

**BADANIE TEMPERATURY ZABYTKOWYCH PRZEDMIOTÓW
Z WYKORZYSTANIEM TERMOGRAFII**

**MEASURING TEMPERATURE OF HISTORICAL OBJECTS BY MEANS OF
THERMOGRAPHY**

Alina Wróbel¹, Elżbieta Greiner-Wrona²

¹Katedra Geodezji Inżynierskiej i Budownictwa, Akademia Górniczo-Hutnicza
w Krakowie

²Katedra Technologii Szkła i Powłok Amorficznych, Akademia Górniczo-Hutnicza
w Krakowie

SŁOWA KLUCZOWE: termografia, temperatura, zabytek, korozja, klimat w muzeum, dziedzictwo kulturowe

STRESZCZENIE: Zabytkowe przedmioty wymagają utrzymania określonej, możliwie stałej temperatury i wilgotności w miejscu ich przechowywania i eksponowania. W tym celu w budynkach muzealnych stosuje się klimatyzację powietrzną lub różne działania pasywne – zacielenie, masywną zabudowę. Celem prezentowanej pracy było badanie temperatury wybranych zabytkowych przedmiotów, eksponowanych w salach muzealnych. Temperatura badanego obiektu zależy nie tylko od temperatury otaczającego powietrza, ale również czynników takich jak: temperatura otaczających ścian, oświetlenie, sposób zabudowy gablot, występowanie różnych źródeł ciepła w pobliżu eksponatów. Dlatego w szczególności zwrócono uwagę na:

- równomierność rozkładu temperatury w salach muzealnych w zależności od pór roku i dnia
- zależność temperatury okien (i dostarczanego przez nie ciepła) od sposobu ich zasłonięcia
- temperaturę eksponatów a ich oświetlenie
- wykrywanie i dokumentowanie źródeł ciepła w pobliżu eksponatów

Badania przeprowadzono w wybranych salach muzealnych bez klimatyzacji i z klimatyzacją powietrzną. Do badania termiki sal muzealnych wykorzystano technikę termografii. Jej największą zaletą jest uzyskanie wizualnego i dokładnego obrazu rozkładu temperatury na powierzchniach obserwowanych przedmiotów. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że rozkład temperatury w salach muzealnych (również klimatyzowanych) jest nierównomierny i zależy od pory roku i zewnętrznych warunków atmosferycznych. Na powierzchni zabytkowych przedmiotów obserwuje się zróżnicowanie temperatury zależne od sposobu oświetlenia i temperatury otoczenia.

1. WPROWADZENIE

W celu właściwego zachowania zabytkowych przedmiotów, należy przestrzegać w miejscu ich przechowywania i eksponowania odpowiednich warunków klimatycznych. Do najważniejszych należy utrzymanie możliwie stałej w jak najdłuższym czasie wilgotności powietrza na poziomie 55 % +/- 5 % oraz temperatury powietrza w granicach 21°C w ciągu roku +/-3°C. Osiągnąć to można albo poprzez

dokładnie, regularnie kontrolowaną klimatyzację albo poprzez utrzymanie stałej temperatury ścian zewnętrznych (Naredi – Rainer, 2008)

Zabytkowe przedmioty przechowywane i eksponowane są w budowanych w tym celu budynkach muzealnych, które są projektowane i realizowane pod kątem zapewnienia odpowiednich dla eksponatów warunków klimatycznych. Niekiedy przedmioty zabytkowe eksponowane są w zabytkowych budynkach, w których nie zawsze są urządzenia klimatyzacyjne i w związku z tym trudno jest uzyskać stałe oraz odpowiednie warunki cieplne i wilgotnościowe.

W salach muzealnych ogranicza się zazwyczaj światło dzienne, ponieważ niekorzystnie wpływa na eksponaty, a stosuje się oświetlenie sztuczne.

Dobowe i sezonowe zmiany temperatury zewnętrznej, zmienne nasłonecznienie oraz różna liczba zwiedzających wystawy są przyczyną trudności w utrzymaniu stabilnych warunków nawet w klimatyzowanych pomieszczeniach. Dlatego ważne są działania pasywne – zacienianie, masywna zabudowa, dodatkowe przegrody - mające na celu zmniejszenie obciążenia systemu klimatyzacji.

Badając temperaturę zabytkowych obiektów eksponowanych w muzeach należy zwrócić uwagę nie tylko na sam eksponat, ale też na czynniki, od których zależy temperatura badanego obiektu takie jak: temperatura otaczającego powietrza, temperatura otaczających ścian, oświetlenie, sposób zabudowy gablot, występowanie różnych źródeł ciepła w pobliżu eksponatów.

Do badania termiki sal muzealnych wykorzystać można technikę termografii. Jej największą zaletą jest uzyskanie wizualnego i dokładnego obrazu rozkładu temperatury na powierzchniach obserwowanych przedmiotów.

W artykule przedstawione zostaną wyniki termowizyjnego badania zabytkowych przedmiotów i sal muzealnych

2. METODA POMIARÓW TERMOGRAFICZNYCH

Termograficzna metoda badania została zastosowana z uwagi na swoje zalety. Pozwala ona na uzyskanie wizualnego obrazu rozkładu temperatury na obserwowanej powierzchni w sposób szybki i bezkontaktowy. Nie wpływa w żaden sposób na badany obiekt, co jest bardzo ważne w przypadku cennych zabytkowych przedmiotów.

Pomiary termowizyjne wykonane zostały kamerą termowizyjną Therma CAM S60 PAL nr 21803275, wyposażoną w obiektyw o kącie widzenia 20°. Dokładność rejestracji różnicy temperatury na termogramie wynosi 0.1°C, a liczba pikseli 240x320. W celu zapewnienia odpowiedniej rozdzielczości geometrycznej, zarówno sale muzealne jak też eksponaty zobrazowano na wielu termogramach.

Do opracowanie termogramów wykorzystano program ThermaCam Reporter 2000. Umożliwił on obliczenie rzeczywistej temperatury obserwowanej powierzchni, wybór palety barwnej termogramu i odpowiedniego zakresu temperatury. Dla badanych zabytkowych przedmiotów wykonano profile temperatury wzdłuż wybranych linii wskazanych na termogramie.

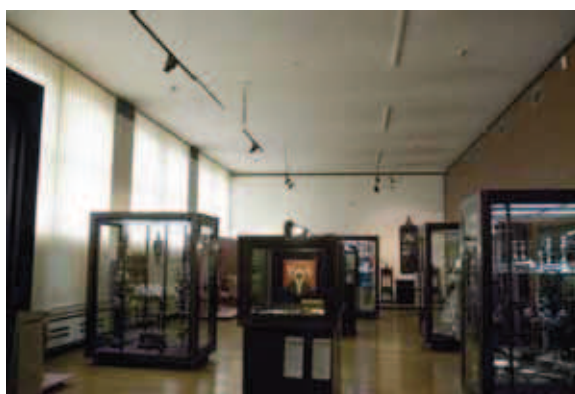
Termogramy wykonane dla danego obiektu łączono, uzyskując obrazy rozkładu temperatury, bardziej czytelne i wygodne do interpretacji. Skalowanie i mozaikowanie obrazów termalnych wykonano z użyciem programu Adobe Photoshop. Do powtórnego próbkowania obrazów (ang. *resampling*) wybrano metodę najbliższego sąsiada, ponieważ tylko ona zachowuje takie jasności, jakie wystąpiły w obrazie pierwotnym.

3. TERMIKA KLIMATYZOWANEJ SALI MUZEALNEJ

Zadaniem systemu klimatyzacji jest utrzymanie w salach muzealnych odpowiedniej wilgotności względnej powietrza, przy możliwych pewnych wahaniami temperatury.

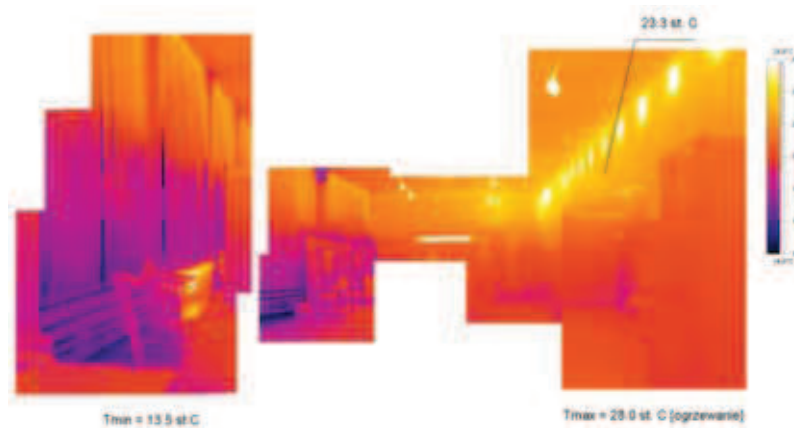
W badanej sali muzealnej odpowiednią temperaturę w porze zimowej zapewnia w 80% centralne ogrzewanie i w 20% klimatyzacja. Centralne ogrzewanie stanowią kaloryfery umieszczone w dolnej części ścian – pod oknami; bez możliwości automatycznego sterowania. Sterowanie jest wykonywane ręcznie; niektóre kaloryfery są wyłączone a inne włączone. Okna są dwuszybowe typu szwedzkiego, niektóre nieszczelne. Wszystkie okna są zasłonięte żaluzjami pionowymi.

Klimatyzacja w budynku działa niezależnie w trzech strefach; wschodniej, północnej i zachodniej. Każda strefa obejmuje wszystkie kondygnacje budynku. Klimatyzacja nastawiona jest na utrzymanie stałej wilgotności w budynku na poziomie około 50%. System klimatyzacji w każdej strefie pobiera 10÷15% powietrza z zewnątrz a pozostała część pochodzi z pobranego z sal i oczyszczonego przez rotor, gdzie następuje odzysk wilgoci. Parametrami sterującymi są: wilgotność bezwzględna – mierzona w maszynowni i temperatura tak dobierana, aby wilgotność względna w pomieszczeniach była na ustalonym poziomie (około 50%). Nawiewne kratki klimatyzacji umieszczone są pod sufitem a wywiewne na dole w ścianie naprzeciw okien. Dobowe zmiany temperatury powietrza w systemie klimatyzacji mierzone są w maszynowni i nie przekraczają 3°C. W każdym pomieszczeniu mierzona jest wilgotność względna i temperatura powietrza, ale ma ona charakter tylko informacyjny a nie sterujący. W przypadku dużych odchylenia od wartości pożądanymi możliwa jest ręczna regulacja klimatyzacji.

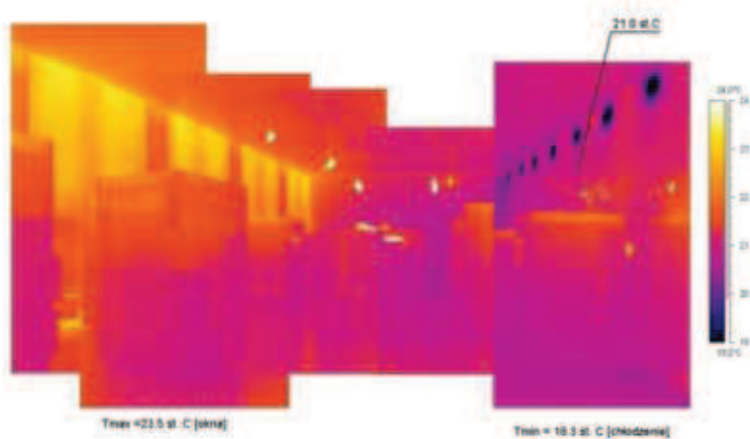


Rys. 1. Fotografia sali wystawowej muzeum: po lewej stronie okna zasłonięte żaluzjami, na ścianie po prawej u góry kratki nawiewne klimatyzacji

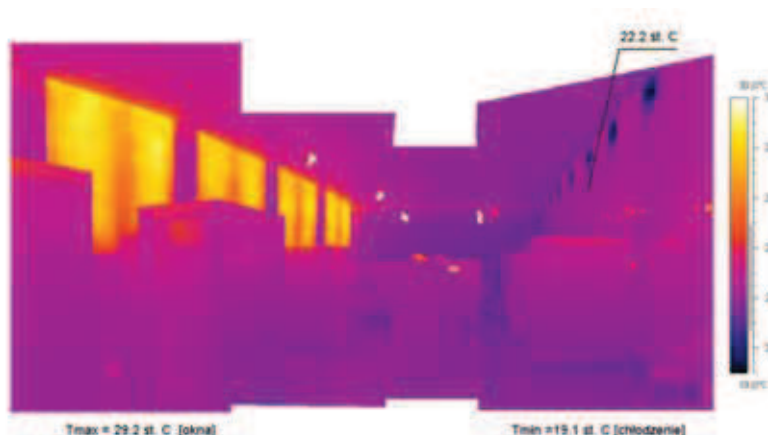
Rzeczywisty rozkład temperatury na powierzchni ścian sali wystawowej muzeum (rys. 1) uzyskany techniką termografii przedstawiony jest na rysunkach 2, 3 i 4. Należy zwrócić uwagę na niską temperaturę dolnej części ściany z oknami w porze zimowej. Przy niskich temperaturach powietrza zewnętrznego wewnętrzna powierzchnia ścian i okien może mieć temperaturę niższą od temperatury punktu rosy powietrza w pomieszczeniu. Możliwe są wtedy wykroplenia na powierzchni ścian lub naroży czy też nadproży nad oknami. Dlatego też, z uwagi na ochronę samego budynku, należy zwracać uwagę nie tylko na temperaturę i wilgotność powietrza, ale także na temperaturę powierzchni ścian i okien. W obszarze sali muzealnej występują duże gradienty temperatury, o wartości około 10°C. Gradienty te nie są zauważane przez system kontroli temperatury, ponieważ stanowi go jeden czujnik na sali, umieszczony na środku ściany przeciwległej do okien, w dodatku zakryty gablota.



Rys. 2. Rozkład temperatury w sali wystawowej muzeum w dniu 20.03.2008r. o godz.11:30 przy temperaturze zewnętrznej 0°C



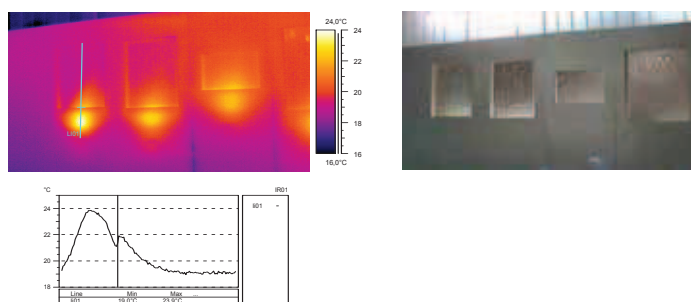
Rys. 3. Rozkład temperatury w sali wystawowej muzeum w dniu 30.07.2008r. o godz.11:00 przy temperaturze zewnętrznej 25°C



Rys. 4. Rozkład temperatury w sali wystawowej muzeum w dniu 30.07.2008r. o godz.15:45 przy temperaturze zewnętrznej 29°C

4. ŹRÓDŁA CIEPŁA A TEMPERATURA EKSPONATÓW.

Zasadniczo źródła ciepła znajdujące się w salach muzealnych służą do utrzymania odpowiedniej temperatury powietrza. Oprócz tego w salach muzealnych występuje wiele innych źródeł ciepła: lampy, urządzenia elektryczne, światło słoneczne docierające przez okna. Umieszczane bywają w różny sposób w stosunku do eksponatów: wewnątrz gablot, na zewnątrz gablot, w pobliżu pojedynczych eksponatów. Źródła światła są włączane na czas przeznaczony do zwiedzania; to włączanie i wyłączenie powoduje cykliczne, często nierównomierne, zmiany temperatury na powierzchni eksponatów. Temperatura eksponatów jest uzależniona od temperatury i prędkości otaczającego je powietrza oraz temperatury promieniowania powierzchni otaczających. Średnią temperaturę promieniowania należy określić uwzględniając wpływ promieniowania poszczególnych powierzchni pomieszczenia.

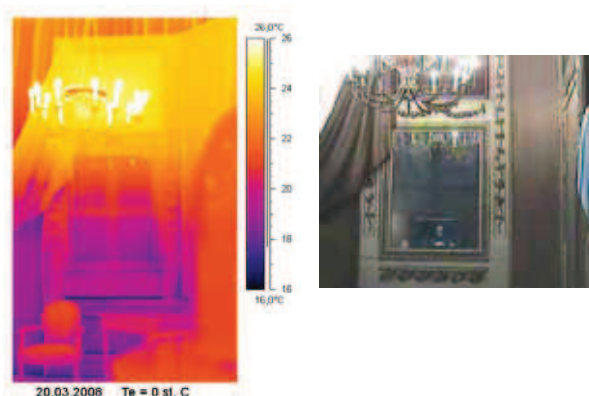


Rys. 5. Witraże podświetlone z bliskiej odległości, 25.01.2008

Gradient temperatury na powierzchni witraża przedstawionego na rysunku 5 wynosi 3°C i zmienia się po każdorazowym włączeniu i wyłączeniu oświetlenia. Czynnikiem ważnym dla postępu stopnia zniszczenia witraża jest częstotliwość występujących gradientów temperaturowych. Im będą one częstsze, tym deterioracja

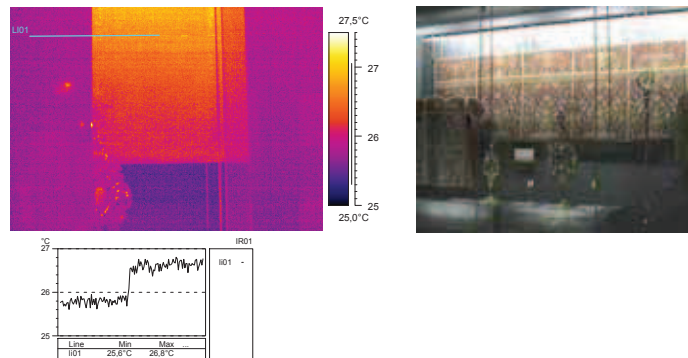
głębsza (Greiner-Wrona, 1999, 2004) Szybkość korozji jest uzależniona od temperatury bezwzględnej (Prawo Arrhenius'a). A więc podwyższenie temperatury na powierzchni witraża będzie miało wpływ na zmiany powstające na szkle. Zmiany te będą również zależeć od rodzaju szkła, jak też stanu zachowania jego powierzchni (Greiner-Wrona, 2004).

Badania termograficzne ekspozycji łączonej, tzn. złożonej z różnych obiektów, wykazują duże zróżnicowanie temperatury w jej obrębie. Temperatura obiektów przedstawionych na rysunku 6 zawiera się w granicach od 18 °C w dolnej części lustra, do 25 °C w pobliżu żyrandola. Wynika to z emisji ciepła od żyrandola w górnej części ekspozycji i „emisji zimna” od powierzchni okna w dolnej części, bowiem ekspozycja jest ustawiona na tle dużego okna sali wystawowej. Zauważyć daje się pewne związki pomiędzy temperaturą i korozją lustra widocznego na rysunku 6. Tam gdzie temperatura powierzchni lustra jest wyższa, stopień korozji jest niższy (ciemniejszy obszar w kształcie krzyża na zdjęciu fotograficznym). Oddziaływanie ciepła od żyrandola nie jest również obojętne dla gobelinów czy innych materiałów zdobiących ścianę.

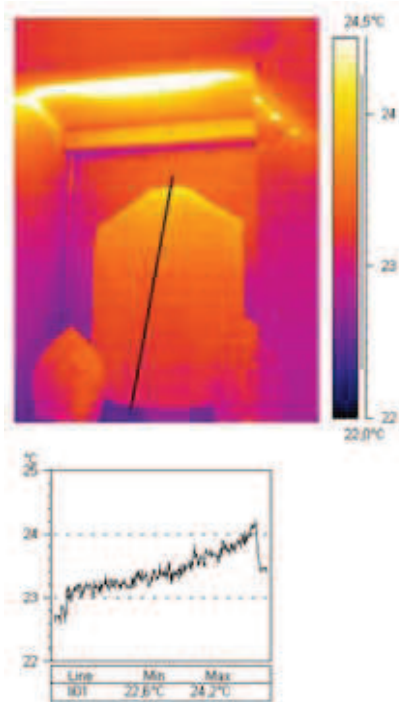


Rys. 6. Termogram ekspozycji łączonej

Wiele eksponatów znajduje się w gablotach. Gablota jako pomieszczenie zamknięte, nie wentylowane jest źródłem kolejnych problemów. Sama gablota poddaje się wpływowi czynników zewnętrznych (Greiner-Wrona *at al.*, 2008) i tworzy własny mikroklimat. Oświetlenie umieszczone wewnątrz gablot jest źródłem ciepła. Jeśli gablota nie umożliwia odprowadzenia ciepła, to następuje podwyższenie temperatury powietrza w gablocie, co widoczne jest na rysunku 7. Równocześnie światło powoduje wzrost temperatury oświetlanych eksponatów na drodze promieniowania. Dzięki badaniom termograficznym można zaobserwować zróżnicowaną temperaturę na powierzchni eksponatu umieszczonego w gablocie i oświetlanego z bliskiej odległości od góry (rys. 8). Zjawisko takie obserwuje się w gablocie z szatami liturgicznymi, bardzo bogato dekorowanymi metalowymi nićmi, które szybciej się nagrzewają i akumulują więcej ciepła niż w pozostałych częściach szaty. Wskutek tego cały obiekt będzie ulegał zróżnicowanej deterioracji. Dla zróżnicowanych materiałów obiektów jest to bardzo ważne. Niektóre eksponaty z uwagi na specyfikę materiału powinny mieć zapewnioną niższą temperaturę (Brzozowska-Jabłońska, 1996)



Rys. 7. Termogram gabloty otwartej w środkowej części – temperatura eksponatu wewnątrz gabloty jest wyższa od temperatury w sali



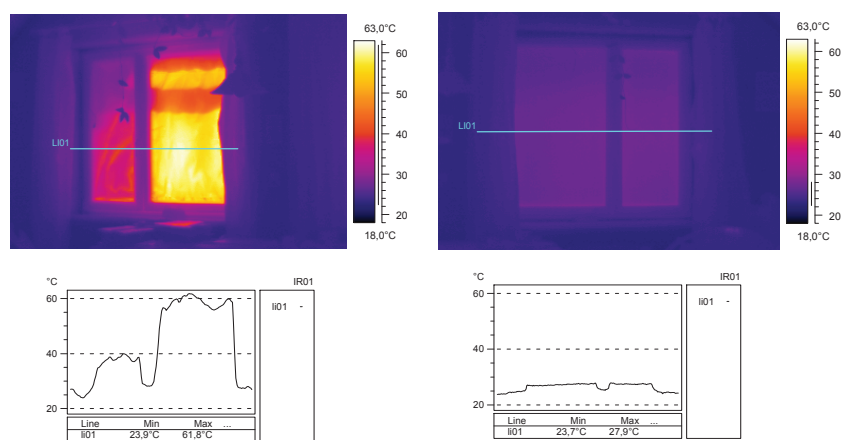
Rys.8. Gradient temperatury na powierzchni ornatu oświetlonego z góry (z bliska)

5. OKNA JAKO ŹRÓDŁA CIEPŁA

Niepożądanym w porze letniej źródłem ciepła są okna. Okna w salach muzealnych zasłania się by ograniczyć światło słoneczne. Nie zawsze ograniczenie światła jest równoznaczne z ograniczeniem ciepła dostarczanego przez światło słoneczne. Ograniczenie światła słonecznego uzyskuje się przez stosowanie: rolet i żaluzji

zewnątrznych, naklejania folii (białych lub czarnych) po wewnętrznej stronie szyby, zasłon wewnętrznych. Na rysunku 9 pokazane są efekty cieplne po wewnętrznej stronie okien, w których na różne sposoby ograniczono promieniowanie słoneczne.

Obserwowane okna znajdują się obok siebie na południowej ścianie budynku. Ograniczenie przenikania światła słonecznego do pomieszczenia uzyskano w następujący sposób: okno widoczne na rysunku 9 po lewej stronie zasłonięto od wewnętrznej strony białym papierem (lewa szyba) i czarną folią (prawa szyba); natomiast okno prawe zasłonięto od zewnętrznej strony płócienną roletą. Termograficzne obserwacje przeprowadzono 18. sierpnia o godzinie 12, w słoneczny dzień, przy temperaturze powietrza zewnętrznego w cieniu wynoszącej 21.0°C. Temperatura wewnątrz pomieszczenia wynosiła około 24.0°C.



Rys. 9. Temperatura wewnętrznej powierzchni okna na południowej ścianie o godz. 12:00; 18.08, przy temperaturze na zewnątrz 21.0°C

Z termogramów pokazanych na rysunku 9 wynika, że wszelkie ograniczenia światła słonecznego przenikającego przez okna, stosowane od wewnętrznej strony tj. zasłony, zaciemnienia, nie spełniają dobrze swojego zadania. Biały papier częściowo ogranicza zarówno promieniowanie widzialne jak i dopływ ciepła. Natomiast czarna folia nie przepuszcza promieniowania widzialnego, ale przenika przez nią ciepło. Ciepło to przyczynia się do podniesienia temperatury powietrza w sali a dodatkowo podgrzewa na drodze promieniowania eksponaty będące w jego zasięgu. Dopływ ciepła przez okna skutecznie ogranicza stosowanie zewnętrznych przesłon: rolet, okiennic itp.

6. WNIOSKI

1. Badania termowizyjne umożliwiają pomiary temperatury powierzchni obiektów zabytkowych, które rozszerzają informacje o temperaturach otrzymanych z badań punktowych prowadzonych często w sposób automatyczny w salach muzealnych. Automatyczne systemy pomiaru i archiwizacji danych klimatu w salach muzealnych dotyczą parametrów powietrza (temperatury i wilgotności), natomiast bardzo ważna jest znajomość temperatury eksponatów, która w pewnych warunkach ekspozycji może znacznie różnić się od temperatury powietrza. Przeprowadzone badania

wykazały że różnice te są znaczne i wartości temperatur znacznie odbiegają od wartości optymalnych dla zachowania fizycznych właściwości eksponatów.

2. Technika termograficzna pozwala traktować globalnie problem rozkładu temperatury w salach wystawowych i wskazać lokalne gradienty temperaturowe zarówno sal jak i powierzchni samych eksponatów. Gradienty te są odpowiedzialne za rozwój korozji.
3. Regularne pomiary i dokumentowanie zmian wartości temperatury eksponatów pozwolą na poznanie przyczyny zmienności warunków mikroklimatu w muzeach i służyć mogą do podjęcia działań mających na celu poprawę warunków przechowywania i eksponowania cennych zabytkowych przedmiotów.
4. Badania doświadczalne i ich dokumentowanie mogą przyczynić się do wyboru optymalnych sposobów stabilizowania mikroklimatu w obiektach muzealnych i zabytkowych.

Pracę niniejszą wykonano w ramach projektu badawczego nr 3T 08DO 2730 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

7. LITERATURA

Brzozowska-Jabłońska M., 1996. Warunki wieczystego przechowywania archiwaliów, ARCHEION, t. XCVI, Warszawa.

Greiner-Wronowa E., 1999. Szklane sensory dla ochrony zabytków. Praca doktorska AGH, Kraków.

Greiner-Wronowa E., 2004. Korozja Szkła Zabytkowych. CERAMIKA Kraków PAN. Vol. 85. s.22-36 i 115-121.

Greiner-Wronowa E., Pusoska A., Wrona J., 2008. Thermovision as a complementary method for analyses: museum parameters for the preservation of glass objects. Proc. of the VIII-th conf. *On Non-Destructive Testing of Art*, Jerosolima. The e-Journal and Database of Nondestructive Testing -ISSN 1435 - 4934.

Naredi – Rainer P., 2008. Bezpieczeństwo, klimatyzacja i oświetlenie. Tłumaczenie, http://www.artmuseum.waw.pl/dorobek/bezpieczenstwo_klimatyzacja_i_oswietlenie.pdf

MEASURING TEMPERATURE OF HISTORICAL OBJECTS BY MEANS OF THERMOGRAPHY

KEYWORDS: thermography, temperature, historical objects, corrosion, museum climate, cultural heritage

Summary

Historical objects are stored and exhibited in specially designed museum buildings. Those buildings are designed and built to provide a climate most appropriate for those objects. Sometimes historical objects are exhibited in historical buildings. As those not always are air-conditioned, they can hardly ensure optimal temperature and humidity for the objects. In addition, temperature and humidity are highly dependent on multiple external factors.

In museum halls, the natural light is usually limited because of its unfavourable effects on the objects shown and artificial light is used instead.

Daily and seasonal changes of temperature, the changing sunlight intensity, and the varying number of visitors make it hard to maintain constant conditions even in air-conditioned halls. Therefore, additional passive operations have to be performed and may include shading of the windows as well as installing additional barriers and constructions. They greatly reduce the load put on the air conditioning system.

When measuring temperature of the exhibited objects, it is important that the measurement not be limited to the temperature of the object only. Instead, all the factors that contribute to temperature of a given object should be analysed. These factors include: the temperature of the surrounding air, the temperature of room walls, illumination, construction of the exhibition cabinets, and various heat sources close to the exhibited objects.

Thermography can be used for the analysis of exhibition halls. A single major advantage of the technique is that it provides a visual image of temperature distribution on surfaces of objects observed.

The paper presents results of a thermographic analysis of exhibition rooms and exhibited historical objects.

Several factors were analysed in greater detail:

- uniformity of temperature distribution in the exhibition halls in relation to the time of the day and the season of the year;
- various methods for shading of the windows and their effect on temperature of the windows (and hence amount of heat transferred);
- relationship between illumination of the objects exhibited and their temperature;
- detection and documentation of heat sources near the objects exhibited.

Experiments and analyses may prove helpful in the selection of optimal methods for stabilizing the microclimate in museum and historical exhibitions.

dr inż. Alina Wróbel
e-mail: alibel@agh.edu.pl
tel. +126172269

dr inż. Elżbieta Greiner-Wronowa
e-mail: egrwrona@agh.edu.pl
tel. +126172481