad (1)$$

gdzie  $f$  jest częstotliwością fali cieplnej, ma postać  $T(0, t) = A \cos(2\pi f t - \varphi)$ , a  $A$  i  $\varphi$  to amplituda i faza harmonicznej o częstotliwości pobudzenia.

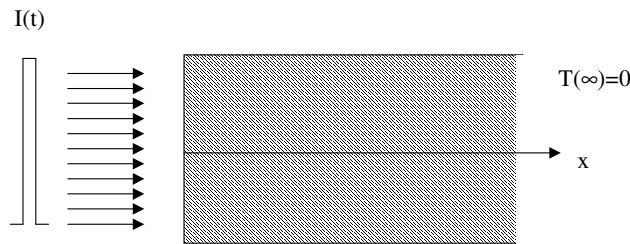
$$A = \frac{T_0}{\sqrt{1 + \frac{\lambda}{\alpha} \sqrt{\frac{4\pi f}{a} + \frac{2\pi f}{a} \left(\frac{\lambda}{\alpha}\right)^2}}} \quad (2)$$

$$\varphi = \arctg \frac{1}{1 + \frac{\alpha}{\lambda} \sqrt{\frac{a}{\pi f}}}$$

gdzie:  $a$  jest dyfuzyjnością materiału,  $\alpha$  – współczynnikiem przyjmowania ciepła otoczenia przez konwekcję,  $\lambda$  – przewodnością cieplną struktury. Z powyższej zależności wynika, że faza odpowiedzi temperaturowej struktury zależy od właściwości termicznych materiału, co oznacza, że poprzez pomiar fazy odpowiedzi termicznej można wnioskować o rodzaju badanego materiału.

Istnieje odmiana metody termografii dynamicznej – tzw. impulsowa zakłada, że pobudzeniem jest impuls energii, a więc sygnał, który zawiera nieskończenie wiele częstotliwości. W takim przypadku zamiast analizy częstotliwościowej stosowanej powszechnie w badaniach termografią synchroniczną, stosuje się analizę stałych czasowych wybranych elementów struktury. Termografia impulsowa szczególnie pozytywne wyniki dostarcza przy pomiarach cienkich warstw.

Jako przykład rozważmy jednorodną, półnieskończoną próbkę jak na Rys. 2. Porcja energii  $I(t)$  jest impulsem amplitudzie krótkim czasie trwania (tzw. impuls Diraca) amplitudzie o amplitudzie  $I_0$ . Parametry termiczne materiału nie zależą od temperatury.



Rys. 2. Koncepcja termografii impulsowej

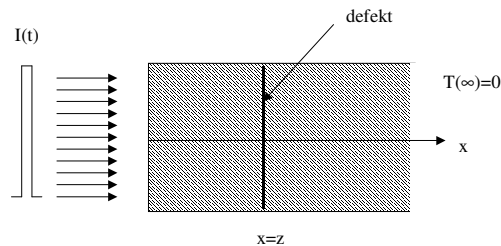
Odpowiedź termiczna układu na pobudzenie nieskończenie krótkim impulsem energii ma postać:

$$T(x,t) = \frac{I_0}{\sqrt{\pi\rho\lambda c_p t}} e^{-\frac{x^2}{4at}} \quad (3)$$

gdzie:  $a$  – dyfuzyjność,  $\tilde{\lambda}$  – przewodność cieplna,  $\rho$  – gęstości,  $c_p$  – ciepło właściwe,  $I_0[J/m^2]$  – strumień energii.

Na czołowej płaszczyźnie próbki ( $x=0$ ) rozkład temperatury zależy od czasu w oczywisty sposób:  $T(0,t) \sim t^{-0.5}$ . Wartość temperatury jest odwrotnie proporcjonalna do pierwiastka z iloczynu parametrów struktury  $(\rho\lambda c_p)^{0.5}$ . Znając zmiany temperatury w czasie na płaszczyźnie czołowej struktury można łatwo wyznaczyć iloczyn parametrów fizycznych materiału  $\rho\lambda c_p$  – efuzyjność materiału.

Defekt lub obecność innego ciała w materiale może być modelowany jako materiał, o innych parametrach fizycznych. Zwykle w okolicy defektu znacząco maleje przewodność cieplna, co utrudnia przepływ ciepła w tym obszarze, a na powierzchni czołowej obserwuje się wzrost temperatury.



Rys. 3 Próbka z defektem

Modelowanie przepływu ciepła przez próbkę z defektem prowadzi do analitycznego rozwiązania postaci [Rys. 3]:

$$T(0,t) = \frac{I_0}{\sqrt{\pi\rho\lambda c_p t}} \left( 1 + 2 \sum_{i=1}^{\infty} R^i e^{-\frac{i^2 z^2}{at}} \right) \quad (4)$$

gdzie  $z$  jest głębokością defektu.

Współczynnik  $R \in \langle 0,1 \rangle$  często nazywany jest współczynnikiem odbicia i wynosi:

$$R = \frac{e_1 - e_2}{e_1 + e_2} \quad (5)$$

przy czym:  $e_1$  i  $e_2$  są współczynnikami efuzyjności zależnymi od parametrów fizycznych struktury, próbki i defektu, postaci  $e = (\rho\lambda c_p)^{0.5}$ .

W skrajnym przypadku, gdy  $e_2=0$  (próżnia, powietrze) współczynnik  $R=1$ , co wywołuje największą zmianę temperatury na powierzchni materiału. Kontrast termiczny  $K$  jest różnicą

temperatury punktu na powierzchni próbki w okolicy defektu oraz punktu, gdzie defektu nie ma. Dla omawianego przypadku, na podstawie równania (6), kontrast wyraża się zależnością:

$$K(t) = \frac{2I_0}{\sqrt{\pi\rho\lambda c_p}} \sum_{i=1}^{\infty} R^i e^{-\frac{i^2 z^2}{at}} \quad (6)$$

Jako przykład zastosowania metody fali cieplnej w badaniach obiektów architektonicznych w pracy przedstawiono badania modelu muru średniowiecznego wykonanego z materiałów z Zamku w Malborku. Badania przeprowadzono dostarczając do badanego obiektu energię w postaci promieniowania o częstotliwości ok.  $f=0,1$  Hz. Przykładowy obraz termograficzny wraz z wykresami temperatury w czasie przedstawiono na Rys. 16. Zarejestrowano 300 obrazów z częstotliwością  $T=0,5s$  i poddano je analizie częstotliwościowej. Dla każdego punktu obrazu wyznaczono sygnały harmoniczne, w tym obraz amplitudy i fazy dla częstotliwości pobudzenia energetycznego  $f=0,1$  Hz (Rys. 17). Wyniki pokazały, że można „zajrzeć” do wnętrza struktury i zobaczyć warstwy ukryte pod zewnętrzną powłoką malarską.

### Bibliografia

- [1] Badania termograficzne wykonano w ramach Projektu badawczego HO1E 02725, Interdyscyplinarne badania zabytków architektury na przykładzie Zamku Wysokiego w Malborku – rozpoznanie i rekonstrukcja wnętrza skrzydła północnego, finansowanego przez Komitet Badań Naukowych w latach 2003-2006.
- [2] Tomaszewski A. *Konserwatorstwo pomiędzy „estetyką” i autentyzmem*, Ochrona Zabytków, nr 3, Warszawa 1988, s. 147-153.
- [3] Pilecka E., Poksińska M. *Eine spätgotische Steinskulptur in der Marienkirche zu Danzig*, [in:] *Restaura*, 6/1995, München, s. 406-409.
- [4] Pilecka E. *Późnobarokowa rzeźba św. Anny Samotrzeciej z kościoła Najświętszej Marii Panny w Gdańsku*, [w:] *Acta Universitatis Nicolai Copernici, Zabytkoznawstwo i Konserwatorstwo* 23, z. 278, Toruń 1994 s. 97-119 oraz M. Poksińska, *Polichromia kamiennej rzeźby św. Anny Samotrzeciej z kościoła mariackiego w Gdańsku*, jak w przypisie 4, s. 121-132.
- [5] Mühlethaler B., Tissen J. *Smalt*, *Studies in Conservation* 14/1969, s. 47-61.
- [6] Pospieszny K. *Gotycki wystrój malarski głównego piętra Pałacu Wielkich Mistrzów w Malborku w świetle ostatnich odkryć*, *AUNC, Zabytkoznawstwo i Konserwatorstwo* 17, z. 226, Toruń 1991, s. 231-247.
- [7] Praca zbiorowa, *Gotyckie malowidła ścienne w kościele św. Jakuba w Toruniu*, pod red. Michała Woźniaka, Toruń 2001.
- [8] Prace konserwatorskie wykonano w 2001 roku pod kierunkiem Jolanty Korcz.
- [9] Obszerniejszą interpretację procesów chemicznych związanych z tym zjawiskiem omawia M. Poksińska *Odkrycie i badania malowidła widocznego jedynie w promieniowaniu ultrafioletowym*, [w:] *Gotyckie...*, jak w przypisie 7, s. 67-72.
- [10] Raczkowski J. *Problematyka konserwatorska malowideł w chórze katedry w Kwidzynie w kontekście historycznym oraz w świetle najnowszych odkryć*, [w:] *Studenci o konserwacji*, t. 3, Toruń 2001, s. 151-164.
- [11] Więcek B., Felczak M., Poksińska M., Cupa A. *Wielospektralne badania obrazowań zabytków architektury. Część 1. System obrazowań*, VI Konferencja Krajowa Termografia i Termometria w Podczerwieni, Ustroń-Jaszowiec 4-6 listopada 2004, Łódź 2004, s. 387-393.
- [12] 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.
- [13] Maldague X., Marinetti S. *Pulse phase infrared thermography*. *J. Appl. Phys.*, 79, 1996, p. 2694-2698.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.



Rys. 4.

Rys. 4. Późnogotycka rzeźba kamienna św. Anna Samotrzeć z kościoła NMP w Gdańsku. Stan po usunięciu przemalowań. Fot. A. Skowroński

Rys. 5 a-f. Rekonstrukcja graficzna warstw chronologicznych. Oryginalne opracowanie malarskie – 2 a; przemalowania – 5 b-f, wg *Eine spätgotische...*, s. 407-409



Rys. 5 a

b

c

d

e

f



a

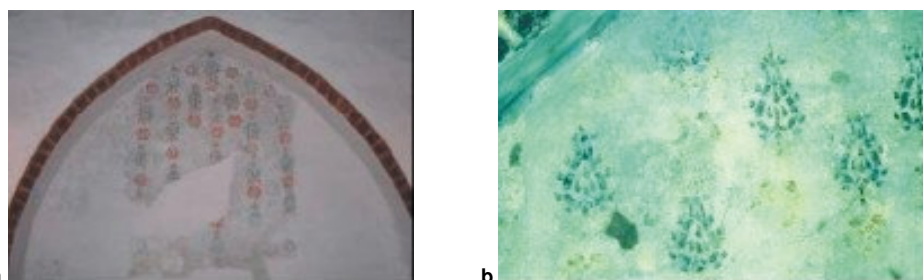


b



c

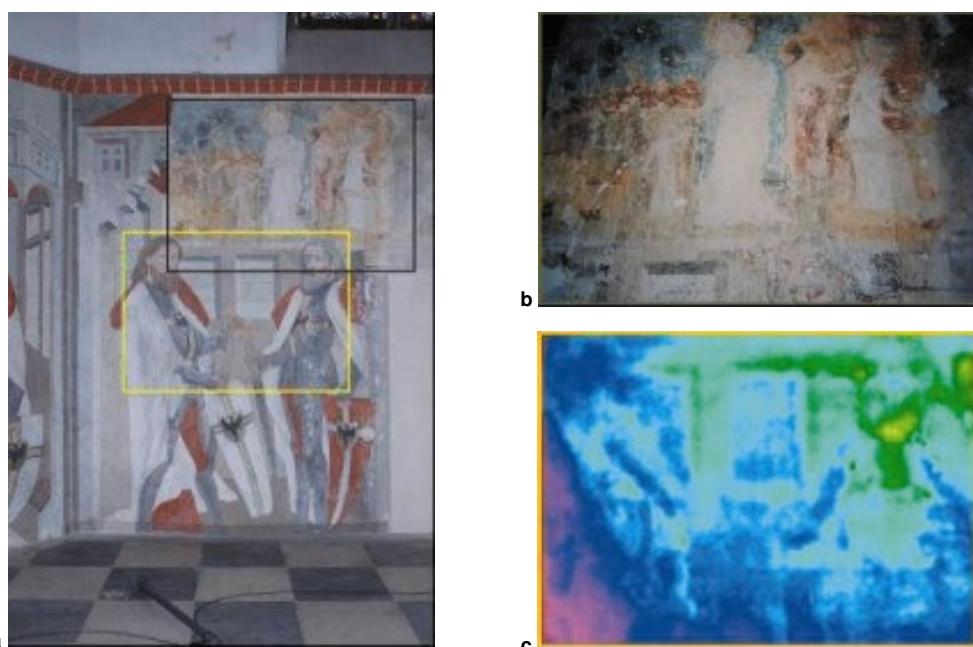
Rys. 6 a, b. Malowidło ściennie *Zwiastowanie NMP*, ok. 1350-1360, w kościele św. Jakuba w Toruniu. Stan po konserwacji w 1998 roku (a); stan przed konserwacją fotografia archiwalna (b). Środkowa część malowidła *Zwiastowanie NMP* w promieniowaniu UV. Uczytniły się ślady nieistniejącego już malowidła późniejszego *Deesis* oraz miejsca wcześniejszych ingerencji konserwatorskich (c). Wg *Gotyckie malowidła...* s. 257 i 264



Rys. 7 a, b. Malowidło patronowe na zachodniej ścianie kościoła św. Jakuba w Toruniu. Stan po konserwacji w 1999 roku (a). Ornament przed konserwacją był nieczytelny w świetle widzialnym. Wyraźny w promieniowaniu UV (b). Wg *Gotyckie malowidła...* s. 291



Rys. 8 a, b, c. Dekoracja florystyczna prawdopodobnie z XVI wieku, na ścianie gotyckiej kamienicy w Toruniu ul. Szeroka 22, stan po konserwacji (a) oraz przed konserwacją (b). Fot. M. otyckieg. Pełną kompozycję ornamentalną odczytano w promieniowaniu UV (c). Fot. P. Grzesik



Rys. 9 a, b, c. Fragment malowidła w chórze katedry w otyckiej w trakcie konserwacji w 2000 roku (a), fot. A. Skowroński. Zaznaczono odsłonięty fragment otyckiegoego malowidła otyckiego z XIV wieku (b) oraz fragment z XVI wieku poddany badaniom termograficznym (c). Fot. B. Więcek





a

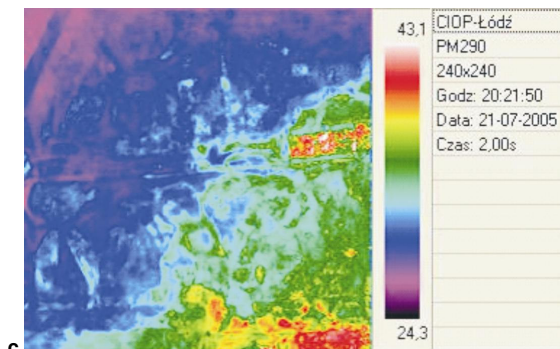


b

Rys. 10 a, b. Wschodnia część kościoła NMP na zamku krzyżackim w Malborku. Na fotografii archiwalnej z ok. 1930 roku stan chóru regotyżowanego w wyniku prac Konrada Steinbrechta (a). Na Rys. b stan z około 1950 roku po zniszczeniach wojennych, gdy runęło sklepienie i część wschodnia kościoła. Fot. Archiwum fotograficzne MZM



a

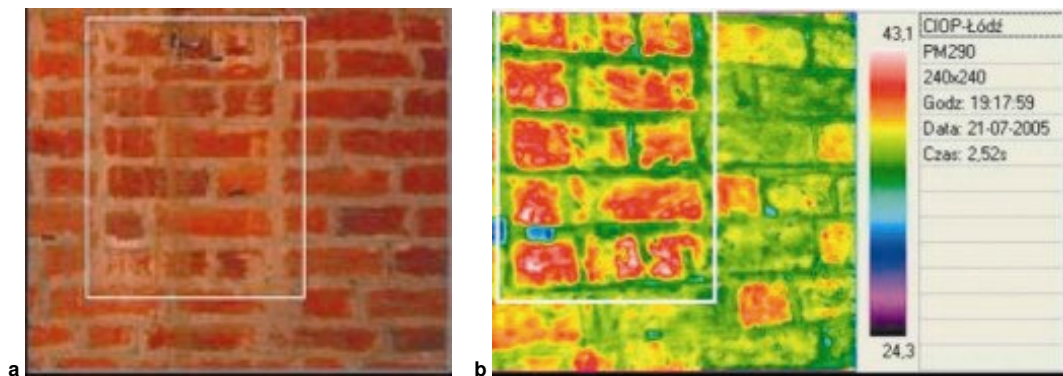


c

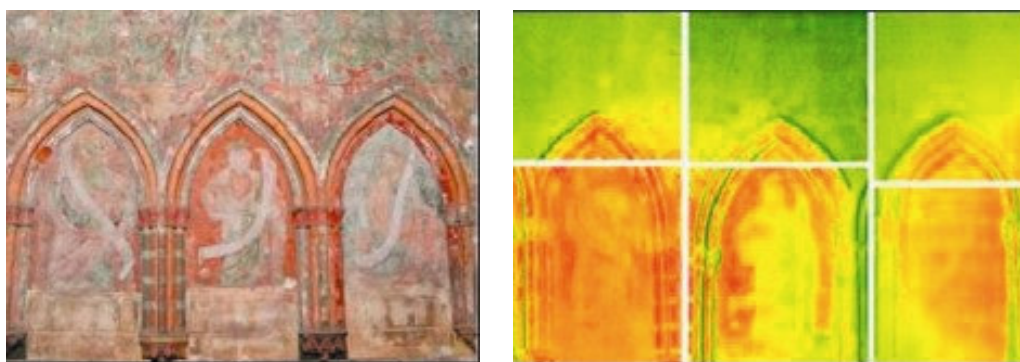


b

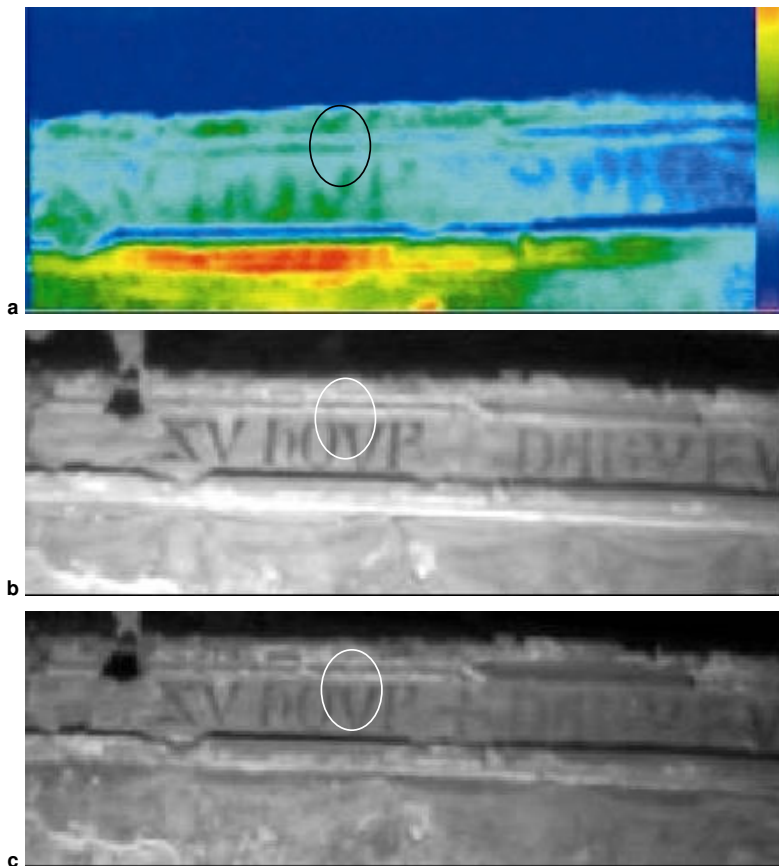
Rys. 11 a, b, c. Fragment malowideł na południowej ścianie kościoła zamkowego w Malborku. Stan z 2004 roku (a), fot. A. Skowroński. Fotografia w UV uczyniła zniszczenia warstw malarskich oraz zakres przemalowań konserwatorskich głównie tła i szat postaci (b), fot. A. Skowroński. Badania termograficzne potwierdziły miejsca występowania zniszczeń - w ubytkach tynku widoczna duża emisyjność podłoża oraz wskazały charakterystyczne pigmenty opracowania malarskiego, przykładem płaszcz Chrystusa. Fot. B. Więcek



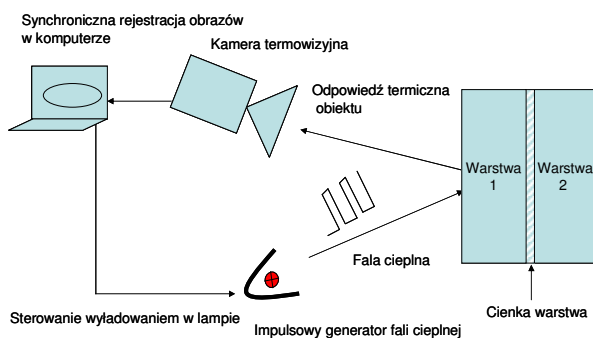
Rys. 12 a, b. Fragment przemurzenia ściany północnej w kościele zamkowym w Malborku. Oznaczono zakres objęty analizą termograficzną (a) oraz wyniki badań potwierdzające użycie materiałów o różnej emisyjności. Partie przemurowań mają wyższą emisyjność (b). Fot. B. Więcek



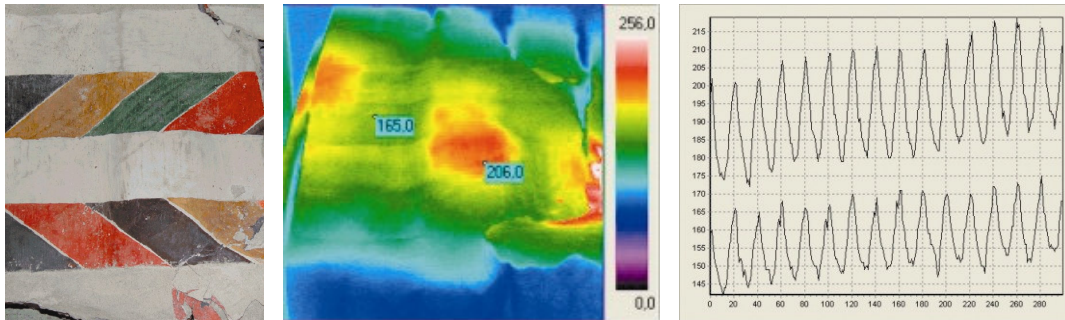
Rys. 13. Obraz optyczny i termograficzny z widocznym wątkiem ceglanym i innymi szczegółami architektonicznymi



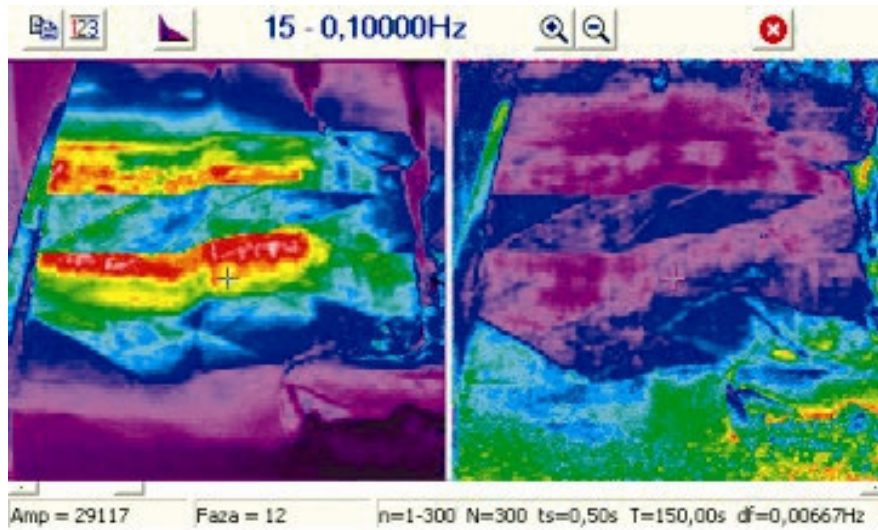
Rys. 14. Polichromia widoczna w różnych przedziałach widma, podczerwień 3-5mm (a), podczerwień 1,2 mm (b), pasmo widzialne – filtr niebieski (c)



Rys. 15. Koncepcja metody fali cieplnej i komputerowy system termografii aktywnej i pasywnej wraz ze źródłami energii świetlnej



Rys. 16. Obraz optyczny modelu muru, pojedyncza klatka z sekwencji termograficznej 300 obrazów i wykresy w czasie wartości temperatury dla dwóch wybranych punktów



Rys. 17. Wynik analizy częstotliwościowej,  $f = 0,1$  Hz (amplituda po prawej, faza po lewej stronie)