Dariusz Wilk, Łukasz Bratasz, Piotr Frączek, Michał Obarzanowski,
Anna Klisińska-Kopacz, Janusz Czop

Konstrukcja i zastosowanie ram mikroklimatycznych w Muzeum Narodowym w Krakowie

Construction and use of microclimatic frames in the National Museum in Krakow

1. Wstęp

Dzieła sztuki malarstwa tablicowego, polichromowanej rzeźby drewnianej oraz malarstwa ściennego dekorującego zabytki architektury drewnianej stanowią bardzo ważną część europejskiego dziedzictwa kulturowego. Dzieła tego typu są wrażliwe na fluktuacje parametrów mikroklimatu, które mogą prowadzić do deformacji i uszkodzeń mechanicznych drewna, warstwy zaprawy i powłoki malarskiej. Najistotniejszym parametrem mikroklimatycznym, odpowiedzialnym za pojawianie się wymienionych zagrożeń, jest wilgotność względna, ponieważ drewno jest materiałem higroskopijnym, który chłonie lub oddaje parę wodną w zależności od zmian wilgotności względnej otaczającego go powietrza powodując jego pęcznienie lub skurcz[1]. Zmiany temperatury powietrza są znacznie mniej istotne, ponieważ drewno charakteryzuje się niewielką rozszerzalnością cieplną oraz zawartość wody w drewnie zależy również w niewielkim stopniu od temperatury[2].

W odpowiedzi na istniejące zagrożenia opracowano konserwatorskie strategie ochrony zbiorów. Ich podstawą jest możliwie precyzyjna stabilizacja warunków mikroklimatycznych. Jednakże zazwyczaj dzieła sztuki są przechowywane w zabytkowych budynkach, w których kontrola tych warunków jest bardzo trudna, a długookresowa stabilność mikroklimatu jest daleka od oczekiwań[3]. Problem ten także dotyczy nowoczesnych muzeów wyposażonych w centralne systemy klimatyzacji z powodu ich ograniczonej wydajności, w szczególności w okresach zimowych, oraz ich nieuniknionych awarii. Ze stosowa-

1. Introduction

Masterpieces of panel painting, polychrome wooden sculpture and wall painting which decorate historic wooden architecture constitute an essential part of European cultural heritage. Such works of art are sensitive to fluctuations of microclimatic parameters which can lead to deformation or mechanical damage to wood, ground layer or coat of paint. The most crucial microclimatic parameter, responsible for the appearance of the above mentioned dangers is relative humidity, because wood is a hygroscopic material which absorbs or emits water vapour, depending on changes of relative humidity in the surrounding air, causing it to swell or shrink[1]. Changes in air temperature are much less important, because wood is characterised by low thermal expansion, and the content of water in wood depends on temperature only to a very limited degree[2].

In response to the existing dangers, conservation strategies for collection protection have been worked out. They are based on a possibly precise stabilisation of microclimatic conditions. However, works of art are commonly kept in historic buildings in which controlling those conditions is very difficult and long-term stability of microclimate is below expectations[3]. The issue also concerns modern museums equipped with central air-conditioning systems because of their limited efficiency, particularly in winter periods, as well as their unavoidable breakdowns. The use of air-conditioning systems is connected with the high cost of their installation and exploitation. Because of that passive means

Praca dopuszczona do druku po recenzjach *Article accepted for publishing after reviews*

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

niem systemów klimatyzacji wiążą się także wysokie koszty ich instalacji oraz eksploatacji. W związku z tym coraz powszechniej stosuje się pasywne sposoby ochrony, a jednym z nich jest umieszczenie obiektów wrażliwych w ramach mikroklimatycznych[4].

Ramy mikroklimatyczne są specjalnie skonstruowanymi obudowami dla dzieł sztuki. W odróżnieniu od zwykłych gablot ekspozycyjnych mających na celu ochronę przed działaniem ludzi, głównie kradzieżą i wandalizmem, podstawowym celem ram mikroklimatycznych jest zabezpieczenie obiektów przed uszkodzeniami fizycznymi powodowanymi szkodliwym działaniem mikroklimatu. Następuje to poprzez stworzenie autonomicznej przestrzeni, odizolowanej od warunków mikroklimatycznych panujących w sali ekspozycyjnej lub magazynie muzeum. Szczelne ściany ramy mikroklimatycznej, nie dopuszczając do wymiany powietrza, tworzą barierę dla transportu wilgoci[5]. W ten sposób krótkoterminowe, nawet wysokie zmiany wilgotności względnej w muzeum praktycznie nie mają wpływu na wilgotność względną wewnątrz ramy.

Stosowanie ram mikroklimatycznych wiąże się z dodatkowymi korzyściami, takimi jak:
- ochrona przed zabrudzeniem,
- ograniczanie napływu zanieczyszczeń zewnętrznych,
- zabezpieczenie przed uszkodzeniami mechanicznymi, które mogą wystąpić w trakcie ekspozycji lub transportu.

Podobnie jak gabloty, ramy mikroklimatyczne pozwalają także na zabezpieczenie obiektu przed działaniem ludzi, jednak co ważne podkreślenia, w przeciwieństwie do klasycznych gablot są one trwale zintegrowane z obiektem, dzięki czemu chronią go w sposób ciągły. Ponadto są rozwiązaniem tanim oraz energooszczędnym[6]. Są one stosowane powszechnie od lat 90. XX wieku w wielu muzeach i instytucjach, w których eksponowane są cenne dzieła sztuki, m. in. Rijksmuseum w Amsterdamie, Victoria & Albert Museum w Londynie, Tate Britain w Londynie, Metropolitan Museum of Art w Nowym Jorku, Statens Museum for Kunst w Kopenhadze oraz Nasjonalmuseet for Kunst, Arkitektur og Design w Oslo.

Ramy mikroklimatyczne wydają się być prostym środkiem podniesienia poziomu ochrony dzieł sztuki wykonanych z drewna podczas ich ekspozycji oraz przechowywania w muzeach. Chociaż podstawowa zasada konstrukcji ramy klimatycznej pozostaje zawsze taka sama, to poszczególne instytucje opracowały swoje projekty, różniące się między sobą. Muzeum Narodowe w Krakowie (MNK) przygotowało uniwersalną konstrukcję ramy, której wykonanie jest możliwe przez personel muzeum. W toku przeprowadzonych badań zweryfikowano skuteczność jej długookresowego działania w warunkach muzealnych dla rzeczywistego obiektu. Ponadto przeprowadzono ocenę zagrożeń związanych ze stosowaniem ram, a w szczególności potencjalnego ryzyka związanego z kondensacją wilgoci wewnątrz ramy.

2. Konstrukcja ramy mikroklimatycznej

Aby zrealizować opisane wyżej wymagania, konstrukcja ramy mikroklimatycznej, w szczególności dla obra-

of protection have been more commonly used recently, and placing sensitive objects in microclimatic frames is one of them[4].

Microclimatic frames are specially constructed cases for art masterpieces. In contrast to ordinary display cases meant to protect their content from the activity of men, mainly theft and vandalism, the essential purpose of a microclimatic frame is protecting artefacts against physical damage caused by harmful impact of microclimate. It is achieved by creating an autonomic space, isolated from the microclimatic conditions prevailing in the exhibition room or a museum storeroom. Tight walls of a microclimatic frame, not allowing for air exchange, create a barrier for incoming moisture[5]. In this way short-term, even considerable changes in relative humidity in a museum practically do not affect the relative humidity inside the frame.

Application of microclimatic frames involves additional benefits, such as:
- protection from dirt,
- limiting the inflow of external pollution,
- protection against mechanical damage which could occur during exhibition or transport.

Similarly to display cases, microclimatic frames also allow for protecting the object against the activity of man but, what is worth emphasising, in contrast to classical showcases, they are permanently integrated with the object owing to which they protect it in a continuous way. Moreover, they are a cheap and energy-saving solution[6]. They have been commonly used since the 1990s in numerous museums and institutions where valuable works of art are exhibited, e. g. Rijksmuseum in Amsterdam, Victoria & Albert Museum in London, Tate Britain in London, Metropolitan Museum of Art in New York, Statens Museum for Kunst in Copenhagen and the Nasjonalmuseet for Kunst, Arkitektur og Design in Oslo.

Microclimatic frames seem to be a simple measure to increase the level of protection of art masterpieces made from wood during their exhibition or storage in museums. Although the elementary principle of construction of a microclimatic frame always remains the same, particular institutions prepared their own different projects. National Museum in Krakow (NMK) prepared a universal construction of a frame which can be made by the museum staff. During the conducted research the effectiveness of its long-term functioning in museum conditions for a real object was verified. Moreover, evaluation of dangers resulting from using the frames was carried out, and particularly of potential risk connected with condensation of moisture inside the frame.

2. Construction of a microclimatic frame.

To realize the above described requirements, the construction of a microclimatic frame, particularly for paintings on wooden ground, should meet the following conditions:
- should be rigid and resilient, to lift the object and the glass pane safely,
- the pane constituting a barrier protecting the face should be made from glass: glued, colourless, with

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

zów na podłożu drewnianym, powinna spełniać następujące warunki:

- powinna być sztywna i wytrzymała, aby bezpiecznie unieść obiekt oraz szybę,
- szyba stanowiąca barierę od strony lica powinna być wykonana ze szkła klejonego, bezbarwnego, o najwyższym stopniu ochrony przed promieniami UV oraz posiadać powłokę antyrefleksyjną,
- zaplecek, który zamyka ramę od strony odwrocia, powinien być wykonany z przezroczystego materiału,
- materiały użyte do budowy ramy powinny zapewniać jej szczelność, a jednocześnie powinny być stabilne chemicznie i fizycznie.

Ze względu na różny sposób oprawy obrazów na podłożu drewnianym można wyróżnić dwa zasadnicze typy konstrukcji ram mikroklimatycznych:

- budowane od podstaw,
- budowane na bazie oryginalnych ram obrazów.

2.1. Rama mikroklimatyczna budowana od podstaw

Tego typu konstrukcję stosuje się dla obrazów nieposiadających ramy, albo dla obiektów posiadających zintegrowaną ramę z drewnianym podobraziem. Jest to typowe m.in. dla malarstwa tablicowego, kwater ołtarzowych, obrazów epitafijnych lub relikwiarzowych, w których często bogato zdobiona rama i obraz stanowią całość. Rama mikroklimatyczna musi w takich przypadkach stanowić „obudowę" dla całego obiektu. Wymusza to konieczność wykonania samonośnej konstrukcji ramy, w której umieszczony zostanie obiekt.

Rama mikroklimatyczna tego typu może mieć formę „klasycznej" ramy z felcem zachodzącym na obiekt (głównie dla obrazów nieposiadających swoich ram, ryc. 1) bądź formę „gabloty", która umożliwia ekspozycję całego obiektu (głównie dla obrazów ze zintegrowaną ramą, ryc. 2).

W prototypowej ramie mikroklimatycznej MNK ściany wykonano z sezonowanego, klejonego drewna lipowego. Narożniki połączono przy użyciu pióra obcego, dodatkowo wzmacnianego metalowymi łącznikami. Głębokość ramy uwzględniała grubość obiektu, wygodny i bezpieczny sposób jego montażu, grubość szyby i zaplecka, a także dystans pomiędzy szybą a licem obiektu oraz odwrociem a zapleckiem. Wymiary wewnętrzne ramy zostały tak dobrane, aby zapewnić swobodny i bezpieczny montaż obrazu z uwzględnieniem dystansu po bokach, umożliwiającego ewentualną pracę deski podobrazia. Wymiary zewnętrzne oraz profil ramy są kwestią dowolną, dopasowuje się je indywidualnie do charakteru każdego obiektu.

W felc ramy wmontowano szybę zespoloną typu Mirogard Protect firmy Schott. Najmniejsza dostępna grubość tafli szyby to 4,4 mm. Szybę przyklejono do felcu przy użyciu bezbarwnego silikonu nr 3145 RTV MIL-A-46146 firmy Dow Corning. Wnętrze ramy wyklejone jest samoprzylepną taśmą aluminiową nr 425 firmy 3M, w taki sposób, że taśma zachodzi również częściowo na powierzchnię szkła. Szerokość tej zakładki wynika z szerokości felcu, która nie powinna być mniejsza niż 1 cm. Taśma aluminiowa uniemożliwia emisję do wnętrza ramy szkodliwych związków chemicznych pochodzących

the highest factor of protection from UV radiation and should have anti-reflective coating,

- backside which closes the frame from the reverse, should be made from a transparent material,
- materials used for building the frame should ensure its tightness and at the same time should be physically and chemically stable.

Because of varying manners of framing pictures painted on wooden ground, two basic types of construction of microclimatic frames can be distinguished:

- built from scratch,
- built on the basis of original picture frames.

2.1. A microclimatic frame built from scratch

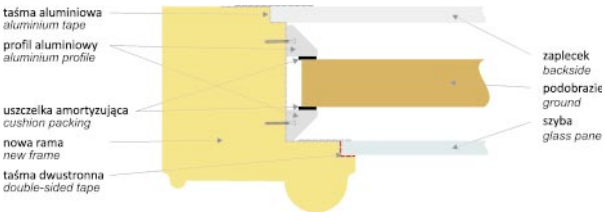
Constructions of such type are used either for paintings which do not have their own frame, or for objects which have frames integrated with the wooden ground. It is typical for e.g. panel painting, altarpieces, epitaph or reliquary paintings, in which the richly decorated frame and the painting frequently constitute a whole. Microclimatic frame must in such cases become a "casing" for the entire object, which demands building a self-supporting frame construction in which the object will be placed.

Microclimatic frames of that type can be in the form of a "classical" frame with rabbet overlapping the object (mainly for paintings not having their own frames) (fig. 1), or the form of a "showcase" which allows for exhibiting the entire object (mainly for paintings with integrated frames) (fig. 2).

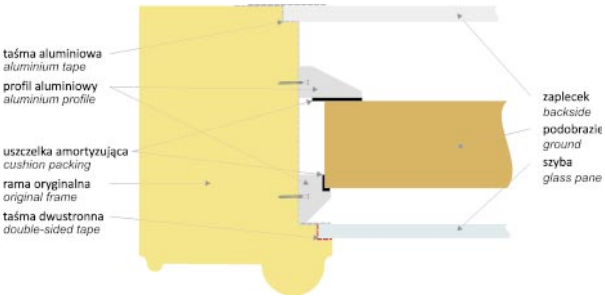
In a prototype microclimatic frame NMK sides were made from seasoned, glued lime wood. Corners were joined using slip feather, additionally reinforced with metal łącznikami. The depth of the frame took into account: thickness of the object, comfortable and safe manner of its assembly, pane and backside thickness, as well as distance between the pane and the face of the object, and between the reverse and the backside. Inside dimensions of the frame were selected in such a way as to ensure free and secure assembly of the painting which would take into account the gaps on the sides allowing for possible workings of the ground panel. Outer dimensions and the frame profile are a question of choice, as they can be individually selected to match the character of each object.

The laminated glass pane of the Mirogard Protect type produced by Schott was fitted into the frame rabbet. The lowest available thickness of the glass pane measured 4.4 mm. The glass pane was glued to the rabbet using colourless silicon no 3145 RTV MIL-A-46146 made by Dow Corning company. The interior of the frame is lined with a self-adhesive aluminium tape no 425 made by 3M company, in such a way that the tape also partially overlaps the surface of the glass. The width of the overlap results from the width of the rabbet which should not be lower than 1 cm. The aluminium tape prevents harmful chemical compounds coming from the wooden construction from penetrating into the interior of the frame and lessens moisture permeability. Additionally it strengthens the way of mounting the glass pane. Cushion pads made from

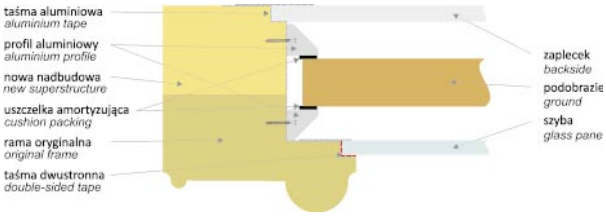
BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Ryc. 1. Przekrój przez ramę mikroklimatyczną budowaną od podstaw z felcem zachodzącym na obiekt
Fig. 1. Cross-section of a microclimatic frame built from scratch with rabbet overlapping the object



Ryc. 2. Przekrój przez ramę mikroklimatyczną budowaną od podstaw (dla obiektu ze zintegrowaną ramą)
Fig. 2. Cross-section of a microclimatic frame built from scratch (for an object with an integrated frame)



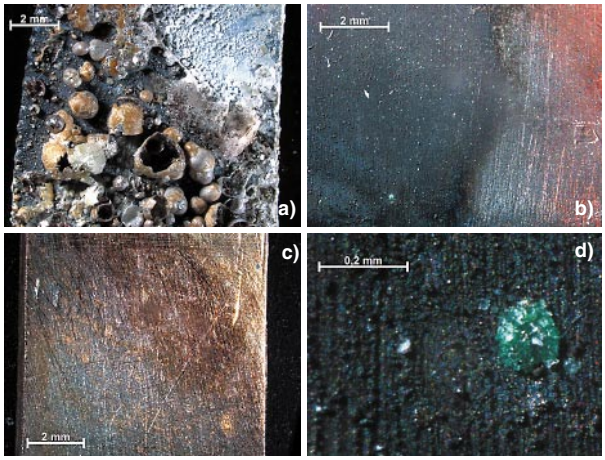
Ryc. 3. Przekrój przez ramę mikroklimatyczną budowaną na bazie istniejących oryginalnych ram (rama oryginalna wraz z nową nadbudową)
Fig. 3. Cross-section of microclimatic frame built on the basis of the already existing frame (original frame with the new superstructure)



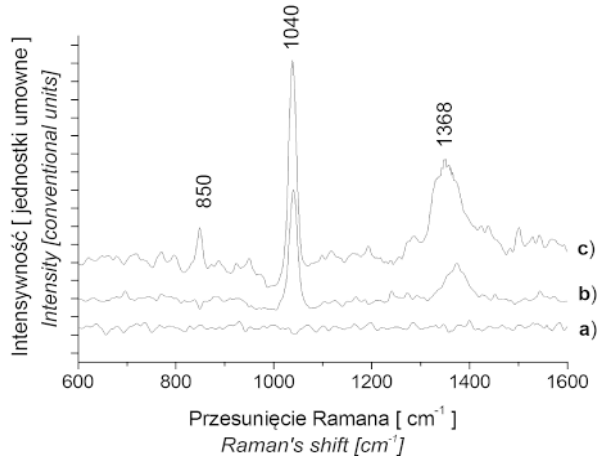
Ryc. 4. Rama mikroklimatyczna bazująca na istniejącej ramie w trakcie konstruowania
Fig. 4. Microclimatic frame based on an existing frame during construction



Ryc. 5. Zestaw do przeprowadzania testów Oddy'ego na materiałach stosowanych do budowy ram mikroklimatycznych w MNK
Fig. 5. A set for conducting Oddy tests on materials used for building microclimatic frames in NMK



Ryc. 6. Zdjęcia mikroskopowe (powiększenie 100 x) płytek testowych po testach Oddy'ego płyty MDF: a) ołowianej, b) srebrnej, c) i d) miedzianej – z widocznymi zmianami
Fig. 6. Microscope photos (magnified 100 x) of test coupons after Oddy's tests of MDF board: a) lead, b) silver, c) and d) copper with visible changes



Ryc. 7. Widmo Ramana otrzymane dla płytek ołowianych: a) kontrolnej, b) umieszczonej w obecności płyty MDF, c) umieszczonej w obecności gumy Neopren
Fig. 7. Raman spectrum obtained for lead plates: a) control sample, and in the presence of b) MDF and c) Neoprene rubber

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

z drewnianej konstrukcji oraz zmniejsza przepuszczalność wilgoci. Dodatkowo wzmacnia także sposób osadzenia szyby. Aby obraz nie przylegał do szkła, w ramie umieszczono wkładki dystansowe, które wykonano z drewnianych listew oklejonych taśmą aluminiową. Sposób zamocowania obrazu w ramie nie odbiegał od systemów oprawiania powszechnie stosowanych w muzeach. W tym celu najczęściej stosuje się sprężyste blaszki, które punktowo dociskają odwrocie obrazu. W prototypowej ramie mikroklimatycznej wykorzystano system profili firmy Bosch-Rexroth (o wymiarach 20 × 20 mm, nr katalogowy: 3 842 992 888), który daje możliwość dowolnej zmiany pozycji elementów dociskających obraz.

Ramę od strony odwrocia zamknięto zapleckiem, wykonanym z przezroczystego poliwęglanu komórkowego o grubości 0,5 cm. Daje to możliwość kontroli odwrocia obrazu bez konieczności otwierania ramy. W drewnianej konstrukcji ramy wykonano zagłębienie o grubości poliwęglanu, w które włożono zaplecek, a następnie jego krawędzie zaklejono szczelnie taśmą aluminiową. System zawieszenia obrazu został odpowiednio wzmocniony ze względu na masę obiektu wraz z ramą. Na odwrociu zamkniętej ramy umieszczono informację o dacie zamknięcia i ostrzeżeniem przed otwieraniem, podobnie jak to jest przyjęte w praktyce Rijksmuseum. Opisywana konstrukcja daje również możliwość budowy ram dla bardziej skomplikowanych czy nietypowych obiektów (np. obrazy dwustronne).

2.2. Rama mikroklimatyczna budowana na bazie oryginalnej ramy obrazu

Konstrukcja prototypowej ramy mikroklimatycznej bazowała na zaadaptowanej oprawie obrazu (ryc. 3 i 4). W większości przypadków oryginalne ramy, jak również i wtórne, spełniają wszystkie warunki, aby przy niewielkiej ingerencji w ich strukturę wykonać na ich bazie ramy mikroklimatyczne. Przede wszystkim należy ocenić wytrzymałość konstrukcyjną istniejącej ramy, a szczególnie stan zachowania drewna i sposób łączenia listew w narożnikach. Jest to istotne ze względu na znaczny ciężar szyby o grubości 4,4 mm, której 1 m^2 waży 11 kg. Najczęściej rama wymaga wzmocnienia narożników, co wykonuje się przez dokręcenie do odwrocia blaszek kątowych. Montaż szyby w felcu oraz zaplecka na odwrociu wymuszają też najczęściej konieczność zwiększenia głębokości ramy. Do odwrocia dokleja się w tym celu drewniane listwy o odpowiedniej grubości, dzięki czemu wewnętrzna przestrzeń ramy zwiększa się tak, że możliwy jest bezpieczny montaż obrazu, przy zachowaniu dystansu do szyby, a także istnieje możliwość zamocowania zaplecka. Rodzaj szyby, sposób jej zamocowania oraz wykończenie wnętrza ramy folią aluminiową są identyczne jak w przypadku ram wykonywanych od podstaw. Taki sam jest również sposób montażu obrazu oraz zamknięcia ramy od strony odwrocia (zob. pkt 2.1).

2.3. Problem szczelności ramy

Szczelność ścian jest podstawowym warunkiem skuteczności ramy mikroklimatycznej w stabilizacji warunków mikroklimatycznych. Niewielka szczelność wyni-

wooden slats wrapped with aluminium tape were placed in the frame, so that the painting does not touch the glass. The way of mounting the picture in the frame did not differ from the framing systems commonly used in museums. For this purpose springy metal plates, which press the reverse of the painting in certain points, are most frequently applied. A system of profiles made by Bosch-Rexroth company (its size 20 × 20 mm, catalogue no: 3 842 992 888), which allows for freely altering the position of elements pressing the painting, was used in the prototype microclimatic frame.

From the reverse the frame was closed with a backside made from transparent cellular polycarbonate 0.5 cm thick. It ensures the possibility of controlling the reverse of the painting without the need to open the frame. In the wooden construction of the frame a recess as thick as the polycarbonate was made, in which the backside was fitted, and then its edges were tightly sealed with aluminium tape. The suspension system of the painting was suitably reinforced because of the increased weight of the object and the frame. Information about the closing date and a warning against opening it were placed on the reverse of the closed frame, like it is done in Rijksmuseum. The described construction also offers the possibility of building frames for more complicated or unusual objects (e.g. two-sided paintings).

2.2. Microclimatic frame built on the basis of an original picture frame

The construction of the prototype microclimatic frame was based on adapted Picture frame (fig. 3 and 4). In most cases original frames, as well as the secondary ones, meet all the conditions to serve as a basis for making microclimatic frames, with only slight interference into their structure. First of all, durability of the construction of the existing frame has to be assessed, and particularly the state of preservation of wood and the way the slats are joined in the corners. It is crucial because of the considerable weight of the glass pane 4.4 mm thick, 1 m^2 of which weighs 11 kg. Most frequently the frame corners have to be reinforced which is done by screwing angle plates to the reverse. Mounting the glass pane in the rabbet and the backside on the reverse frequently requires increasing the depth of the frame. To achieve this wooden slats of suitable thickness are glued to the reverse, due to which the internal space of the frame increases thus allowing for safe assembly of the picture, while preserving the distance from the glass, and for a possibility of fixing the backside. The kind of glass, manner of its mounting as well as lining the inside of the frame with aluminium foil, are identical as in the case of frames built from scratch. The way of assembling the picture and closing the frame from the reverse (point 2.1) also remain the same.

2.3. The problem of frame air tightness

Air tightness of the walls is the essential condition for the effectiveness of a microclimatic frame in stabilising microclimatic conditions. Low tightness results from the occurrence of holes and cracks that might be found

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

ka z występowania otworów i szczelin, jakie mogą znaleźć się w konstruowanej ramie. Jak wskazują badania naukowe[7], na szczelność mają wpływ głównie otwory oraz szczeliny o średnicach przekraczających 0,3 mm, których wyeliminowanie jest stosunkowo łatwe, np. poprzez zastosowanie folii aluminiowej. Parametrem charakteryzującym szczelność ramy jest współczynnik wymiany powietrza, który określa, ile razy ciągu doby zachodzi wymiana powietrza w badanej przestrzeni. Wyznacza się go metodą gazu znacznikowego, która polega na uwolnieniu niewielkiej ilości niereaktywnego gazu, najczęściej dwutlenku węgla lub tlenku azotu (I), w badanej objętości, a następnie pomiarze spadku jego stężenia, który w ramach mikroklimatycznych związany jest z:

– dyfuzją przez materiał, z którego wykonane są ścianki gabloty oraz szczeliny i otwory,
– wymianą powietrza powodowaną zmianami temperatury, a co za tym idzie zmianami ciśnienia,
– konwekcyjnym przepływem powietrza[8].

Na podstawie otrzymanych danych, poddanych prostej analizie matematycznej, można obliczyć współczynnik wymiany powietrza[9]. We wszystkich praktycznych przypadkach szczelność ram jest wystarczająca, gdy jej współczynnik wymiany powietrza jest mniejszy niż 1/dobę[10].

2.4. Problem kumulacji szkodliwych związków chemicznych w szczelnej ramie mikroklimatycznej

Sygnalizowanym w literaturze problemem[11], związanym ze stosowaniem szczelnych ram mikroklimatycznych, jest możliwość gromadzenia się w jej wnętrzu szkodliwych związków chemicznych, a w szczególności lotnych związków organicznych[12], które mogą wchodzić w reakcję z przechowywanym obiektem. Ich źródłem może być sam obiekt umieszczony w ramie. Jednak wieloletnie doświadczenia muzeów w stosowaniu ram mikroklimatycznych nie potwierdzają istotnego wpływu związków uwalnianych wewnątrz na stan zachowania obiektów. Co więcej, obiekty zamknięte w ramach mikroklimatycznych są często w znacznie lepszym stanie zachowania niż obiekty niezabezpieczone. Jedynie obiekty poddane zabiegom konserwatorskim umieszczone w szczelnie zamkniętych ramach emitują na tyle intensywnie lotne związki organiczne, że ich kumulacja prowadzi do przekroczenia bezpiecznych dla obiektów poziomów. Z tego względu zaleca się co najmniej 30-dniowy odstęp między zakończeniem prac konserwatorskich a umieszczeniem obiektu w ramie mikroklimatycznej, ustalany dla każdego obiektu indywidualnie.

Drugim źródłem szkodliwych związków chemicznych mogą być materiały użyte do konstrukcji ramy i dlatego powinny być one stabilne i obojętne pod względem chemicznym dla przechowywanego obiektu.

3. Wybór materiałów do konstrukcji ramy mikroklimatycznej

Przydatność materiałów używanych do budowy ram mikroklimatycznych w MNK sprawdzono za pomocą

in the constructed frame. Scientific research indicates[7] that air tightness is mainly influenced by the holes and cracks with diameter exceeding 0.3 mm, which are relatively easy to eliminate by e.g. using aluminium foil. The parameter characterising the air tightness of the frame is the air exchange coefficient which determines how many times a day air exchange occurs in a given space. It is determined by using the method of a marker gas, which involves releasing a small amount of a non-reactive gas, most frequently carbon dioxide or nitrogen oxide (I), in the examined capacity, and then measuring the drop in its concentration which in microclimatic frames is connected with:

– diffusion through the material from which the walls of the showcase were made, as well as through cracks and holes,
– air exchange caused by temperature changes, and subsequently changes in air pressure,
– convection airflow[8].

On the basis of a simple mathematical analysis of the obtained data the air exchange coefficient can be calculated[9]. In all practical situations the air tightness of a frame is sufficient when its air exchange coefficient is lower than 1/day[10].

2.4. The problem of accumulation of harmful chemical compounds in an airtight microclimatic frame

The problem[11] connected with using airtight microclimatic frames, indicated in the literature, is the possibility of harmful chemical compounds accumulating inside them, particularly volatile organic compounds[12] which might react with the stored object. Their source might also be the very object placed inside the frame. However, many years of museum experience in using microclimatic frames have not confirmed any significant influence of the compounds released inside the frame on the state of preservation of the protected object. Moreover, objects enclosed within microclimatic frames are frequently in much better state of preservation than unprotected objects. Only works of art which underwent conservation treatment and are placed inside tightly sealed frames emit so intensive volatile organic compounds that their accumulation leads to exceeding the levels considered safe for the artefacts. Therefore, it is advised that at least 30 days should elapse between the completion of conservation work and placing the object in the microclimatic frame, which should be determined individually for each object.

The other source of harmful chemical compounds could be the materials used for constructing the frame and that is why they should be chemically stable and unreactive with the protected object.

3. Selection of materials for building a microclimatic frame

Suitability of materials used for building microclimatic frames in the NMK was verified using the Oddy test[13]. The test was prepared by Andrew Oddy at the

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

testu Oddy'ego[13]. Test ten został opracowany przez Andrew Oddy'ego w British Museum i od dekady jest powszechnie stosowany w muzeach do oceny wpływu badanych materiałów na wzrost zagrożeń korozyjnych. Test ten polega na umieszczeniu badanego materiału w szczelnie zamkniętych fiolkach wraz z próbkami folii miedzianej, ołowianej i srebrnej (ryc. 5) w temperaturze 60°C. Po 28 dniach wszystkie próbki są poddawane ocenie porównawczej według trzystopniowej skali Oddy'ego.

Stosowane w testach Oddy'ego metale kolorowe, takie jak srebro, miedź czy ołów, łatwo ulegają korozji, gdy są przechowywane w niekorzystnych warunkach. W przypadku ołowiu w normalnych warunkach atmosferycznych metal ten pokrywa się szarym nalotem tlenku ołowiu (IV) (PbO_2) bądź też warstwą węglanu ($PbCO_3$). Jednak gdy ołów znajdzie się w atmosferze bogatej w produkty kwaśne, powstaje szkodliwy zasadowy węglan ołowiu ($2PbCO_3 \cdot Pb(OH)_2$) w postaci białego proszku (ryc. 6a). Korozję metalicznego srebra powodują przede wszystkim związki siarki tworzące ciemne naloty siarczku srebrowego (Ag_2S, ryc. 6b). Produkty korozji miedzi składają się przeważnie z siarczków, tlenków, węglanów i chlorków. Skład produktów korozji zależy od składu atmosfery działającej na miedź. Mają one przeważnie zabarwienie zielone, brunatne, względnie czarne (ryc. 6c i d).

W celu zidentyfikowania i scharakteryzowania produktów korozji powstałych w teście Oddy'ego przeprowadzono analizę spektroskopową. Pomiary wykonano spektrometrem Ramana Inspector firmy DeltaNu, pracującym przy długości fali 785 nm i rozdzielczości 8 cm^{-1}, akwizycję widma prowadzono przez 5 sekund, za mocą lasera 5 mW.

Widmo Ramana uzyskane dla produktów korozji osadzonych na płytkach ołowianych przedstawiono na ryc. 7. Analiza białego osadu powstałego na kuponach umieszczonych w obecności płyty MDF oraz gumy Neopren wykazała intensywne i ostre pasmo około 1040 cm^{-1}, niewielkie pasmo przy 840 cm^{-1} oraz szerokie pasmo z maksimum około 1368 cm^{-1}. Uzyskane linie widmowe, po porównaniu z bazą danych IRUG[14], zostały zidentyfikowane jako $2PbCO_3 \cdot Pb(OH)_2$.

W przypadku płytek wykonanych ze srebra stwierdzono obecność siarczku srebra (I) (Ag_2S), a dla płytek z miedzi potwierdzono obecność tlenku miedzi (II) (CuO) oraz zasadowego siarczanu miedzi (II) ($CuSO_4 \cdot 3Cu(OH)_2$).

Dodatkowo wykonano pomiary spektroskopowe w zakresie podczerwieni spektrometrem FT-IR IR-Affinity firmy Shimadzu pracującym w zakresie 400–4000 cm^{-1}, z rozdzielczością 4 cm^{-1}. Na ryc. 8 przedstawiono widma FT-IR otrzymane dla płytek ołowianych. Widoczne pasma zostały zidentyfikowane jako: 677 cm^{-1} $\delta(CO_3)$, 1046 cm^{-1} $\nu(CO_3)$, 1350–1490 cm^{-1} $\nu(CO_3)$, 3547cm^{-1} ν(OH), charakterystyczne dla $2PbCO_3 \cdot Pb(OH)_2$. Analizy wykonane dla białego osadu osadzonego na płytkach ołowianych potwierdziły obecność zasadowego węglanu ołowiu.

Przeprowadzone analizy pozwoliły wytypować materiały stabilne chemicznie, które nie wykazały korozji w testach Oddy'ego. Nawet w długim czasie nie powinny one emitować szkodliwych lotnych związków. Jako

British Museum and for a decade has been commonly used in museums to assess the influence of analysed materials on increasing the threat of corrosion. The test involves placing the analysed material in tightly sealed vials together with samples of copper, lead and silver foil (fig. 5) in temperature 60°C. After 28 days all the samples undergo comparative evaluation according to the Oddy's three-degree scale.

Non-ferrous metals used in Oddy's tests, such as silver, copper or lead, easily corrode when they are kept in unfavourable conditions. In case of lead, in normal weather conditions the metal develops a grey coating of lead dioxide (IV) (PbO_2), or a layer of the lead carbonate ($PbCO_3$). However, when lead is placed in the atmosphere rich in acid products, then the harmful basic lead carbonate ($2PbCO_3 \cdot Pb(OH)_2$) is created in the form of white powder (fig. 6a). Corrosion of metallic silver is primarily caused by sulphur compounds which form dark tarnish of silver sulphide (Ag_2S, fig. 6b). Products of copper corrosion usually contain sulphides, oxides, carbonates and chlorides. The content of the corrosion products depends on the content of the atmosphere affecting copper. They are usually green, brown or black (fig. 6c and d).

In order to identify and characterise the corrosion products obtained during Oddy's test, a spectroscopic analysis was conducted. Measurements were taken with a Raman spectroscope Inspector produced by DeltaNu company, operating at 785 nm wavelength and resolution of 8 cm^{-1}, spectrum acquisition was carried out for 5 seconds, with 5 mW laser power.

Raman spectrum obtained for corrosion products deposited on lead plates was presented in fig. 7. Analysis of the white residue found on the coupons placed in the presence of MDF and Neoprene rubber indicated an intensive and bright band at about 1040 cm^{-1}, a narrow band at 840 cm^{-1} and a broad band with maximum at about 1368 cm^{-1}. Obtained spectral lines, after comparing them with the IRUG[14] database, were identified as $2PbCO_3 \cdot Pb(OH)_2$.

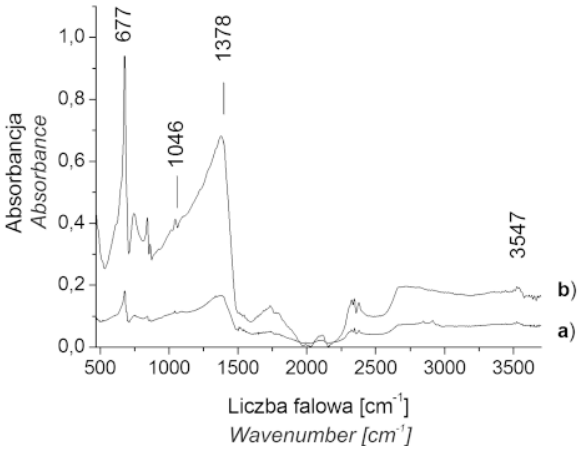
In the case of plates made from silver the presence of silver sulfide (I) (Ag_2S) was confirmed, a for copper plates the presence of copper oxide (II) (CuO) and basic copper sulfate (II) ($CuSO_4 \cdot 3Cu(OH)_2$) was confirmed.

Additionally infrared spectroscopic measurements were carried out with the FT-IR IR-Affinity spectrometer produced by Shimadzu operating within the range of 400–4000 cm^{-1}, with the resolution of 4 cm^{-1}. Fig. 8 presents spectrums FT-IR obtained for lead plates. Visible bands were identified as: 677 cm^{-1} $\delta(CO_3)$, 1046 cm^{-1} $\nu(CO_3)$, 1350–1490 cm^{-1} $\nu(CO_3)$, 3547cm^{-1} ν(OH), characteristic for $2PbCO_3 \cdot Pb(OH)_2$. Analyses carried out for the white residue deposited on lead plates confirmed the presence of basic lead carbonate.

The conducted analyses allowed for selecting chemically stable materials which did not show traces of corrosion in Oddy tests. Even for a longer period they should not emit harmful volatile compounds. The following were qualified for use when constructing microclimatic frames:

- polycarbonate,
- silicon no 796 made by Dow Corning company,
- adhesive Brand Tape no 417 made by Scotch,

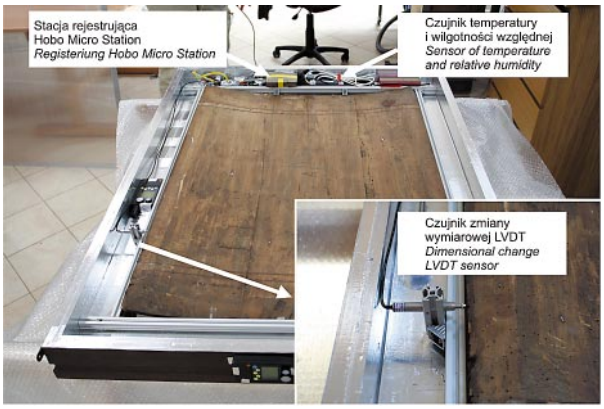
BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



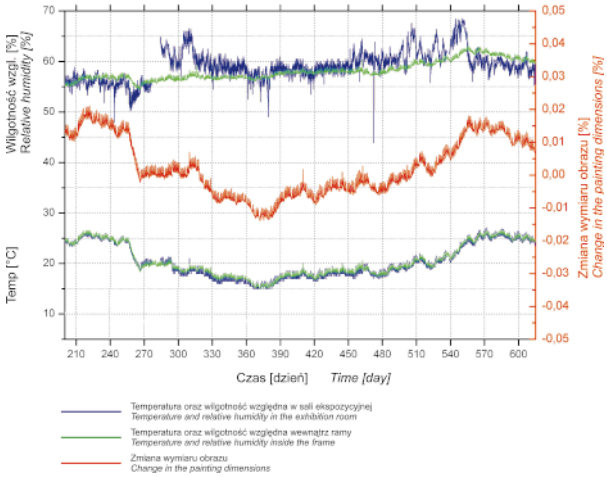
Ryc. 8. Widmo FT-IR otrzymane dla płytek ołowianych umieszczonych w obecności: a) płyty MDF, b) gumy Neopren
Fig. 8. FT-IR spectrum obtained for lead plates in the presence of: a) MDF, b) Neoprene rubber



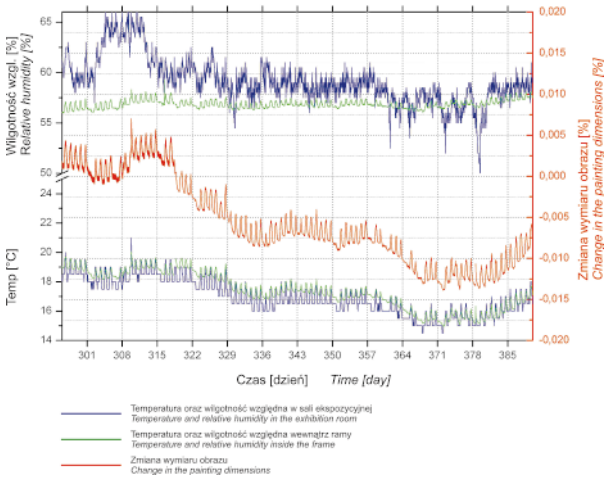
Ryc. 9. „Epitafium Jana Słupeckiego" w prototypowej ramie mikroklimatycznej
Fig. 9. "Epitaph of Jan Słupecki" in a prototype microclimatic frame



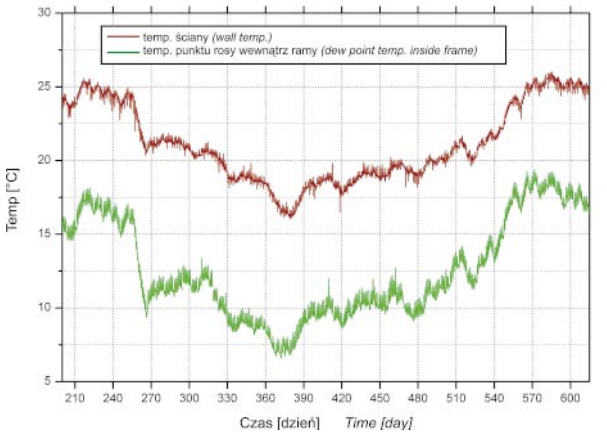
Ryc. 10. Wnętrze ramy mikroklimatycznej wraz z obrazem i układem pomiarowym
Fig. 10. Inside of a microclimatic frame with a painting and the measuring system



Ryc. 11. Zmiany temperatury i wilgotności względnej wewnątrz i na zewnątrz ramy oraz zmiany wymiarowe obrazu w trakcie całego okresu pomiarowego. Skala czasowa rozpoczyna się 20 lipca 2008 (201 dzień roku), stąd 210 – oznacza 29 lipca, 240 – 29 sierpnia itd.
Fig. 11. Changes in temperature and relative humidity inside and outside the frame, and dimensional changes of the painting during the entire measurement period. Time scale begins on July 20, 2008 (201 day of the year), thus 210 – means July 29, 240 – August 29 etc.



Ryc. 12. Zmiany temperatury i wilgotności względnej wewnątrz i na zewnątrz ramy oraz zmiany wymiarowe obrazu od 23 października 2008 do 25 stycznia 2009
Fig. 12. Changes in temperature and relative humidity inside and outside the frame, and dimensional changes of the painting between October 23, 2008 and January 25, 2009



Ryc. 13. Zmiany temperatury ściany oraz temperatury punktu rosy dla ramy mikroklimatycznej w ciągu całego okresu pomiarowego
Fig. 13. Changes of wall temperature and of dew point for a microclimatic frame during the entire measurement period

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

kwalifikujące się do użycia przy konstruowaniu ram mikroklimatycznych wytypowano:
– poliwęglan,
– silikon nr 796 firmy Dow Corning,
– taśmę klejącą Brand Tape nr 417 firmy Scotch,
– uszczelki gumowe na bazie kauczuku EPDM.

W przypadku pianek zaleca się stosowanie wykonanych z polietylenu (PE), np. Ethafoam; usieciowanego polietylenu, np. Plastazote; polistyrenu, np. Styrofoam Polyfoam; kopolimerów octanu winylu, np. Evazote; polipropylenu, np. Microfoam. Należy unikać chloroprenu (np. Neopren), pianek poliuretanowych, pianek z polichlorku winylu (PCV), gum wulkanizowanych siarką. Za bardzo szkodliwe uznano wszelkie płyty MDF, płyty pilśniowe oraz sklejki.

4. Rama mikroklimatyczna *in situ* w Muzeum Narodowym w Krakowie

W zbudowanej prototypowej ramie mikroklimatycznej umieszczono obraz na desce – „Epitafium Jana Słupeckiego". Obraz posiadał ramę o estetycznym wyglądzie, zbudowaną pod koniec XX wieku, która stała się podstawą do konstrukcji ramy mikroklimatycznej (opis w punkcie 2.2). Dane wymiarowe ramy oraz obrazu przedstawiono w tabeli 1. Ramę prototypową wraz z obrazem umieszczono w sali ekspozycyjnej Pałacu Biskupa Erazma Ciołka – Oddziału Muzeum Narodowego w Krakowie (ryc. 9).

Wartość współczynnika wymiany powietrza wyznaczono metodą gazu znacznikowego. Jako gazu znacznikowego użyto dwutlenku węgla. Zmiany jego stężenia mierzono za pomocą czujnika CARBOCAP Carbon Dioxide GMM220 firmy Vaisala, umożliwiającego pomiar stężenia dwutlenku węgla w zakresie od 0 do 2000 ppm. Na podstawie wyznaczonego współczynnika wymiany powietrza (tabela 1) można stwierdzić, że zbudowana rama spełniła zadane kryterium szczelności.

Tab. 1. Charakterystyka ramy mikroklimatycznej i obrazu

Wymiary wewn. ramy [m]	1,24 × 0,94 × 0,065
Objętość ramy [m^3]	0,076
Wymiary obrazu [m]	1,04 × 0,765 × 0,02
Objętość obrazu [m^3]	0,016
Masa deski [kg]	12,8
Objętość powietrza [m^3]	0,06
Współczynnik wymiany powietrza [1/doba]	0,3

Aby zweryfikować wpływ ramy mikroklimatycznej na stabilizację warunków mikroklimatycznych i odpowiedzi wymiarowej obrazu, zbudowano układ pomiarowy (ryc. 10) składający się z:
– czujników temperatury i wilgotności względnej Hobo S-THB-M002 firmy Onset, o specyfikacji:
- zakres pomiarowy: –40 do 75°C; 0 do 100% RH,
- dokładność: 0,2°C; 2,5% RH,
- rozdzielczość: 0,02°C; 0,1% RH,

– czujnika LVDT D6/00250A z przetwornikiem firmy RDP Electronics o zakresie pomiarowym ±0,25 mm

– rubber cushion packing made on the basis of EPDM rubber.

In the case of foams the use of those made from polyethylene (PE) e.g. Ethafoam, closed-cell polyethylene e.g. Plastazote, polystyrene e.g. Styrofoam, Polyfoam, copolymers of vinyl acetate e.g. Evazote, polypropylene e.g. Microfoam is suggested. The use of chloroprene (e.g. Neoprene), polyurethane foams, polyvinyl chloride (PVC) foams, rubber vulcanized with sulphur should be avoided. All kinds of MDF, hardboard and plywood were regarded as very harmful.

4. Microclimatic frame *in situ* in the National *M*useum in Krakow

In the prototype microclimatic frame built at the NMK a panel painting entitled "Epitaph of Jan Słupecki" was placed. The painting had an aesthetic looking frame, built towards the end of the 20th century, which served as a basis for constructing the microclimatic frame (description in pt 2.2). Dimension data of the frame and painting was presented in table 1. The prototype frame with the painting was placed in the exhibition room at the Palace of Bishop Erazm Ciołek – a Branch of the National Museum in Krakow (fig. 9).

The value of the air exchange coefficient was determined using the method of marker gas, where carbon dioxide was used as the marker gas. The changes in its concentration were measured by CARBOCAP Carbon Dioxide GMM220 sensor produced by Vaisala, which allows for measuring the concentration carbon dioxide within the range from 0 to 2000 ppm. On the basis of the determined air exchange coefficient (table 1) it can be stated that the constructed frame fulfilled the required criterion of tightness.

Tab. 1. Characteristics of a microclimatic frame and picture

Inside measurements of frame [m]	1.24 × 0.94 × 0.065
Frame capacity [m^3]	0.076
Picture dimensions [m]	1.04 × 0.765 × 0.02
Picture capacity [m^3]	0.016
Mass of panel [kg]	12.8
Air capacity [m^3]	0.06
Air exchange coefficient [1/day]	0.3

To verify the impact of the microclimatic frame on stabilisation of microclimatic conditions and dimensional response of the painting, a measuring system was assembled (fig. 10) consisting of:
– temperature and relative humidity sensors Hobo S-THB-M002 produced by Onset, with the following specification:
- measurement range: –40 do 75°C; 0 do 100% RH,
- precision: 0.2°C; 2,5% RH,
- resolution: 0.02°C; 0,1% RH,

– LVDT D6/00250A sensor with a transducer produced by RDP Electronics with measurement range ±0.25 mm and linear error ±0.5%, measuring dimensional changes in the width of the painting,

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

i błędzie liniowym ±0,5%, mierzącego zmiany wymiarowe szerokości obrazu,
– stacji zapisującej mierzone dane Hobo Micro Station firmy Onset.

5. Skuteczność ochrony obrazu przez ramę mikroklimatyczną

W trakcie długiego okresu pomiarowego, tj. od 20 lipca 2008 do 10 września 2009, rejestrowano zmiany temperatury i wilgotności względnej wewnątrz i na zewnątrz ramy oraz zmiany wymiarowe obrazu. Na ryc. 11 przedstawiono wszystkie zarejestrowane dane. Można zaobserwować, że warunki mikroklimatyczne wewnątrz ramy w trakcie ponadrocznego okresu były bardzo stabilne. Wilgotność względna w ramie zmieniała się jedynie w zakresie od 56 do 62%, podczas gdy w sali ekspozycyjnej – od 48 do 65%. Zmiany wymiarowe obrazu umieszczonego w ramie mikroklimatycznej były bardzo niewielkie i obejmowały maksymalny przedział od –0,015% do 0,02%. Jedynie temperatura podlegała większym zmianom, które były bliskie zmianom temperatury w sali ekspozycyjnej. Temperatura zmieniała się w cyklu rocznym i w okresie zimowym osiągała 15°C, natomiast w letnim 26°C.

Wybrany fragment danych pomiarowych (od 23 października 2008 do 25 stycznia 2009) przedstawiono na ryc. 12. Umożliwia on szczegółową analizę wszystkich zmiennych. Na jego podstawie można stwierdzić, że zewnętrzne fluktuacje wilgotności względnej są całkowicie odseparowane przez szczelne ścianki ramy. Krótkoterminowe, nawet znaczne (około 10%), zmiany wilgotności względnej na zewnątrz ramy nie wywierają żadnego wpływu na warunki występujące wewnątrz ramy. Taki sam efekt stabilizacji ramy można zaobserwować dla dłuższych zmian wilgotności względnej.

Można zauważyć, że niewielkie zmiany wilgotności względnej wewnątrz ramy są zgodne z kierunkiem zmian temperatury. Wynika to z obecności obiektu drewnianego w ramie mikroklimatycznej, z którego podczas zmian temperatury następuje sorpcja lub desorpcja wilgoci. W związku z tym, że w jednostce masy drewna jest zawartych 12-krotnie więcej wilgoci niż w takiej samej jednostce powietrza, obraz drewniany wymieniając wilgoć z powietrzem w ramie będzie determinował jego wilgotność względną. Taka wymiana wilgoci jest niewielka i nie stwarza zagrożenia dla obiektu[15].

Ponadto z kierunkiem zmian temperatury jest zgodna odpowiedź wymiarowa obrazu drewnianego. Można to wyjaśnić przez zjawisko rozszerzalności cieplnej drewna, które przewyższa proces zmiany wymiarowej drewna spowodowanego wymianą wilgoci[16]. Obserwowane zmiany wymiarowe są bardzo niewielkie i wynoszą około 0,004% w trakcie zmiany o 1°C (ryc. 12).

Podsumowując, jedynym czynnikiem zewnętrznym mającym wpływ zmiany wymiarowe obiektu w ramie mikroklimatycznej jest temperatura. Należy zauważyć, że temperatura w całym okresie pomiarowym (ryc. 11 i 12) podlegała zmianom sezonowym, a zmiany dzienne były bardzo niewielkie (około 1°C). Tym samym w warunkach rzeczywistych sali ekspozycyjnej obraz drewniany jest skutecznie chroniony.

– station recording measured data Hobo Micro Station produced by Onset.

5. Effectiveness in picture protection offered by a microclimatic frame

During the long measurement period, i.e. from July 20, 2008 to September 10, 2009, changes in temperature and relative humidity were registered inside and outside the frame, as well as dimensional changes of the painting. Fig. 11 presents all the registered data. It can be observed that microclimatic conditions inside the frame were very stable during the over a year long period. Relative humidity within the frame changed only within the range from 56 to 62%, while in the exhibition room – from 48 to 65%. Dimensional changes of the painting placed within the microclimatic frame were very slight and involved maximum range from –0.015% to 0.02%. Only temperature fluctuations were more considerable and close to the changes of temperature in the exhibition room. Temperature altered in accordance with the annual cycle, and during the winter period dropped to 15°C, while in the summer rose to 26°C.

A selected fragment of measurement data (from October 23, 2008 to January 25, 2009) was presented in fig. 12. It allows for a detailed analysis of all variables. On its basis it can be ascertained that external fluctuations in relative humidity are fully protected against by the tight walls of the frame. Temporary, even if considerable (about 10%), changes in relative humidity outside the frame do not have any impact on the conditions occurring inside the frame. The same effect of the frame stabilization can be observed for longer-lasting changes in relative humidity.

It can be observed that slight changes in relative humidity inside the frame conform with the direction in temperature changes. It results from the presence of a wooden object in the microclimatic frame, from which during temperature changes there occurs sorption or desorption of moisture. Because a unit of wood mass contains 12-times as much moisture as a corresponding unit of air, a wooden painting by exchanging moisture with the air in the frame will determine its relative humidity. Such exchange of moisture is negligible and does not pose any threat for the object[15].

Moreover, the dimensional response of the wooden painting also conforms with the direction in temperature changes. It can be explained using the phenomenon of thermal expansion of wood, which exceeds the process of dimensional change of wood caused by moisture exchange[16]. The observed dimensional changes are very slight and equal about 0.004% when the temperature changes by 1°C (fig. 12).

To sum up, the only external factor affecting the dimensional changes of the object in a microclimatic frame is temperature. It should be emphasised, that the temperature during the en tire measurement period (fig. 11 and 12) underwent seasonal changes, and daily fluctuations were very slight (about 1°C). Therefore, in real-life conditions of an exhibition room a wooden painting would be effectively protected.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

6. Ocena możliwości wystąpienia epizodów kondensacji pary wodnej wewnątrz ramy mikroklimatycznej

Sygnalizowanym w literaturze światowej zagrożeniem przy stosowaniu ram mikroklimatycznych jest możliwość wystąpienia kondensacji pary wodnej w jej wnętrzu[17]. Kondensacja pary wodnej może nastąpić podczas znacznych spadków temperatury ramy, podczas gdy w jej wnętrzu zawarta jest stała ilość wilgoci ze względu na szczelność ramy. Zjawisko takie może wystąpić, gdy rama wraz z obiektem zostanie umieszczona na przemarzającej ścianie budynku.

W celu oszacowania ryzyka wystąpienia kondensacji pary wodnej w rzeczywistych warunkach ekspozycji wykonano pomiary warunków mikroklimatycznych panujących w ramie oraz temperatury ściany, która jest w bezpośrednim sąsiedztwie ramy. Następnie obliczono temperaturę punktu rosy wewnątrz ramy mikroklimatycznej, korzystając z zależności[18]:

$$DP = \frac{237{,}3 + T}{7{,}5} \log\left(\frac{RH}{100}\right) + T$$

gdzie:

DP – temperatura punktu rosy,
T – temperatura powietrza w ramie,
RH – wilgotność względna powietrza w ramie.

Tak uzyskane wyniki porównano ze zmierzoną temperaturą ściany budynku muzeum (ryc. 13). Przekroczenie temperatury punktu rosy przez temperaturę ściany świadczyłoby o osiągnięciu krytycznej wartości wilgotności względnej i kondensacji pary wodnej na zaplecku ramy. Jak widać na ryc. 13, w ciągu całego okresu pomiarowego nie zaobserwowano zagrożenia kondensacją. Pozwoliło to uznać, że w badanym budynku stosowanie ramy mikroklimatycznej jest całkowicie bezpieczne. Jednakże, aby całkowicie zredukować wpływ temperatury ściany na obiekt, między ramą a ścianą umieszczono podkładki dystansowe o grubości 1 cm.

7. Czynniki wpływające na podjęcie decyzji o zastosowaniu ram mikroklimatycznych

7.1. Zabezpieczenie obiektów

Podstawowym celem i obowiązkiem muzeum jest stworzenie odpowiednio bezpiecznych warunków przechowywania dzieł sztuki. Większość placówek muzealnych mieści się w historycznych budynkach, w których warunki mikroklimatyczne są niestabilne, a możliwość ich kontroli jest praktycznie niemożliwa. Dotyczy to budynków zaklasyfikowanych przez podręcznik amerykańskiego stowarzyszenia inżynierów ogrzewania, chłodnictwa i klimatyzacji jako budynki kategorii III i IV[19]. Według podręcznika w budynkach tych można uzyskać poziom kontroli wilgotności względnej kategorii D (wilg. wzgl. od 0 do 75%). W przypadku gdy zmiany temperatury nie zachodzą szybko, ramy mikroklimatyczne są skuteczną metodą ochrony obiektów wrażliwych i mogą być bezpiecznie stosowane. Natomiast gdy tempo zmian temperatury we-

6. Evaluating the possibility of incidents of water vapour condensation occurring within a microclimatic frame

A threat connected with the use of microclimatic frames, signalled in the literature on the subject, is the possibility of water vapour condensation occurring inside them[17]. Water vapour condensation can occur during considerable drops in the frame temperature, while it contains a stable amount of moisture because of the frame tightness. Such a phenomenon can occur when the frame with the object is placed on a frozen wall of the building.

In order to assess the risk of water vapour condensation occurring in real-life exhibition conditions, measurements were taken of microclimatic conditions occurring within the frame and of the temperature of the wall in the direct vicinity of the frame. Then the dew point temperature inside the microclimatic frame was calculated using the relation[18]:

$$DP = \frac{237.3 + T}{7.5} \log\left(\frac{RH}{100}\right) + T$$

where:

DP – dew point,
T – temperature of air in the frame,
RH – relative humidity of air in the frame.

The results obtained in this way were compared with the measure temperature of the wall of the museum building (fig. 13). Exceeding the dew point temperature by the wall temperature would indicate reaching a critical value of relative humidity and condensation of water vapour on the frame backside. As can be seen in fig. 13, during the entire measurement period no condensation threat was observed. It allowed for assuming that in the tested building application of a microclimatic frame is completely safe. However, in order to fully reduce the impact of the wall temperature on the object, 1 cm thick cushion pads were placed between the frame and the wall 1 cm.

7. Factors influencing the decision to use microclimatic frames

7.1. Protecting the objects.

The main aim and duty of a museum is creating suitably safe conditions for preserving works of art. The majority of museums are housed in historic buildings in which microclimatic conditions are unstable, and it is practically impossible to control them. It refers to buildings classified in the manual of the American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers as buildings of category III and IV[19]. According to the manual, in such buildings it is possible to acquire the level of relative humidity control of category D (RH from 0 to 75%). In cases when temperature does not change rapidly, microclimatic frames are an effective method for protecting sensitive objects and can be safely used. On the other hand, when the changes in the temperature inside the building or in its part in which the frame is

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

wnątrz budynku lub w jego części, na której znajduje się rama, jest duże, to stosowanie ram mikroklimatycznych jest związane z ryzykiem wystąpienia kondensacji. Należy wtedy dobrać współczynnik wymiany powietrza odpowiednio do tempa zmian temperatury.

7.2. Koszty

Jednym z najważniejszych kryteriów wprowadzania nowych rozwiązań w muzeach są aspekty ekonomiczne. W przypadku ram mikroklimatycznych związane są one głównie z kosztami ich budowy. Ponadto generowane są dodatkowe niewielkie koszty logistyczne, ponieważ obiekt staje się cięższy i zazwyczaj konieczne jest zakupienie nowych skrzyń do transportu oraz wprowadzenie nowych systemów do wieszania na ścianach.

Jednakże koszty zbudowania ramy są stosunkowo niewielkie. Szacowany koszt ramy mikroklimatycznej o powierzchni 1m^2 jest niższy od 4000 zł. Najdroższym elementem jest wzmacniana szyba antyrefleksyjna, która zapewnia odpowiednią ochronę obiektu przed ingerencją niepowołanych ludzi oraz jego doskonałą obserwację. Do kosztów konstrukcji ramy należy wliczyć usługę zaprojektowania i skonstruowania ramy. Ten element może być wyeliminowany, gdy rama mikroklimatyczna jest budowana przez własny personel techniczny muzeum oraz konserwatorów placówki muzealnej.

Z drugiej strony, zastosowanie ram mikroklimatycznych może obniżyć koszty związane z aktywną kontrolą mikroklimatu. Zmniejszeniu może ulec zużycie energii, co pozwala na promowanie idei „zielonego muzeum" przyjaznego społeczeństwu i środowisku. Zwiększona ochrona dzieł sztuki w ramach mikroklimatycznych skutkuje także zmniejszonymi wydatkami na prace konserwatorskie. W ogólnym rozrachunku bilans ekonomiczny stosowania ram jest zdecydowanie korzystny.

7.3. Estetyka

Istotnym czynnikiem wpływającym na podjęcie decyzji o stosowaniu jakiegokolwiek nowego rozwiązania jest zapewnienie odpowiedniej estetyki prezentacji dzieł sztuki. Jest to problem podnoszony przez kustoszy oraz osoby zajmujące się projektowaniem ekspozycji. Wskutek umieszczenia obiektu w ramie mikroklimatycznej możliwe jest pogorszenie estetyki ekspozycji oraz stworzenie barier w bezpośrednim kontakcie widza z prezentowanym dziełem[20]. Jednakże problem ten może być ograniczony poprzez wykorzystanie oryginalnych ram obrazów oraz zastosowanie antyrefleksyjnych szyb.

8. Wnioski

Przedstawiona konstrukcja ramy mikroklimatycznej jest stosunkowo prosta i tania w budowie i może być wykonana przez personel większości muzeów. Materiały użyte do zbudowania ramy zostały dobrane, aby zapewnić bezpieczną ekspozycję obiektów w długim okresie. Wykorzystując oryginalną ramę obrazu, można zminimalizować ingerencję w odbiór estetyczny dzieła.

Wyniki przeprowadzonych badań w rzeczywistych warunkach muzealnych potwierdziły skuteczność ram

located are rapid, then using microclimatic frames is associated with the risk of condensation occurrence. Then the air exchange coefficient should correspond to the rapidity of temperature changes.

7.2. Costs

One of the most important criteria considered when introducing novel solutions in museums are economic aspects. In the case of microclimatic frames they are mostly connected with their construction costs. Moreover, small logistic costs are additionally generated because the object becomes heavier, and it is usually necessary to purchase new crates for its transport and to introduce new systems for hanging it on the wall.

However, the costs of building a frame are relatively low. The estimated cost of 1m^2 of microclimatic frame does not exceed 4000 PLN. The most expensive element is the strengthened anti-reflective glass pane which ensures appropriate protection of the object against interference from unauthorised individuals and its perfect viewing conditions. The service of designing and constructing the frame has to be included in the frame construction cost. However, that element can be eliminated when the microclimatic frame is built by the museum own technical staff and museum conservators.

On the other hand, the use of microclimatic frames can lower the costs associated with active control of microclimate. The use of energy can be decreased, which would allow for promoting the idea of a "green museum" society- and environment-friendly. The increased protection of works of art in microclimatic frames results also in lower expenditure on conservation work. Overall, the economic balance of using the frames is definitely on the plus side.

7.3. Aesthetics

A vital factor influencing the decision whether or not to apply any new solutions is the possibility of ensuring an aesthetic way of presenting a work of art. It is an issue raised by curators and people responsible for designing exhibitions. When an object is placed in a microclimatic frame, it may worsen the aesthetics quality of display and create barriers in the direct contact of the viewer with the presented masterpiece[20]. However, that drawback can limited by using the original frames of paintings and mounting anti-reflective glass panes.

8. Conclusions

The presented construction of microclimatic frame is relatively simple and cheap to build , and can be made by the staff in most museums. Materials used for building the frame were selected in such a way as to ensure safe display of objects for long periods. By using the original frame of the painting it is possible to minimise the interference into the aesthetic reception of the work of art.

Results of the research carried out in real-life museum conditions confirmed the effectiveness of microclimatic frames in protecting panel paintings against dan-

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

mikroklimatycznych w zabezpieczeniu malarstwa tablicowego przed zagrożeniami związanymi ze znacznymi wahaniami mikroklimatu powszechnie występującymi w muzeach. Wykonana analiza pokazała, że mogą one być powszechnie używane przez większość muzeów. Jedynie w obiektach o szybko zmieniającej się temperaturze (drewniane kościoły, budynki o niewielkiej inercji termicznej itp.) stosowanie ram mikroklimatycznych wiąże się z ryzykiem wystąpienia kondensacji w ich wnętrzu. Obiekty w ramach mikroklimatycznych nie powinny być także eksponowane na źle zaizolowanych ścianach zewnętrznych.

Ramy mikroklimatyczne są rozwiązaniem pasywnym i przez co poprawa bezpieczeństwa eksponowania i przechowywania obiektów jest realizowana ekonomiczne. Dlatego też użycie ram mikroklimatycznych może stać się narzędziem umożliwiającym obniżenie zużycia energii i związanych z tym kosztów.

Podziękowania

Badania oraz część zastosowanej aparatury przedstawione w niniejszym artykule zostały sfinansowane ze środków projektu 6. Programu Ramowego Unii Europejskiej – "PROPAINT – Improved Protection of Paintings during Exhibition, Storage and Transit" (nr umowy SSPI-044254), realizowanego przez Muzeum Narodowe w Krakowie oraz grantu badawczego MNiSW o numerze N N105 278536.

gers associated with considerable fluctuations in microclimate commonly occurring in museums. The conducted analysis showed that the frames can be safely used in the majority of museums. Only in buildings with rapidly changing temperature (wooden churches, building with low thermal inertia etc.) using microclimatic frames can be connected with the risk of condensation appearing inside them. Objects in microclimatic frames should not be exhibited on poorly insulated outer walls.

Microclimatic frames are a passive solution due to which improvement in the safety of exhibiting and storing artistic objects is economically realised. Therefore, the use of microclimatic frames can become an instrument allowing for reducing the use of electricity and costs connected with it.

Acknowledgments.

The research and a part of the used equipment presented in this article were financed from the funds of the project of 6. Outline Program of the European Union – "PROPAINT – Improved Protection of Paintings during Exhibition, Storage and Transit" (contract no SSPI-044254), realised by the National Museum in Krakow and from the research grant of the MS&HE number N N105 278536.

---

[1] Pełny opis mechanizmu niszczenia obiektów wskutek wilgotności względnej można znaleźć w: M. Mecklenburg, C. Tumosa, D. Erhardt, *Structural Response of Painted Wood Surfaces to Changes in Ambient Relative Humidity*, [w:] *Painted Wood: History and Conservation*, The Getty Conservation Institute, Los Angeles 1998, s. 464-483; D. Erhardt, M. Mecklenburg, *Relative Humidity re-examined*, [w:] *Preventive Conservation – Practise, Theory and Research. Preprints. Ottawa Congress IIC*, A. Roy, P. Smith (red.), s. 32-38.

[2] Drewno charakteryzuje się niskim współczynnikiem rozszerzalności cieplnej o wielkości rzędu 10^{-5}/°C. Podobnie zawartość wody w drewnie spada o 0,25% przy zmianie temperatury z 10 do 22°C w wilg. wzgl. 50%. Szerzej: W. Simpson, A. Ten-Wolde, *Physical Properties and Moisture Relations of Wood*, [w:] *Wood Handbook. Wood as an Engineering Material*, praca zbiorowa, Forest Products Society, 1999, s. 3-1–3-24.

[3] Zostało to potwierdzone w podręczniku dla inżynierów projektujących systemy klimatyzacji dla muzeów i archiwów: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, *AHSRAE Handbook – HVAC Applications. Chapter 21: Museums, Galleries, Archives and Libraries.*, Atlanta 2007, s. 21.1-21.23.

[4] J. Wadum, *Microclimate boxes for panel paintings*, [w:] *Proceedings of the Symposium on the Structural Conservation of Panel Paintings*, April 24-28, 1995, Los Angeles, Getty Conservation Institute, s. 513-514; Thomson G., *The Museum Environment*, Butterworth-Heinemann 1997, s. 106-112.

[5] G. Thomson, *Relative Humidity – Variation with Temperature in a Case Containing Wood*, Studies in Conservation, 1964, Vol. 9, s. 153-169; K. Toishi, *Humidity Control in a Closed Package*, Studies in Conservation, 1959, Vol. 4, s. 81-87, P. Brimblecombe, B. Ramer, *Museum display cases and the exchange of water vapour*, Studies in Conservation, 1983, Vol. 28, s. 179-188, G. Thomson, *Stabilisation of RH in exhibition cases: hygrometric half-time*, Studies in Conservation, 1977, s. 85-102.

[6] Szczegółową analizę zalet oraz barier w stosowaniu ram mikroklimatycznych w placówkach muzealnych można znaleźć w: D. Wilk, Ł. Bratasz, *Skuteczne zabezpieczenie obrazów przed niekorzystnymi wpływami mikroklimatu muzeum poprzez zastosowanie ram mikroklimatycznych*, Ochrona Zabytków, 2009, nr 3, s. 47-58.

[7] S. Michalski, *Leakage Prediction for Buildings, cases, bags and bottles*, Studies in Conservation, 1994, Vol. 29, s. 169-186.

[8] T. Padfield, *The control of relative humidity and air pollution in showcases and picture frames*, Studies in Conservation, 1966, vol. 11, s. 8-30.

[9] Szczegółowy opis metodyki pomiarowej współczynnika wymiany powietrza można znaleźć w: A. Calver, A. Holbrook, D. Thickett, S. Weintraub, *Simple methods to measure air exchange rate and detect leaks in display and storage enclosures*, [w:] *ICOM Committee for Conservation*, 14th Triennial Meeting, The Hague: Preprints, I. Verger (red.), James & James, London 2005, s. 597-609.

[10] D. Thickett, F. David, N. Luxford, *Air Exchange Rate – the Dominant Parameter for Preventive Conservation?*, The Conservator, 2005, Vol. 29, s. 19-34.

[11] E. Dahlin (red.), *PROPAINT. Improved Protection of Paintings during Exhibition, Storage and Transit. Final Activity Report*, Norwegian Institute for Air Research, NILU OR 42/2010, s. 21; dostępny także w wersji elektronicznej: http://propaint.nilu.no/Portals/23/PROPAINT-Final%20Report.pdf, stan na dzień: 1.03.2011 r.; T. Grøntoft, M. Odlyha, P. Mottner, E. Dahlin, S. Lopez-Aparicio, S. Jakieła, M. Scharff, G. Andrade, M. Obarzanowski, M. Ryhl-

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Svendsen, D. Thickett, S. Hackney, J. Wadum, *Pollution monitoring by dosimetry and passive diffusion sampling for evaluation of environmental conditions for paintings in microclimate frames*, Journal of Cultural Heritage, 2010, vol. 11, issue 4, s. 411-419.

[12] Za lotne związki organiczne uznaje się węglowodory alifatyczne, aromatyczne, małocząsteczkowe kwasy organiczne i alkohole, aceton, terpeny itp. Charakteryzują się wysoką prężnością par i przez to mogą łatwo być emitowane z różnych materiałów, m.in. drewna, farb, klejów.

[13] Szczegółowy opis metodyki pomiarowej testu Oddy'ego można znaleźć w: R. Robinet, D. Thickett, *New Methodology for Accelerated Corrosion Testing*, Studies in Conservation, 2003, vol. 48, s. 263-268.

[14] Baza danych *Infrared & Raman Users Group (IRUG) Database* jest dostępna na stronie www: http://www.irug.org; stan na dzień: 1.03.2011 r.

[15] Wymiana wilgoci pomiędzy drewnem a powietrzem jest bardzo ograniczona, gdy rama jest szczelna oraz objętość drewna w stosunku do objętości powietrza jest odpowiednio duża. Przyjmuje się, że proporcja drewna do powietrza w takich ramach powinna być większa niż 1 kg na 100 dm^3 powietrza.

[16] D. Wilk, Ł. Bratasz, *op.cit.*, s. 50-54; L. Sozzani, *An economical design for a microclimate vitrine for paintings using the picture frame as the primary housing*, Journal of American Institute for Conservation, 1997, Vol. 36, Nr 2, s. 95-107.

[17] L. Sozzani, *An Update: Microclimate Vitrines for Panel Paintings*, referat wygłoszony na Sympozjum "Facing the Challenges of Panel Paintings Conservation: Trends, Treatments and Training", 17-18 maja 2009 r., w ramach projektu Panel Paintings Initiative, Getty Conservation Institute, abstrakt oraz nagranie występienia dostępne na: http://www.getty.edu/conservation/education/panelpaintings/panelpaintings_component1.html; stan na dzień: 1.03.2011 r.

[18] Temperatura punktu rosy to temperatura, w której ciśnienie cząstkowe pary wodnej w partii powietrza jest równe ciśnieniu nasycenia przy złożeniu stałego ciśnienia atmosferycznego oraz ilości wilgoci w powietrzu. Szerzej: D. Camuffo, *Microclimate for Cultural Heritage*, Elsevier Science B.V., 1998, s. 74-79.

[19] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, op.cit., s. 21.1-21.23.

[20] J. Wadum, op.cit., s. 513-514.

Streszczenie

Ramy mikroklimatyczne to specjalnie skonstruowane obudowy dla dzieł sztuki, których celem jest stworzenie autonomicznego klimatu w otoczeniu obiektu. Muzeum Narodowe w Krakowie (MNK) przygotowało uniwersalną konstrukcję ramy, której wykonanie jest możliwe przez personel większości muzeów. Materiały użyte do zbudowania ramy zostały tak dobrane, aby zapewnić bezpieczną ekspozycję obiektów w długim okresie. Wykorzystując oryginalną ramę obrazu zminimalizowano ingerencję w odbiór estetyczny dzieła.

Badania wykonane w rzeczywistych warunkach muzealnych potwierdziły skuteczność ram mikroklimatycznych w zabezpieczeniu malarstwa tablicowego przed zagrożeniami związanymi ze znacznymi wahaniami mikroklimatu powszechnie występującymi w muzeach. Przeprowadzona ocena związana z potencjalnym ryzykiem kondensacji wilgoci wewnątrz ramy pokazała, że ramy mikroklimatyczne mogą być używane praktycznie w większości muzeów.

Ponadto wskazano podstawowe czynniki wpływające na podjęcie decyzji o zastosowaniu ram mikroklimatycznych. Ramy mikroklimatyczne są rozwiązaniem pasywnym i przez to poprawa bezpieczeństwa eksponowania i przechowywania obiektów jest realizowana ekonomiczne. Dlatego też użycie ram mikroklimatycznych może stać się narzędziem umożliwiającym obniżenie zużycia energii i związanych z tym kosztów.

Abstract

Microclimatic frames are specialty constructed cases for art masterpieces, whose aim is creating an autonomic climate in the object surrounding. The National Museum in Krakow (NMK) prepared a universal frame structure which is possible to make by the staff of most museums. Materials used for building the frame were selected in such a way as to ensure safe exhibition of objects for long periods. By using the original frame of the painting, interference into the esthetic reception of the work was minimised.

Research carried out in real-life museum conditions confirmed the effectiveness of microclimatic frames in protecting panel paintings against the dangers connected with considerable fluctuations of microclimate so commonly occurring in museums. The evaluation carried out in connection with the potential risk of moisture condensation inside the frame showed that microclimatic frames can be used practically in most museums.

Moreover, basic factors affecting the decision concerning the use of microclimatic frames were indicated. Microclimatic frames are a passive solution because of which improvement in the safety of exhibiting and storing artistic objects is economically realised. Therefore, the use of microclimatic frames can become an instrument allowing for reducing the use of electricity and costs connected with it.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ