

Piotr Targowski*, Bogumiła J. Rouba**, Paweł Karaszewicz***
Magdalena Iwanicka**, Ludmiła Tymińska-Widmer**, Teresa Łękawa-Wysłouch**
Ewa A. Kwiatkowska*, Marcin Sylwestrzak*

Optyczna Koherentna Tomografia OCT – nowe narzędzie do działań konserwatorskich i inwentaryzacyjnych

Optical Coherence Tomography OCT – a novel tool for art conservation and cataloguing

1. Wstęp

Tomografia optyczna z wykorzystaniem interferometrii światła częściowo spójnego, zwana często koherentną tomografią optyczną albo oznaczana angielskim skrótem OCT (od *Optical Coherence Tomography*) jest nieinwazyjną, wywodzącą się z diagnostyki medycznej, metodą badania struktury wewnętrznej obiektów częściowo przezroczystych dla światła z zakresu podczerwieni. Po raz pierwszy metoda ta została zaproponowana przez Huanga i in. [1] w 1994 roku dla okulistyki i w tej dziedzinie znajduje nadal najwięcej zastosowań. Niemniej jednak postęp w zakresie dostępnych źródeł światła, z których wiele jest obecnie konstruowanych specjalnie dla potrzeb OCT, technik detekcyjnych oraz szybkości przetwarzania danych spowodował dynamiczny rozwój tej metody badawczej również w kierunku poszerzenia jej zastosowań o aspekty niemedyce. Pomijając szczegóły można stwierdzić, że postęp ten wyraził się w kilkuset już krotnym skróceniu czasu badania i we wzroście czułości metody o ponad 20 dB. Ten drugi czynnik ma szczególne znaczenie w przypadku badań struktury przedmiotów tylko częściowo przezroczystych dla promieniowania sondującego. Warto nadmienić, że współczesne tomografy OCT dla zobrazowania budowy obiektu wymagają jedynie, aby $1/10^{10}$ część światła naświetlającego powróciła do detektora. Ważne jest przy tym, że natężenia stosowanego promieniowania nie przekraczają kilku miliwatów.

1. Introduction

Layer scanning with utilization of interferometry of partly coherent light, often called coherent optical scanning (tomography) or marked with English abbreviation OCT (from *Optical Coherence Tomography*) is a non-invasive method of investigation of internal structure of objects partly transparent for light from the range of infra-red radiation, which has its roots in medical diagnosing. This method was proposed first by Huang et al. [1] in 1994 for ophthalmology and it is still most used in this field. However, dynamic development of this investigative method, also in the direction of expanding the method onto non-medical scientific aspects, was caused by the progress in the range of accessible sources of light, out of which many were especially constructed for the needs of OCT, the progress in detection techniques and speed of data processing. Neglecting the details one can say that this progress has already become fruitful by shortening the time of investigation many hundreds times and by the growth of sensitivity of the method by over 20 dB. This second factor has special meaning in the case of investigations of the structure of objects only partly transparent to the probing radiation. It is worth mentioning that modern OCT scanners need that only $1/10^{10}$ of the light projected at the piece be reflected back to the detector to have the building imaged. It is also important that the intensity of radiation applied does not exceed several milliwatts.

Praca dopuszczona do druku po recenzjach

Article accepted for publishing after reviews

Koherentna tomografia optyczna jest więc metodą pozwalającą na uzyskanie obrazu przekroju obiektu przynajmniej częściowo przezroczystego dla stosowanego promieniowania w sposób szybki, nieinwazyjny, bezkontaktowy i z mikrometrową rozdzielczością. Może więc być stosowana wielokrotnie i w wielu miejscach obiektu. Ponieważ badanie odbywa się z użyciem światła rozproszonego wstecz, można również analizować strukturę częściowo przezroczystych warstw przypowierzchniowych obiektów na podłożu całkowicie nieprzezroczystym, takich jak warstwy lakierów lub werniksów na drewnie. Wprowadzenie metody koherentnej tomografii optycznej do diagnostyki konserwatorskiej zostało zaproponowane przez autorów niniejszego artykułu w 2002 roku [2]. Od tego czasu ukazało się na świecie ponad 50 publikacji o różnorodnych zastosowaniach OCT w konserwacji i inwentaryzacji zabytków [3]. W większości doniesień technika ta wykorzystywana jest do badania struktury wewnętrznej dzieła sztuki w celu oceny jego stanu zachowania, szczegółów warsztatu twórcy, rozpoznania i oceny stanu wcześniejszych konserwacji itp. [4, 5]. Pozostałe prace dotyczą zastosowania tomografii optycznej do monitorowania prowadzonych zabiegów konserwatorskich w czasie rzeczywistym oraz reakcji obiektu na zmiany parametrów środowiska jego przechowywania.

W prezentowanym artykule na przykładzie urządzenia skonstruowanego na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika zostaną omówione podstawowe własności tomografu oraz zaprezentowane przykłady zastosowań tomografii OCT, rozwijane w naszym Zespole.

2. Spektralny tomograf OCT do zastosowań konserwatorskich

Dzięki wsparciu grantowemu¹ w Instytucie Fizyki UMK został skonstruowany spektralny tomograf OCT [6] (rys. 1), zaprojektowany specjalnie dla zastosowań konserwatorskich. Jest to urządzenie mobilne tj. zdolne również do pracy poza laboratorium macierzystym i o wysokiej rozdzielczości osiowej.

Zasada działania tomografu OCT polega na przetworzeniu informacji niesionej przez światło rozproszone w kierunku wstecznym na nieciągłościach

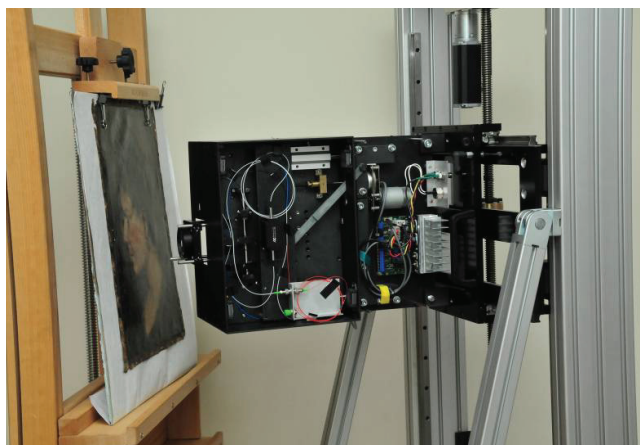
Coherent optical scanning is then the method allowing to obtain the image of the section of an object at least partly transparent to the applied radiation in the quick, non-invasive, non-contact way and with micrometer resolution. So it may be applied many times and in many places of the object. Because the investigation is carried out with the use of back scattered light, it can also analyze the structure of partly transparent superficial layers of objects whose base is entirely non-transparent, such as layers of varnishes on wood. Introducing the method of coherent optical scanning to the conservator's diagnostics was proposed by the authors of this article in 2002 [2]. Since then there have appeared in the world above 50 publication about varied applications of OCT in conservation and cataloguing of relics [3]. In the majority reports this technique is used for the investigation of the internal structure of the work of art, in order to assess its condition of preservation, to find out the details of the artist's workshop, recognition and assessment of the condition of earlier carried out conservator's works etc. [4, 5]. The remaining works relate to the applications of optical scanning for monitoring in real time the conservator's operations being carried out and the reaction of the object to the changes of parameters of its environment of storage.

Basic properties of the scanner and the presented applications of OCT tomography, being further developed by our team, will be discussed in this article on the example of the device constructed at Nicolaus Copernik University.

2. Spectral OCT scanner for conservator's applications

Thanks to the financial grant¹ at The Institute of Physics UMK a spectral OCT scanner was constructed [6] (fig. 1), especially designed for conservator's applications.

This is a mobile device i.e. it may be used also to the work beyond the mother laboratory and it possesses high axial resolution. The principle of working of the OCT scanner consists in processing information carried by the light back scattered on the discontinuities of the struc-



Rys. 1. Spektralny tomograf optyczny wykorzystywany do badań dzieł sztuki

Fig. 1. Spectral OCT instrument used for examination of objects of art

struktury badanego obiektu na obraz jego przekroju. W tym celu wąski promień światła podczerwonego o małym natężeniu sonduje obiekt prostopadle do powierzchni. Przesuwając promień równolegle, wzdłuż wybranej linii, uzyskuje się obraz przekroju badanej struktury (który nazywa się, przez analogię do ultrasonografii, B-skanem). Powtarzając tę procedurę wielokrotnie, wzdłuż równoległych linii, otrzymuje się zbiór B-skanów zawierający informację o trójwymiarowej – przestrzennej budowie przedmiotu. Szczegółowy opis konstrukcji i właściwości wszelkich odmian urządzeń OCT jest szeroko dostępny w literaturze przedmiotu (obszerne omówienie zawiera na przykład świeżo wydana monografia pod redakcją Fujimoto [7]), zaś przegląd zastosowań do badań materiałowych można znaleźć w artykule Stiftera [8]. Zestawienie wszystkich dotąd opublikowanych na świecie doniesień dotyczących wykorzystania tomografii optycznej do badań dzieł sztuki i w ich konserwacji, często wraz ze swobodnie dostępnymi źródłami w języku angielskim i polskim, zawiera witryna internetowa www.oct4art.eu [3].

Skonstruowany w naszym Zespole spektralny tomograf optyczny charakteryzuje się następującymi parametrami: osiowa (w głąb) zdolność rozdzielcza jest równa 4.5 μm w powietrzu (w materiale, np. w werniksie jest ona 1,4 razy lepsza) przy maksymalnym zasięgu obrazowania w głąb do 2 mm. Poprzeczna zdolność rozdzielcza wynosi ok. 30 μm , a materia zabytkowa jest naświetlana promieniowaniem podczerwonym z zakresu 790–900 nm o bezpiecznym natężeniu 0,6–1,5 mW. Czulość tomografu wynosi 108 dB, a czas pomiaru pojedynczego przekroju (B-skanu): ok. 0,2 s.

Tomogramy prezentowane są w postaci obrazów w tzw. skali „fałszywych” kolorów. Oznacza to, że barwy od czarnej, poprzez odcienie szarości do białej² kodują różną intensywność rozproszonego światła. Ośrodki nierozpraszające, czyli przepuszczające światło w głąb (takie jak np. powietrze, szkło lub czysty werniks), widoczne są więc jako czarne, natomiast ośrodki rozpraszające (np. pigmentowane werniksy, warstwy malarskie) przybierają na tomogramach różne odcienie szarości. Największa intensywność rozproszonego światła charakteryzuje granice pomiędzy ośrodkami znacznie różniącymi się współczynnikami załamania światła.

3. OCT w badaniach strukturalnych

Analiza budowy stratygraficznej dzieła sztuki jest ważnym etapem badań konserwatorskich. Poprzez ustalenie ilości warstw, ich grubości, ciągłości, a ostatecznie także składu chemicznego, możliwe staje

ture of the studied object to obtain the image of its section. To achieve this a narrow beam of infrared light of low intensity probes the object perpendicularly to its surface. By passing the beam in parallel directions, along the chosen line, an image of the section of the studied structure is obtained (which is called B-scan, by analog to ultrasonography). Repeating this procedure many times, along parallel lines, a set of B-scans is obtained, which contains the information about three-dimensional – spatial construction of the object. The detailed description of the construction and the features of the all versions of the OCT devices is wide accessible in the literature of the object (an extensive discussion is contained for example in the newly issued monograph under Fujimoto edition [7]), meanwhile one can find the review of applications for material investigations in the article by Stifter [8]. The list of all the reports published so far in the world, relating to application of optical scanning for the investigations of the works of art and in their conservation, often together with freely accessible sources in English and Polish, is available at the Internet site www.oct4art.eu [3].

The spectral optical scanner constructed by our team features the following parameters: axial (in depth) resolution is 4.5 μm in the air (in the material, e.g. in the varnish it is 1.4 times better) at maximum range of imaging in depth up to 2 mm. Transverse resolution is approx. 30 μm , and the antique matter is exposed to infra-red radiation of the 790–900 nm range, of safe intensity 0.6–1.5 mW. The sensitivity of the tomograph is 108 dB, and the time of the measurement of a single section (B-scan): approx. 0.2 s.

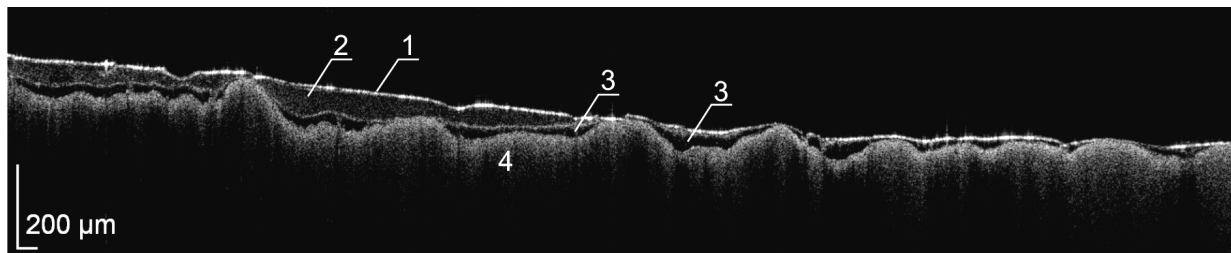
The tomographs are presented in the form of images in the so-called scale of ‘false’ colors. This means that the colors, from black through a variety of grey to white² code various intensity of the scattered light. The media non-scattering, that is letting the light through, in depth (such as e.g. air, glass or clear varnish), are then visible as black, whereas the medias scattering light (e.g. pigmented varnishes, painters' layers) take on the tomographs various hues of grey. The highest intensity of scattered light characterizes the boundaries between the media with considerably different coefficients of the light refraction.

3. OCT in structural investigations

Analysis of stratigraphic build of the work of art is an important stage of conservator's investigations. By establishing the number of layers, their thickness, continuity, and finally also their chemi-

się rozpoznanie techniki wykonania, historii oraz autentyczności obiektu zabytkowego.

Przykład tego typu struktury widoczny jest na tomogramie OCT przedstawionym na rys. 2. Składa się on z pionowych linii, tzw. A-skanów obrazujących położenie centrów rozpraszania wzdłuż drogi promienia sondującego. Ponieważ pada on na badany obiekt od góry, pierwszą wyraźnie widoczną na tomogramie linią jest granica powietrze – powierzchnia badanego przedmiotu. W przypadku obrazów sztalugowych, zazwyczaj jest to powierzchnia werniksu.



Rys. 2. Tomogram OCT uzyskany ze skanowania XIX w. obrazu olejnego na płótnie („Portret kobiety”, własność prywatna). Od góry kolejno widoczna jest powierzchnia obrazu (1), warstwa werniksu częściowo rozpraszającego światło (2), warstwa przezroczystego werniksu (3), nieprzezroczysta warstwa malarska (4)

Fig. 2. An OCT tomograph of the 19th C. oil painting on canvas (*Portrait of the woman*, private collection). The first line visible from the top is the painting's surface (1), then the layer of varnish which is moderately scattering probing light (2), then transparent varnish (3) and opaque paint layer (4)

Kolejne obserwowane warstwy przezroczyste (jak laserunki), półprzezroczyste (niektóre warstwy malarskie) lub kryjące, w różnym stopniu rozpraszają i przepuszczają światło, tworząc obraz struktury obiektu. Warstwa najniżej widoczna na tomogramie OCT jest zarazem pierwszą o właściwościach kryjących.

W przypadku tomogramu uzyskanego w wyniku badania XIX-wiecznego obrazu olejnego na płótnie (rys. 2), zasięg wierzchniego, silnie rozpraszającego światło (barwionego?) werniksu wyraźnie ograniczony jest do partii zobrazowanej po lewej stronie. Pod nim, na całym badanym obszarze zaobserwować można cieńszą warstwę werniksu nie rozpraszającego światła. Fakt istnienia wyraźnej granicy pomiędzy dwiema warstwami, jak również różny stopień rozpraszania światła przez obie warstwy, pozwala przypuszczać, że mamy do czynienia z dwoma rodzajami werniksu, różniącymi się współczynnikiem załamania światła. Warstwy te najprawdopodobniej pochodzą z różnych faz chronologicznych. Położona pod nimi warstwa malarska jest kryjąca. Świadczy o tym silny, zanikający stopniowo w dół, sygnał od wielokrotnego rozproszenia. Uniemożliwia to ustalenie zasięgu tej warstwy jak też głębszej budowy obiektu.

W obrębie badań strukturalnych tomografia optyczna bywa też niekiedy interesującym narzędziem do lokalizowania wczesnych stadiów rozwarstwień i odspojień, jak również określania ich zasięgu [6, 9].

cal analysis, it becomes possible to recognize the technique of realization, history and authenticity of an antique object.

The example of this type of structure can be seen on an OCT tomograph introduced on fig. 2. It consists of perpendicular lines, so-called A-scans, illustrating the positions of the centers of scattering, along the way of the probing beam. Because it falls upon the studied object from the top, the first line clearly visible on the tomograph is the boundary air – surface of the studied object. In the case of the easel paintings, usually it is the surface of varnish.

The following observed layers: transparent (such as glaze), semi-transparent (some painters' layers) or covering, in various extent scatter and let through light, creating the image of the structure of the object. The lowest visible layer on the OCT tomograph is also the first one of covering properties.

In the case of the tomograph obtained in the result of the investigation of XIX C. oil painting on canvas (fig. 2), the range of the top, strongly scattering light (dyed?) varnish is clearly limited to the part pictured on the left side. Underneath one can observe a thinner layer of varnish not scattering light, on the whole studied area. The fact of existence of clear boundary between the two layers, and also the various extent of light scattering by both layers, lets us suppose that we are dealing with two kinds of varnish, of different coefficient of light refraction. These layers most probably come from various chronological phases. The paint layer laid underneath is a covering one. Strong signal from multiple scattering, gradually disappearing when going downwards, testifies about this. This makes impossible establishing the reach of this layer, and also deeper going build of the object.

Within structural investigations optical scanning sometimes tends to be also an interesting tool for locating early stages of layer-splitting and detaching, as well as determining their range [6, 9].

Dane objętościowe (3D) mogą zostać wykorzystane do cyfrowego odtworzenia nie tylko kształtu zewnętrznej powierzchni obiektu, ale też powierzchni pokrytych przezroczystymi powłokami [10, 11].

Warto tu zwrócić uwagę, że sposób prezentacji danych uzyskanych techniką OCT, dzięki analogii do klasycznej mikrofotografii przekrojów materii zabytkowej, należy uznać za przyjazny dla użytkownika – konserwatora dzieł sztuki. Tomogramy OCT są stosunkowo prostymi w odbiorze obrazami przekrojów materii badanego obiektu, jednakże należy być świadomym pewnych różnic występujących między obrazem OCT, a mikrofotografią. Oprócz stosowanej w OCT skali „fałszywych” kolorów, odmienna jest dopuszczalna wielkość badanego obszaru. W OCT możliwe jest w jednym pomiarze zobrazowanie nawet kilkunastomilimetrowego obszaru eksponatu, podczas gdy rozmiary pobranej próbki rzadko przekraczają 1–2 mm. Poza tym, rozdzielczość osiowa tomografu jest zazwyczaj lepsza od poprzecznej, tomogramy są więc zwykle rozciągane w kierunku pionowym w celu czytelniejszego. Wówczas skala pionowa i pozioma na obrazie OCT nie są sobie równe. W niektórych sytuacjach dochodzi wreszcie do powstania pewnych niewielkich i przewidywalnych zniekształceń obrazu, spowodowanych refrakcją (możliwych do korekcji numerycznej).

4. OCT jako narzędzie wspomagające ocenę autentyczności obiektów

Jednym z pierwszych zastosowań OCT w badaniu dzieł sztuki było wykorzystanie tej techniki do rozróżniania naturalnie i sztucznie starzonych obiektów z jadeitu charakteryzujących się różną morfologią a tym samym przeświecalnością dla promieniowania podczerwonego [12]. Na podobnej zasadzie za pomocą OCT można w prosty sposób odróżnić prawdziwą porcelanę od innych wyrobów ceramicznych [5]. Także w przypadku obrazów sztalugowych o skomplikowanej budowie, gdy inne metody badań: w podczerwieni, promieniach Rentgena czy obserwacja fluorescencji lica wzbudzonej UV, wskazują na burzliwą historię obiektu i liczne ślady interwencji w jego strukturę (obecność przemalowań, retuszy, wtórnych werniksów), precyzyjne określenie położenia poszczególnych fragmentów warstwy malarzkiej w strukturze obrazu za pomocą OCT może pomóc rozstrzygnąć wiele kwestii związanych z historią, a także autentycznością dzieła sztuki.

The volumetric data (3D) can be used for digital reproducing not only the shape of the external surface of the object, but also of the surfaces covered with transparent layers [10, 11].

It is worth pointing out that, thanks to its analog to the classic microphotography of the sections of the antique matter, the way of presenting the data obtained by the OCT technique should be recognized as user friendly for the conservator of the works of art. The OCT tomographs are relatively simple in perception images of the sections of the matter of the object studied, yet one should be aware of certain differences between an OCT image and a microphotography. In addition to the applied in OCT scale of 'false' colors, there is also different admissible size of the studied area. In OCT it is possible to image in one measurement even a dozen or so millimeter area of the exhibit, while the sizes of the taken sample seldom are bigger than 1–2 mm. Besides, the axial resolution of the scanner is usually better than transverse resolution, so the tomographs are usually stretched in the vertical direction in order to make them better legible. Then the vertical and horizontal scale in the OCT image are not the same. Finally, in some cases there occurs certain small and foreseeable distortion of the image, caused by refraction (which is possible to be numerically corrected).

4. OCT as a supportive tool for assessment of authenticity of objects

One of the earliest applications of OCT in the investigation of the works of art was utilization of this technique in order to distinguish the artificially aged objects made from jadeite from those naturally aged, which are characterized by different morphology and the same by different translucence to the infra-red radiation [12]. One the similar principle one can in easily distinguish true china from other ceramic articles, using OCT [5]. Also in the case of easel paintings of a complex structure, when other methods of investigations, those in infra-red radiation, with X-rays apparatus, or by observation of the fluorescence of the painting face excited by UV, show that the object had a stormy history and has numerous traces of intervention in its structure (presence of repainting, retouching, secondary varnishes), precise qualification of the position of the individual fragments of the paint layer in the structure of painting using the OCT method can help sort out many doubts connected with history, and also the authenticity of the work of art.

Możliwość uzyskiwania w całkowicie nieinwazyjny sposób obrazów przekrojów stratygraficznych okazała się być szczególnie przydatna do precyzyjnego ustalenia kolejności warstw malarzkich i werniksów w nietykalnych rejonach inskrypcji i sygnatur. W tych miejscach pobieranie próbek czy wykonywanie odkrywek nie jest praktykowane ze względów etycznych. Badanie OCT pozwala stwierdzić na przykład, czy sygnatura leży na warstwie oryginalnego werniksu albo na jego pozostałościach. Ocena taka jest możliwa nawet gdy obraz dodatkowo został pokryty „postarzającym” lakierem, który w standardowym badaniu fluorescencji powierzchni obrazu w UV, ze względu na bardzo silną luminescencję, może całkowicie ukryć fałszerstwo [10].

Ciekawego przykładu wykorzystania OCT do ustalenia kolejności warstw w obrębie historycznych inskrypcji dostarczyło badanie [13] obrazu na płótnie pochodzącego z kościoła klasztornego oo. Franciszkanów w Pakości, przedstawiającego św. Leonarda z Porto Maurizio³. W trzech inskrypcjach obecnych na obrazie – *St. Leonard, 1797* oraz zakryty przemalowaniem i grubą warstwą wtórnych werniksów napis *B. Leonardus d.(a?) Maurizio* – utrwalona była nie tylko materialna historia dzieła sztuki, ale także droga do świętości Leonarda. Obraz był przynajmniej trzykrotnie odnawiany. Badania OCT wykazały jednoznacznie, że imię świętego domalowano podczas ostatniej konserwacji, która miała miejsce po kanonizacji Leonarda, czyli po 1867 roku. Napis, o którym mowa został wykonany kryjącą farbą słabo pochłaniającą i w znacznym stopniu rozpraszającą promieniowanie podczerwone. Należy on do ostatniej warstwy chronologicznej leżącej na kilku warstwach wtórnych werniksów (rys. 3a). Następnie, analizując tomogram wykonany w strefie napisu *B. Leonardus d.(a?) Maurizio*, udało się ustalić, że w tej samej fazie zamalowana została wcześniejsza inskrypcja określająca Leonarda jako błogosławionego, należąca do pierwszej warstwy chronologicznej. Leonard beatyfikowany został w 1796 roku, tak więc data 1797 jest prawdopodobnie datą powstania obrazu.

Na rysunku 3b widoczny jest silny sygnał odpowiadający warstwie malarskiej daty 1797, która położona jest głęboko pod powierzchnią obrazu. Na tej podstawie można domniemać, że widoczna warstwa należy do zdecydowanie wcześniejszej fazy chronologicznej niż inskrypcja *St. Leonard*.

Analiza wzajemnych relacji między warstwami werniksów i inskrypcji w powiązaniu z historią św. Leonarda pomogła w uściśleniu dato-

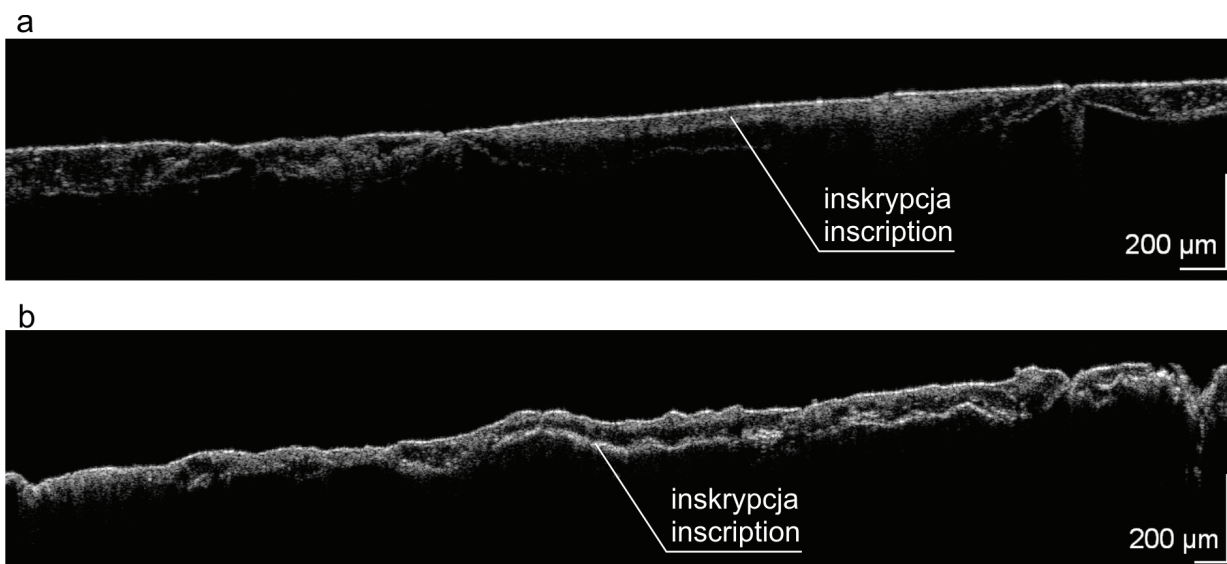
The possibility of obtaining in entirely non-invasive way the images of stratigraphic sections has proved to be particularly useful for precise settlement the order of painters' layers and varnishes in the inviolable regions of the inscriptions and signatures. In these places taking samples or making strip uncovering is not practised due to ethical regards. The investigation with OCT lets to confirm for example if the signature lies on the layer of the original varnish or on his remainders. Such assessment is possible even when the painting was additionally covered with the 'making look old' varnish, which in the standard investigation of the fluorescence of the surface of the painting in UV, because of the very strong luminescence, can entirely conceal the falsification [10].

The investigation of the painting on canvas, coming from the monastic church of Franciscan Friars in Pakość, representing St. Leonard from Porto Maurizio³, carried out in order to find out the order of layers in the area of historical inscription, provided an interesting example of utilization of OCT [13]. In three inscriptions present on the painting – *St. Leonard, 1797* and covered by repainting and a thick layer of secondary varnishes inscription *B. Leonardus d.(a?)Maurizio* – there was fixed not only material history of the work of art, but also the road to Leonard's holiness. The painting had been at least three times renovated.

The investigations with OCT showed unambiguously that the name of the saint was painted on during the last conservation, which took place after canonization of Leonard, that is after 1867. The mentioned inscription was made with a covering paint, absorbing faintly and in a considerable extent scattering infra-red radiation. It belongs to the last chronological layer lying on several layers of secondary varnishes (fig. 3a). Then, by analyzing the tomograph made in the zone of the inscription *B. Leonardus d.(a?)Maurizio*, it was possible to find out that at the same phase, the earlier inscription defining Leonard as blessed, belonging to the first chronological layer, was over-painted. Leonard was beatified in 1796, so now the date 1797 is probably the date the painting came to being.

There is a strong signal visible on the Fig. 3b, corresponding to the paint layer of the date 1797, which is laid deep under the surface of the painting. One can allege on this basis that the visible layer belongs to decidedly earlier chronological phase than the inscription *St. Leonard*.

The analysis of mutual relations between the layers of varnishes and the inscription in connection with the history of St. Leonard helped in



Rys. 3. Tomogramy uzyskane ze skanowania XVIII w. obrazu olejnego na płótnie („Św. Leonard z Porto Maurizio”, własność klasztoru oo. Franciszkanów w Pakości). Widoczna różnica w lokalizacji warstwy malarskiej inskrypcji w partii imienia „St. Leonard” (a) oraz daty „1797” (b)

Fig. 3. OCT tomographs of the 18th C. oil painting on canvas ('Saint Leonard of Porto Maurizio', property of the Franciscan Monastery in Pakość). The difference in location of paint layer of inscriptions: 'St. Leonard' (a) and the date '1797' (b) is evident

wania obrazu i jego kolejnych aktualizujących przekształceń.

specifying the date of painting and its further actualizing transformations.

5. „Absolutna” stratygrafia LIBS z wykorzystaniem OCT

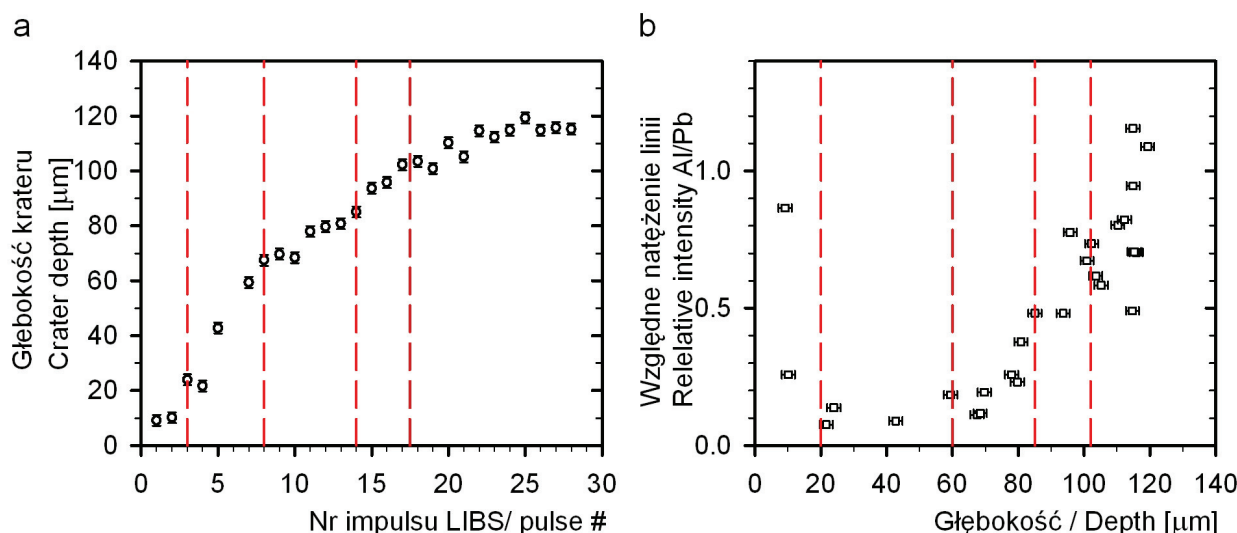
5. 'Absolute' stratigraphy LIBS with utilization of OCT

LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy) jest metodą analityczną pozwalającą określić skład pierwiastkowy badanego materiału poprzez analizę widma fluorescencji plazmy powstałej w wyniku ablacji mikrokrateru z użyciem krótkich impulsów laserowych (10 ns). Szczególną odmianą tej techniki jest tzw. stratygrafia LIBS. W tym przypadku energia impulsów laserowych jest dobierana w taki sposób, aby po każdym impulsie lasera ablacji ulegała jedynie cienka warstewka materiału. Wówczas analiza kolejno rejestrowanych widm fluorescencji plazmy pochodzących z tego samego krateru pozwala wyodrębnić pierwiastki charakterystyczne dla kolejnych warstw obiektu. W konsekwencji możliwa jest identyfikacja obecnych w warstwie związków chemicznych, a tym samym konkretnych pigmentów. Jest to szczególnie ważne podczas badania eksponatów o złożonej, wielowarstwowej budowie, takich jak obrazy na płótnie.

Niedogodnością klasycznej metody stratygrafii LIBS jest brak informacji o głębokości krateru, z którego pochodzi plazma. Dodatkowo, różna odporność poszczególnych warstw sprawia, że pogłębianie krateru nie zachodzi równomiernie. Uniemożliwia to „absolutne” (w mikrometrach) wyskalowanie uzyskanego profilu koncentracji pierwiastków.

LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy) is the analytic method letting to determine the chemical analysis of the studied material by analyzing the fluorescence spectrum of plasma formed in the result of ablation of a micro-crater with application of short laser impulses (10 ns). So-called LIBS stratigraphy is a special modification of this technique. In this case the energy of laser impulses is chosen in such a way that only a thin layer of material undergoes ablation after each laser impulse. Then the analysis of fluorescence spectra of plasma, coming from the same crater, recorded one by one, enables to distinguish chemical elements characteristic for sequential layers of the object. In the consequence it is possible to identify the chemical compounds present in the layer, which means identifying individual pigments. This is especially important while studying exhibits of complex, many-layered build, such as paintings on canvas.

Lack of information about the depth of the crater from which the plasma comes is an inconvenience of the classic method LIBS stratigraphy. Additionally, different resistance of individual layers causes that deepening of the crater does not go ahead evenly. This makes 'absolute' (in micrometers) assigning a scale to the obtained profile of concentration of chemical elements impossible.



Rys. 4. Absolutna stratygrafia LIBS z wykorzystaniem OCT obrazu olejnego na płótnie „Madonna z Dzieciątkiem” – XVIII w. (?). (a) Głębokość krateru ablacynego, z którego dna pochodzi analizowana plazma, wyznaczona za pomocą OCT. (b) Absolutny profil LIBS układu warstw malarskich. Widoczna warstwa werniksu (0–20 μm), przemalowanie II (20–60 μm), kryjące przemalowanie I (60–83 μm), oryginalna warstwa malarska (83–102 μm) oraz bogata w glin warstwa zaprawy (poniżej 102 μm)

Fig. 4. Absolute LIBS stratigraphy with the use of OCT of 'Virgin with Child' – oil on canvas, 18th C. (?). (a) Depth of ablation crater, the source of plasma, as determined by OCT. (b) Absolute LIBS profile of paintings strata. Following layers are visible: varnish (0–20 μm), 2nd overpainting (20–60 μm), covering the 1st overpainting (60–83 μm), original paint layer (83–102 μm), and prime layer rich in aluminum (below 102 μm)

Zaproponowane przez nasz zespół we współpracy z grupą prof. J. Marcza z Instytutu Optoelektroniki WAT [14] zastosowanie tomografii optycznej do monitorowania tego procesu usuwa powyższą niedogodność. Dzięki OCT możliwe jest bezwzględne określenie głębokości, z jakiej pochodzi analizowana plazma (rys. 4a). Dodatkowo, często możliwe jest bezpośrednio wyznaczenie grubości i zasięgu warstw technologicznych na podstawie różnic w szybkości ablacji (pionowe przerywane linie na rys. 4a). Uzyskana informacja może posłużyć do bezwzględnego wyskalowania danych LIBS. Na rysunku 4b przedstawiony jest przykład takiego rezultatu w postaci stosunku natężeń linii (Al 394 nm do Pb 405 nm).

W miejscu badania koncentracja ołowiu jest zbliżona we wszystkich warstwach i służy właściwej normalizacji wyników. Jak widać, związki glinu są nieobecne w drugim przemalowaniu (warstwa 20–60 μm), natomiast warstwa zaprawy (poniżej 102 μm) jest szczególnie bogata w ten pierwiastek.

Dodatkowo za pomocą OCT można, analizując grubość i kompozycję warstwy malarskiej w miejscu planowanego badania LIBS, poprzez świadomy wybór interesujących partii obiektu, ograniczyć do minimum ingerencję w jego strukturę. Można też na przykład od razu wykryć i wykluczyć miejsca wcześniejszych ingerencji konserwatorskich.

Application of optical tomography for monitoring this process proposed by our team in the co-operation with the group of professor J. Marczak from The Institute of Optoelectronics WAT [14] removes the above mentioned inconvenience. Thanks to OCT it is possible to determine absolute depth from which the analyzed plasma comes (fig. 4a). Additionally, determining of thickness and reach of technological layers on the basis of differences in the ablation rate (vertical intermittent lines on fig. 4a) is often directly possible. The obtained information can be used for absolute assigning a scale to the LIBS data. In the fig. 4b an example of such result in the form of the ratio of the intensities of Al line to Pb line (Al 394 nm to Pb 405 nm) has been presented.

In the place of investigation the concentration of lead is alike in all the layers and serves for proper standardization of the results. As one can see, the aluminum compounds are absent in the second repainting (the layer 20–60 μm), whereas the layer of priming paint (below 102 μm) is particularly rich in this element.

Additionally, using OCT, one can limit interference in the structure to minimum by analyzing the thickness and composition of paint layer in the place of planned LIBS investigation and conscious choice of the interesting parts of the object. One can also, for instance, immediately detect and exclude the places of earlier conservator's interferences.

6. Analiza stanu zachowania witraży zabytkowych za pomocą OCT

Koherentna tomografia optyczna oferuje również nowe możliwości w analizie szkła zabytkowego – co więcej, pozwala uzyskiwać informacje niedostępne innymi metodami. Najciekawsze zastosowania OCT znajduje w badaniach procesów korozji szkła – zarówno witrażowego jak i naczyniowego [9, 15]. Procesy te wiążą się z dwoma czynnikami: składem szkła i obecnością wody. W przypadku zrównoważonych proporcji składników szkła (i odpowiednich warunków wilgotnościowych) woda reaguje ze szkłem tak wolno, że nie obserwuje się (z ludzkiej perspektywy patrząc) skutków korozji. Jeżeli jednak równowaga jest naruszona – przede wszystkim przy nadmiarze tlenków metali alkalicznych – rozpoczyna się reakcja pomiędzy tymi tlenkami z utworzeniem najpierw wodorotlenków i wtórnie węglanów jonów pierwiastków alkalicznych. Higroskopijne wodorotlenki wraz z również higroskopijnymi węglanami, adsorbują wodę z otoczenia tworząc stężony roztwór (makroskopowo widoczny jako „płacz szkła”) i reagując z siecią krzemianową rozkładają ją, korodując szkło.

W przypadku szkła witrażowego na zewnątrz budynku tworzą się dwie powłoki korozyjne: dolna, związana z podłożem szklanym, określana jako „warstwa żelowa”, składająca się z porowatej krzemionki oraz górna, powierzchniowa, składająca się z produktów reakcji jonów Me^{2+} z tlenkami kwasowymi z powietrza – głównie z gipsu. Od strony wewnętrznej konsekwencją reakcji szkła z wodą kondensacyjną są zazwyczaj wżery wypełnione również odszklonym szkłem – krzemionką.

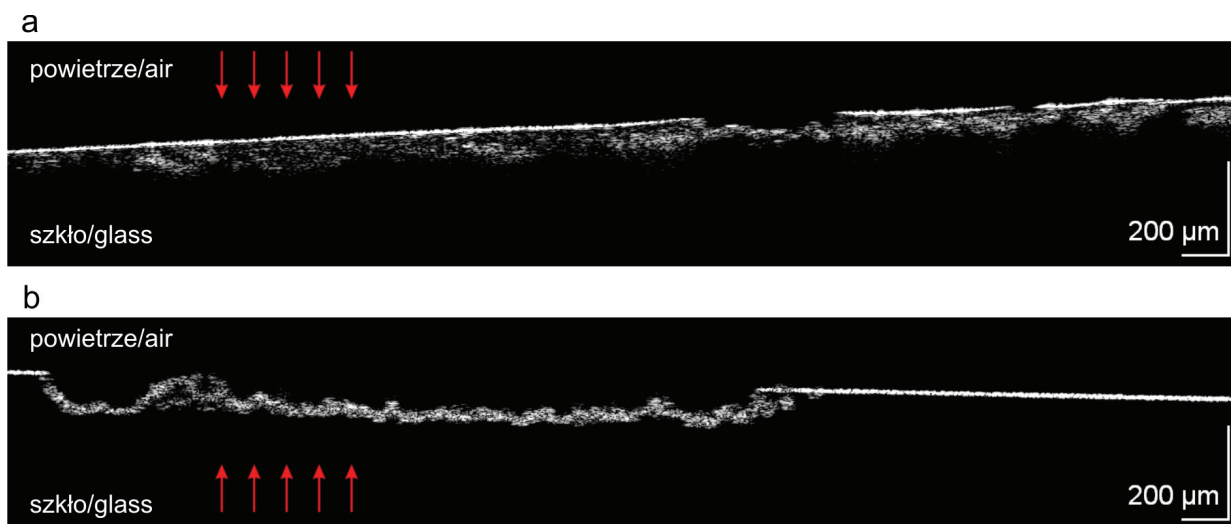
OCT jest jedną z najciekawszych metod służących do badania opisanych zjawisk, gdyż jest całkowicie nieinwazyjna (nie wymaga pobierania próbek), nie jest ograniczona rozmiarami badanych obiektów, nie wymaga specjalnego przygotowania przedmiotu badań oraz, w przypadku szkła, pozwala na rzecz wyjątkową – umożliwia obrazowanie nieprzezroczystych warstw korozyjnych od strony przeświecalnego podłoża. Szczególna wartość OCT na polu badań szkła wynika z możliwości identyfikacji zjawisk korozyjnych na wczesnym etapie ich powstawania. Umożliwia to podjęcie odpowiednich działań prewencyjnych już w początkowym etapie korozji, redukując tym samym szybkość jej zachodzenia. Na rysunku 5a przedstawiony jest przykład badania stanu zachowania próbki średniowiecznego szkła witrażowego. Widoczny jest zasięg warstwy żelowej oraz odspojenie.

6. The analysis of the condition of preservation of antique stained-glass windows using OCT

Coherent optical tomography offers also new possibilities in the analysis of the antique glass – what's more, it allows to obtain information inaccessible by other methods. The most interesting application of OCT is in the investigations of the processes of glass corrosion – both stained glass and glassware [9, 15]. These processes are associated with two factors: the composition of the glass and the presence of water. In the case of balanced proportions of the glass components (and corresponding moisture conditions), water reacts with glass so slowly that no corrosion effects may be observed (looking from the human perspective). However, if the equilibrium is disturbed – first of all at the excess of oxides of alkaline metals – there starts reaction of these oxides with creation firstly hydroxides and secondarily carbonates of alkaline elements. Hygroscopic hydroxides together with also hygroscopic carbonates adsorb water from surroundings and form a concentrated solution (macroscopically visible as the ‘crying of the glass’) and then react with the silicate lattice and decompose it, corroding the glass.

In the case of stained glass outside the building there form two corrosive layers: the bottom one, adhered to the glass base, defined as the ‘gelly layer’, consisting of porous silica, and the upper one, superficial, consisting of the products of reaction of Me^{2+} ions with acidic oxides from the air – mainly of gypsum. Usually from the internal side, as the result of the reaction of glass with condensed water, there form pits, also filled with unglazed glass – silica.

OCT is one of the most interesting methods for investigation of the described phenomena, because it is entirely non-invasive (it does not require taking samples), it is not limited by the sizes of studied objects, it does not require any special preparation of the object for the investigations and, in the case of glass, it allows to carry out an exceptional thing – it makes possible to make image of opaque corrosive layers from the translucent side of base. The special value of OCT in the field of investigations of glass is due to the possibility of identification of corrosive phenomena at an early stage of formation thereof. This makes possible undertaking suitable preventive operations at the initial stage of corrosion, thus reducing the rate of proceeding thereof. In the fig. 5a an example of investigation of the conditions of preservation of a sample of mediaeval stained glass has been presented. The reach of formation of the gelly layer and the detachment is visible.



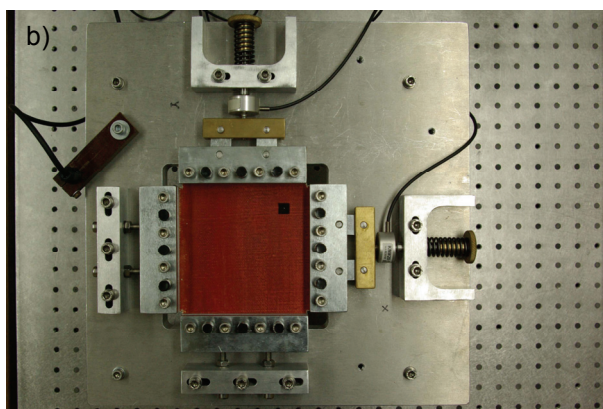
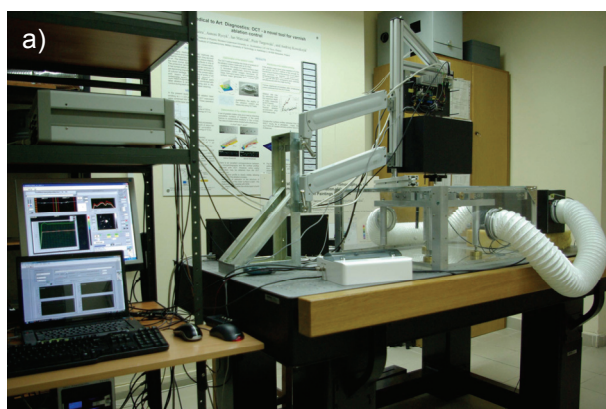
Rys. 5. Tomogramy OCT dwu różnych próbek szkła: (a) szkło witrażowe z zaawansowaną korozją, badanie od strony skorodowanej, (b) szkło z pittingiem, badanie przez warstwę szkła

Fig. 5. OCT tomographs of two different samples of glass: (a) stained glass with advanced corrosion, examined from the corroded side, (b) glass with pitting, examined through the glass layer

Natomiast rysunek 5b przedstawia szkło z mniej zaawansowaną korozją, tzw. pittingiem. W tym przypadku badanie przeprowadzono przez warstwę szkła. W ten sposób zasięg warstwy żelowej w głąb szkła jest dokładniej widoczny.

7. OCT jako narzędzie do monitorowania reakcji obiektu na zmianę warunków klimatycznych w jego otoczeniu

Dzięki możliwości odwzorowania kształtu powierzchni, tomografia optyczna jest także narzędziem pozwalającym na badanie obiektów, których warstwy nie są transparentne. Właściwość ta jest wykorzystywana m.in. do monitorowania reakcji malowideł na płótnie, będącej odpowiedzią na wahania warunków klimatycznych, w jakich obraz jest przechowywany⁴.



Rys. 6. (a) Układ pomiarowy do śledzenia reakcji obrazów na płótnie na wahania klimatyczne. (b) Krosno z tensometrami z zamontowaną pośrodku próbką, stosowane do monitorowania wpływu zmian klimatycznych na malowidła na płótnie

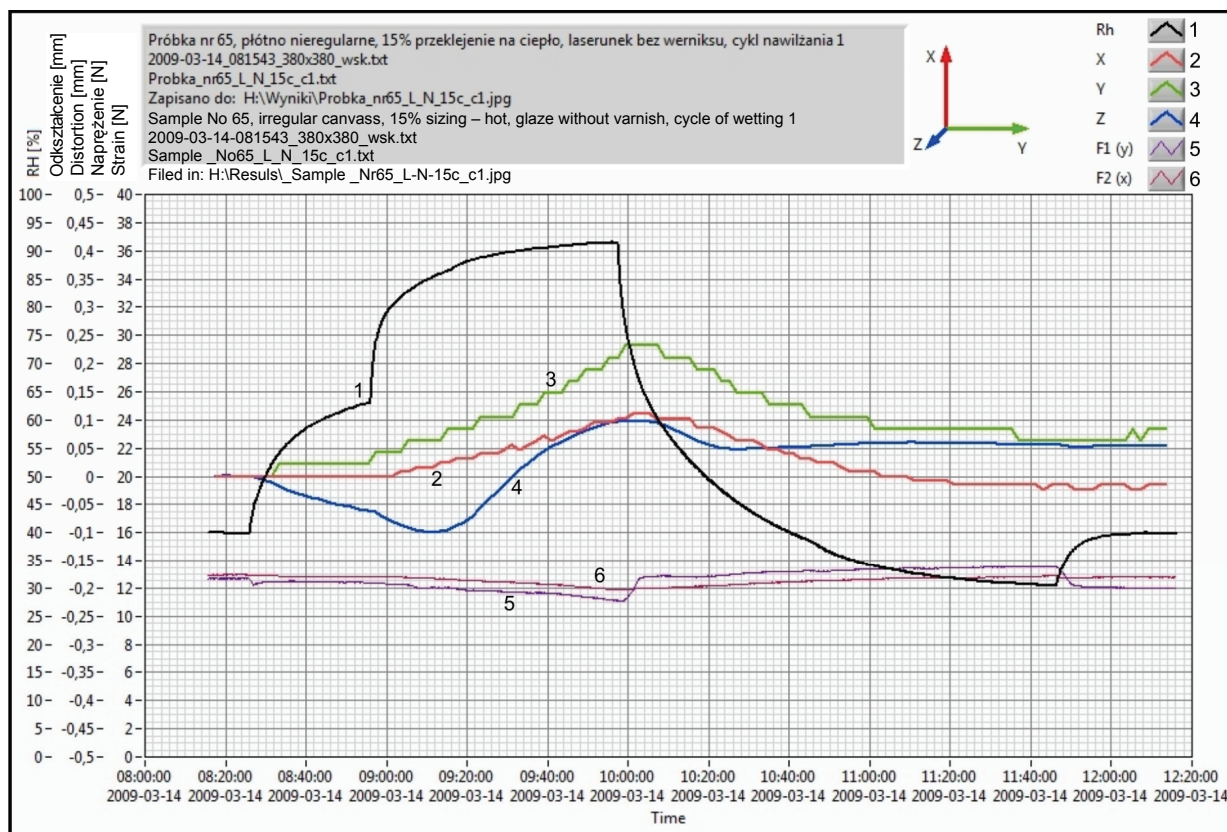
Fig. 6. (a) Installation used in tracking the reaction of canvas paintings to the climatic fluctuations. (b) The stretcher with force sensors and a test sample in the centre used for monitoring environmentally-induced changes in multilayer canvas paintings

Przykładowy wykres (rys. 7) obrazuje wyniki badania modelu imitującego obraz w technice wielowarstwowej, z podłożem płóciennym przygotowa-

An example graph (fig. 7) illustrates the results of the investigation of a model imitating a multilayer technique painting, with canvas base pre-

nym wbrew zasadom poprawności technologicznej: o nieregularnej budowie, zaimpregnowanym zbyt mocnym, 15% klejem zaaplikowanym na ciepło. Model obrazu poddano czterogodzinnemu cyklowi nawilżania z późniejszym osuszaniem. Zarejestrowano przesunięcia obserwowanego punktu w trzech kierunkach jednocześnie: X i Y (osnowy i wątku) oraz w kierunku Z, będące natychmiastową reakcją płótna i przeplecia na wzrost, a następnie spadek wilgotności względnej w komorze klimatycznej.

pared against the principles of technological correctness: of irregular build, impregnated with too concentrated, 15% glue applied hot. The model of the painting was subjected the four-hours' cycle of wetting with consequent drying. There were registered displacements of observed point in three directions simultaneously: X and Y (warp and weft) and in the direction Z, being an immediate reaction of the canvas and sizing to rise and then drop of relative humidity in the climatic chamber.



Rys. 7. Wykres obrazujący reakcje wielowarstwowego malowidła na nieregularnym płótnie z silnym 15% przeplecieniem na ciepło, na cykl zmiany wilgotności: nawilżanie do 90% RH i osuszanie do 30% RH. Jednocześnie rejestrowane są przesunięcia w trzech kierunkach (X,Y,Z) i zmiany w naprężeniu próbki

Fig. 7. Diagram of reactions of multilayer painting on irregular canvas with strong 15% gelatine sizing applied hot, to the cycle of changeable humidity: wetting to 90% RH, drying to 30% RH. Displacements in three dimensions (X,Y,Z) and changes in the tension of sample are recorded simultaneously

W prezentowanym przypadku, po rozpoczęciu nawilżania w pierwszym cyklu, obserwuje się reakcję płótna w kierunku Z, a zaraz potem w kierunku Y (zgodnym z wątkiem), nieco później, gdy Rh osiąga 65%, płótno ulega również odkształceniu w kierunku X, zgodnym z osnową. Maksymalnie odkształcenia osiągają wartości od -0,1 do 0,1 mm dla Z, 0,22 mm dla Y i 0,11mm dla X. Gdy cykl wchodzi w fazę osuszania, odkształcenia cofają się, ale nawet po ustabilizowaniu warunków, obserwowany punkt nie wraca do pierwotnego położenia. Potwierdza to obserwowaną przez konserwatorów intensywność niemal natychmiastowych, wielokierunkowych reakcji malowideł na płótnie na każdą zmianę wilgotności względnej w otoczeniu.

In the presented case, after beginning of wetting in the first cycle, some reaction of the canvas in the direction Z was observed, and soon afterwards in the direction Y (along the weft), somewhat later, when Rh achieved 65%, the canvas also underwent deformation in direction X, along the warp. Maximum achieved values of deformations were from -0.1 to 0.1 mm for Z, 0.22 mm for Y and 0.11 mm for X. When the cycle comes in the phase of drying, deformation recede, but even after stabilizing conditions, the observed point does not come back to its original position. This confirms observed by conservators intensity of almost immediate, multidirectional reactions of paintings on canvas to any change of relative moisture in its surroundings.

Metoda, zatem może być przydatna do określania, jaki wpływ na stan zachowania obrazu, na przebieg procesu starzenia i stopień destrukcji może mieć budowa techniczna obiektu, błędy popełnione w procesie twórczym, czy nawet późniejsze ingerencje konserwatorskie. Dodatkowo może dać odpowiedź na liczne pytania, np.: jak najlepiej przygotować podłoże obrazu, aby był stabilny i mógł przeciwstawiać się procesom niszczenia, jakich błędów w procesie twórczym unikać, aby dzieło miało szanse przetrwać wiele lat bez uszczerbku, czy wreszcie: jakie procesy mają miejsce w strukturze obrazu w trakcie cyklicznych zmian warunków w otoczeniu zabytku.

8. Podsumowanie

Przedstawiony tutaj przegląd nie stanowi wyczerpującego zestawienia wszystkich zastosowań OCT dla konserwacji i inwentaryzacji zabytków. Przykładowo, ramy tego opracowania przekracza opis naszych prac nad wykorzystaniem OCT do monitorowania procesów laserowej ablacji powłok, w tym trudno usuwalnych werniksów. Temat ten realizujemy we ścisłej współpracy z Instytutem Optoelektroniki WAT [11,19-21]. Tym bardziej nie było możliwe omówienie innych zastosowań, rozwijanych poza Polską [3].

Nie ulega wątpliwości, że dostępność komercyjnej aparatury jest ważnym czynnikiem ułatwiającym rozwój każdej metody analitycznej. Jak na razie przeważająca część prac powstaje w oparciu o aparaturę prototypową, jednakże obecnie na rynku dostępnych jest już kilka aparatów, które można bezpośrednio wykorzystać dla celów diagnostyki konserwatorskiej⁵.

Badania metodą OCT samych obiektów zabytkowych oraz zachodzących w nich procesów, zainicjowane w ośrodku toruńskim, są dziś prowadzone w ścisłej współpracy z przedstawicielami warszawskiego i krakowskiego środowiska konserwatorskiego. Mają one wielkie znaczenie dla praktyki, ponieważ dają konserwatorom – restauratorom dzieł sztuki narzędzia pozwalające zmniejszać obszary niejasności, zastępując pola domysłów i swobodnych interpretacji wynikami obiektywnych pomiarów. Podłożem tak korzystnego i dynamicznego rozwoju badań jest fakt harmonijnej współpracy przedstawicieli różnych dziedzin nauki, w której jednak każdy temat badawczy wypływa bezpośrednio z praktyki konserwatorskiej, jest dyktowany przez konkretny obiekt i służy rozwiązaniu jego problemów, a przez to staje się niemal automatycznie narzędziem gotowym do przekazania szerokiej praktyce.

Therefore the method can be useful for defining what influence the technical build of the object, as well as the mistakes committed in the creative process, or even later conservator's interferences may have on the condition of preservation, on the course of the process of aging and on the extent of damage of the painting. Additionally the method may give answers to numerous questions, e.g.: how to prepare the base of the painting the best to make it stable and able to resist to the processes of decay, what mistakes are to be avoided in the creative process to give work the chance to survive years without damage, and last but not least: what processes take place in the structure of the painting during cyclic changes of conditions in the surroundings of the relic.

8. Summary

The review presented here is not a comprehensive set of all applications of OCT for conservation and cataloguing of relics. For example, the description of our works on application of OCT for monitoring the processes of laser ablation of layers, in this hard to remove varnishes, exceeds the frames of this study. We have been realizing this issue in close co-operation with the Institute of Optoelectronics WAT [11,19-21]. Even more, it was not possible to discuss other applications, being developed abroad [3].

It is undoubted that accessibility of the commercial apparatus is an important factor facilitating development of any analytic method. So far the predominant part of works comes into being on the basis of prototype apparatuses, yet at present there are already accessible on the market several apparatuses which can be directly used for the purposes of the conservator's diagnostics⁵.

Investigations of antique objects as such, and the processes running therein with the help of the OCT method, initiated in the Toruń centre, are at present carried out in close co-operation with the representatives of the Warsaw and Cracov conservator's circles. They are of great importance for the practice, because they give the conservators – renovators of works of art the tools allowing to reduce the areas of vagueness, replacing the field of guesses and free interpretations by the results of objective measurements. The basis for such profitable and dynamic development of investigations is the fact of harmonious co-operation of the representatives of various fields of the science, in which, however, every investigative subject comes out directly from the conservator's practice, is dictated by a concrete object and serves to sort out its problems, and becomes almost automatically a tool ready to be offered for wide practice.

Literatura • References

- [1] Huang D., Swanson E.A., Lin C.P., Schuman J.S., Stinson W.J., Chang W., Hee M.R., Flotte T., Gregory K., Puliafito C.A., and Fujimoto J.G., *Optical coherence tomography*, Science, 1991, 254, pp. 1178-1181.
- [2] Targowski P., Rouba B., Gorczyńska I., Wojtkowski M., Kowalczyk A., *Zastosowanie metod optyki koherentnej do nieinwazyjnego badania obiektów zabytkowych*, [in:] *Ars longa – vita brevis. Tradycyjne i nowoczesne metody badania dzieł sztuki*, Materiały z sesji naukowej poświęconej pamięci profesora Zbigniewa Brochwicza, Toruń, 18-19 X 2002, J. Flik ed., Wydawnictwo UMK, Toruń 2003, s. 121-129.
- [3] Zestawienie wszystkich publikacji dotyczących zastosowania OCT do badania obiektów zabytkowych: <http://www.oct4art.eu>.
- [4] Iwanicka M., *Przykłady zastosowania tomografii optycznej (OCT) do badań materiałowych i analizy struktury dzieła sztuki*, Acta Universitatis Nicolai Copernici – Zabytkoznawstwo i Konserwatorstwo, 2008, XXXVI, 386, s 177-190.
- [5] Targowski P., Góra M., Wojtkowski M., *Optical Coherence Tomography for Artwork Diagnostics*, Laser Chemistry, 2006, <http://www.hindawi.com/GetArticle.aspx?doi=10.1155/2006/35373>, 11 pages.
- [6] Rouba B., P. Karaszkiwicz P., L. Tymińska-Widmer L., Iwanicka M., Góra M., Kwiatkowska E., Targowski P., *Optical Coherence Tomography for Non-Destructive Investigations of Structure of Objects of Art*, [in:] *Proceedings of ART2008, The e-Journal of Nondestructive Testing 13(9)*: <http://www.ndt.net/search/docs.php3?MainSource=-1&id=6014>.
- [7] Drexler W., Fujimoto J.G., eds. *Optical Coherence Tomography, Technology and Applications*, Springer Verlag, Berlin – Heidelberg 2008.
- [8] Stifter, D., *Beyond biomedicine: a review of alternative applications and developments for optical coherence tomography*, Applied Physics B: Lasers and Optics, 2007, 88 (3), pp. 337-357.
- [9] Targowski P., Karaszkiwicz P., Rouba B.J., Markowski D., Tymińska-Widmer L., Iwanicka M., Kwiatkowska E.A., Sylwestrzak M. (2009), *Optical coherence tomography for non-invasive investigation of structure and properties of historic glass*, [in:] *The Art of Collaboration: Stained-Glass Conservation in the Twenty-First Century, CV US Conservation Studies I*, New York, American Corpus Vitrearum, Inc. [w druku].
- [10] Tymińska-Widmer L., Targowski P., Góra M., Iwanicka M., Lekawa-Wyslouch T., Rouba B., *Optical Coherence Tomography – a Novel Tool for the Examination of Oil Paintings*, [in:] *Conservation Science 2007*, Milan, 2007, Joyce Townsend et al., Archtype publishing, London 2008, pp. 175-182.
- [11] Targowski P., Rouba B., Góra M., Tymińska-Widmer L., Marczak J., Kowalczyk A., *Optical Coherence Tomography in Art Diagnostics and Restoration*, Applied Physics A, 2008, pp. 1-9.
- [12] Yang, M.L., Lu, C.W., Hsu, I.J. and Yang, C.C., *The use of Optical Coherence Tomography for monitoring the subsurface morphologies of archaic jades*, Archaeometry, 2004, 46, pp. 171-182.
- [13] Targowski P., Iwanicka M., Tymska-Widmer L., Sylwestrzak M., Kwiatkowska E.A. (2009), *Structural examination of easel paintings with Optical Coherence Tomography*, Acc. Chem. Res. [złożone do druku].
- [14] Kwiatkowska E.A., Marczak J., Ostrowski R., Skrzeczanowski W., Sylwestrzak M., Iwanicka M., Targowski P., *Absolute LIBS stratigraphy with Optical Coherence Tomography*, Proc. SPIE, 2009, 7391, 73910F.
- [15] J. Kunicki-Goldfinger J., Targowski P., Góra M., Karaszkiwicz P. Dzierżanowski P., *Characterization of Glass Surface Morphology by Optical Coherence Tomography*, Studies in Conservation, 2009, 54, pp. 117-128.
- [16] Rouba B.J., *Plótna jako podobrazia malarskie*, Ochrona Zabytków, 1985, 3-4, s. 222-244.
- [17] Rouba B.J. (1988) *Budowa techniczna obrazów XIX-wiecznych malowanych na handlowych podobrazjach płóciennych i tematyka ich konserwacji*, Toruń, Wydawnictwo UMK – rozprawy.
- [18] Rouba B.J., *Podobrazia płócienne w procesie konserwacji*, Wydawnictwo UMK, Toruń 2000.
- [19] Góra M., Targowski P., Rycyk A., Marczak J., *Varnish ablation control by Optical Coherence Tomography*, Laser Chemistry, <http://www.hindawi.com/GetArticle.aspx?doi=10.1155/2006/10647>, 7 pages.
- [20] Góra M., Targowski P., Kowalczyk A., Marczak J., Rycyk A., *Fast spectral optical coherence tomography for monitoring of varnish ablation process*, [in:] *Proceedings of the international conference LACONA VII: – Lasers in the Conservation of Artworks*, Madrid, Spain, September 17 – 21, 2007, M. Castillejo et al., eds., CRC Press, Taylor & Francis Group, London 2008, pp. 23-27.
- [21] Targowski P., Ostrowski R., Marczak J., Sylwestrzak M., Kwiatkowska E.A., *Picosecond laser ablation system with process control by Optical Coherence Tomography*, Proc. SPIE, 2009, 7391, 73910G.

* Uniwersytet Mikołaja Kopernika, Instytut Fizyki, Toruń, Polska

** Uniwersytet Mikołaja Kopernika, Instytut Zabytkoznawstwa i Konserwatorstwa, Toruń

*** Akademia Sztuk Pięknych im. Jana Matejki w Krakowie, Polska

* Nicolaus Copernicus University, Institute of Physics, Toruń, Poland

** Nicolaus Copernicus University, Institute for the Study, Restoration and Conservation of Cultural Heritage, Toruń, Poland

*** Jan Matejko Academy of Fine Arts, Cracow, Poland

¹ Badania nad zastosowaniem OCT do konserwacji zabytków finansowane są ze środków MNiSW (granty: 2 H01E 025 25 w latach 2003-2006, 3 T11E 015 26: 2004-2005, N N105 331334: 2008-2011) i JM Rektora UMK w roku 2008. MI, EAK i MS uzyskali wsparcie z programu „Stypendia dla doktorantów 2008/2009” współfinansowanego przez EFS UE i Budżet Państwa w ramach Zintegrowanego Programu Operacyjnego Rozwoju Regionalnego. Udział MI jest dodatkowo finansowany z programu „Ventures” realizowanego przez Fundację na rzecz Nauki Polskiej z funduszy UE – POIG.

² Często również stosuje skalę wielobarwną: ośrodki najslabiej rozpraszające oznacza się wówczas kolorem niebieskim, silniej – zielonym poprzez żółty do czerwonego.

³ Badania wykonano przy okazji prac konserwatorskich prowadzonych w ramach pracy dyplomowej Dągmary Mausolf realizowanej pod kier. prof. dr Bogumiły Rouba i mgr Ludmiły Tymińskiej-Widmer w Zakładzie Konserwacji Ma-larstwa i Rzeźby Polichromowanej UMK w Toruniu.

⁴ Zagadnieniami zależności między budową obrazów na płótnie a ich reagowaniem na zmiany klimatyczne zajmowała się wielokrotnie B. Rouba (m. in.: [16-18]). Badania obecnie podjęte są kontynuacją jej prac badawczych z wykorzystaniem nowego narzędzia, jakim jest OCT.

⁵ W cenach od ok. 25 do ok. 60 tys. euro. Najbardziej popularne urządzenia do diagnostyki siatkówki nie mogą być jednak wykorzystywane do badań materiałowych z uwagi na specyficzną budowę głowicy pomiarowej, przystosowanej do pomiaru poprzez rogówkę i soczewkę oka.

¹ Investigations on the use of OCT for conservation of relics are funded from the means of MNiSW (grants: 2 H01E 025 25 in years 2003-2006, 3 T11E 015 26:2004-2005, N N105 331334:2008-2011) and of His Magnificence Rector of UMK in the year 2008. MI, EAK and MS obtained a support from the program ‘Scholarships for postgraduates 2008/2009’ co-financed by EFS UE and the State Budget within the Integrated Operational Program for Regional Development. The participation of MI is additionally funded from the program ‘Ventures’ realized by The Foundation for Polish Science from the funds of UE -POIG.

² A multicolored scale is often applied: the media scattering the most faintly are marked with blue color then, those more strongly –green, through yellow to red.

³ Investigations were executed on the occasion of conservator’s works carried out within the M.Sc. thesis of Dagmara Mausolf, realized under the guidance of professor doctor Bogumiła Rouba and Ludmiła Tymińska-Widmer, M.A., in the Department of Painting and Polychrome Sculpture Conservation at UMK in Toruń.

⁴ The questions of the relation between the build of paintings on canvas and its reaction to climatic changes was many times dealt with by B. Rouba (amongst other: [16-18]). The present investigative works are a continuation of her investigation undertaken with the utilization of the new tool – OCT.

⁵ In prices from about 25 to about 60 thousand euro. The most popular devices for diagnosing of the retina cannot be applied for material investigations due to specific construction of the measuring head, which is adapted in its shape to the measurement through the cornea and the lens of the eye.

Streszczenie

Artykuł omawia zastosowanie nowej, nieinwazyjnej i bezkontaktowej metody diagnostycznej stosowanej przede wszystkim do uzyskiwania obrazów przekrojów obiektów z mikrometrową rozdzielczością za pomocą światła. Zaprezentowana zostanie metoda optycznej koherentnej tomografii (OCT) i parametry skonstruowanego urządzenia. Główna uwaga zostanie skupiona na przykładach zastosowań, rozwijanych w zespole prezentującym doniesienie. Przedstawione zostaną przykłady obrazowania stratygrafii obrazów olejnych, w tym również w zastosowaniu do oceny autentyczności inskrypcji lub sygnatur. Poza tym omówione zostanie wykorzystanie OCT jako narzędzia wspomagającego stratygrafię LIBS, jak również do oceny zakresu korozji hydrologicznej szkła witrażowego oraz do monitorowania reakcji obiektu (obrazu) na zmianę warunków klimatycznych w jego otoczeniu.

Abstract

An application of OCT – a noninvasive diagnostic tool for examination of objects of art is discussed on the examples taken from research conducted at Nicolaus Copernicus University in Toruń, Poland. The following subjects have been discussed: stratigraphy of oil paintings on canvas, its specific application to analysis of order and authenticity of inscriptions on paintings, ‘absolute’ LIBS stratigraphy – OCT aided, application of OCT for examination of corrosion of stained glass, and monitoring of environmental induced deformations of canvas supports.