

*Uniwersytet Mikołaja Kopernika  
Toruń*

*Magdalena Iwanicka*

## PRZYKŁADY ZASTOSOWANIA TOMOGRAFII OPTYCZNEJ (OCT) DO BADAŃ MATERIAŁOWYCH I ANALIZY STRUKTURY DZIEŁA SZTUKI

### WSTĘP

Poniższy artykuł ma charakter przeglądu zastosowań tomografii optycznej, metody wciąż mało znanej, do analizy budowy dzieł sztuki. Część przedstawionych tu rezultatów badań jest wynikiem działalności toruńskiego międzywydziałowego zespołu<sup>1</sup> fizyków i konserwatorów dzieł sztuki we współpracy z innymi ośrodkami badawczymi<sup>2</sup>, w ramach grantu badawczego finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Informatyzacji<sup>3</sup>. Pozostałe rezultaty pochodzą z pracy magisterskiej autorki, zrealizowanej pod kierunkiem prof. dr art. kons. Bogumiły J. Rouba w Zakładzie Konserwacji Malarstwa i Rzeźby Polichromowanej UMK<sup>4</sup> w ramach tego samego projektu badawczego.

Koherentna Tomografia Optyczna (ang. Optical Coherence Tomography – OCT) to znana i rozwijana od około 15 lat<sup>5</sup> nieniszcząca i bezdotykowa metoda

---

<sup>1</sup> B. Rouba, T. Łękawa-Wysłouch, L. Tymińska-Widmer, M. Iwanicka – Zakład Konserwacji Malarstwa i Rzeźby Polichromowanej, Wydział Sztuk Pięknych UMK; T. Bajraszewski, I. Gorczyńska, A. Szkulmowska, M. Szkulmowski, M. Góra, M. Wojtkowski, P. Targowski, A. Kowalczyk – Zakład Fizyki Medycznej, Wydział Fizyki i Astronomii UMK.

<sup>2</sup> David Stifter, Eva Breuer – Upper Austrian Research GmbH, Linz, Austria; J. Marczak, A. Rycyk – Instytut Optoelektroniki Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie; M. Strlic, J. Kolar – Uniwersytet w Ljubljanie, Słowenia.

<sup>3</sup> Projekt badawczy „Tomografia optyczna w badaniach obiektów zabytkowych” nr H01E 025 25.

<sup>4</sup> M. Targowska, *Pomiary konserwatorskie z wykorzystaniem metody tomografii optycznej (OCT)*, praca magisterska pod kier. prof. dr art. kons. B.J. Rouba we współpracy z mgr L. Tymińską-Widmer, Zakład Konserwacji Malarstwa i Rzeźby Polichromowanej UMK, Toruń 2006.

<sup>5</sup> D. Huang, E.A. Swanson, C.P. Lin, J.S. Schuman, W.G. Stinson, W. Chang, R. Hee, T. Flotte, K. Gregory, C.A. Puliafito, J. G. Fujimoto, *Optical Coherence Tomography*, Science, 254, 1991, s. 1178-1181; A.F. Fercher, *Optical Coherence Tomography*, Journal of Biomedical Optics, 1 (1996), s. 157-173; A. Kowalczyk, M. Wojtkowski, *Optical Coherence Tomography*, Polish Journal of Medical Physics and Engineering, 7 (2001), s. 305-315.

badania struktury wewnętrznej obiektów składających się z przezroczystych lub półprzezroczystych warstw, pozwalająca otrzymać obrazy ich przekrojów stratygraficznych. Pierwsze i podstawowe zastosowanie znalazła w okulistyce<sup>6</sup>. W Toruniu po raz pierwszy na świecie tomografię optyczną zastosowano do badania obiektów zabytkowych<sup>7</sup>. W ramach programu badawczego, prowadzonego od czterech lat w naszym ośrodku, wykazano przydatność metody do badania werniksów<sup>8</sup> oraz laserunków<sup>9</sup> a także do obrazowania struktury podpowierzchniowej pergaminu<sup>10</sup> oraz wizualizacji skutków ablacji laserowej werniksów<sup>11</sup>. Obecnie tego typu zastosowania OCT rozwija kilka ośrodków na świecie. Jak dotąd wykazano możliwości zastosowania OCT przede wszystkim do obrazowania warstwy werniksu, warstw malarskich utworzonych przez wybrane pigmenty oraz do wykrywania rysunku w opracowaniu wstępnym<sup>12</sup>, a także do badania struktury wewnętrznej obiektów wykonanych z jadeitu<sup>13</sup>. Wyłącznie w Toruniu wykorzystuje się dobrą jakość

<sup>6</sup> M. Wojtkowski, A. Kowalczyk, P. Targowski, I. Gorczyńska, *Frequency domain optical coherence tomography techniques in eye imaging*, Acta Physica Polonica, 102 (2002), s. 739-746.

<sup>7</sup> P. Targowski, B. Rouba, M. Wojtkowski, I. Gorczyńska, A. Kowalczyk, *Zastosowanie optycznej tomografii do nieinwazyjnego badania obiektów zabytkowych*, [w:] J. Flik (red.), *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*, Toruń 2003; P. Targowski, B. Rouba, M. Wojtkowski, A. Kowalczyk, *The Application of Optical Coherence Tomography to Non-Destructive Examination of Museum Objects*, Studies in Conservation, 49 (2004), s. 107-114;

<sup>8</sup> Ibidem; P. Targowski, B. Rouba, M. Wojtkowski, A. Kowalczyk, *The Application of optical Coherence tomography to Non-Destructive Examination of Museum Objects*, Studies in Conservation, 49 (2004), s. 107-114; I. Gorczyńska, M. Szkulmowski, T. Bajraszewski, B. Rouba, A. Kowalczyk, P. Targowski, *Varnish thickness determination by spectral domain optical coherence tomography*, [w:] *Lasers in the Conservation of Artworks LACONA VI Vienna, Austria 2005*, edited by J. Nimmrichter, W. Kautek, M. Schreiner, Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York 2006.

<sup>9</sup> P. Targowski, M. Góra, B. Rouba, M. Targowska, *Tomografia optyczna*, [w:] G. Śliwiński (red.), *Techniki analityczne w konserwacji zabytków*, Wydawnictwo Instytutu Maszyn Przepływowych, Gdańsk 2007, s. 3-7.

<sup>10</sup> M. Góra, M. Pircher, E. Götzinger, T. Bajraszewski, M. Strlic, J. Kolar, C.K. Hitzenberger, P. Targowski, *Optical Coherence Tomography for Examination of Parchment Degradation*, Laser Chemistry 2006, [dokument elektroniczny] tryb dostępu: <http://www.hindawi.com/journals/lc/>.

<sup>11</sup> M. Góra, P. Targowski, A. Rycyk, J. Marczak, *Varnish ablation control by Optical Coherence Tomography*, Laser Chemistry 2006, [dokument elektroniczny] tryb dostępu: <http://www.hindawi.com/journals/lc/>; M. Góra, A. Rycyk, J. Marczak, P. Targowski, A. Kowalczyk, *From Medical to Art Diagnostics: OCT - a novel tool for varnish ablation control*, Coherence Domain Optical Methods and Optical Coherence Tomography in Biomedicine XI, edited by J.G. Fujimoto, J.A. Izatt, V.V. Tuchin, Proceedings of SPIE Vol. 6429, 2007 (w druku).

<sup>12</sup> H. Liang, R. Cucu, G.M. Dobre, D. A. Jackson, J. Pedro, C. Pannell, D. Saunders, A.Gh. Podoleanu, *Application of OCT to Examination of Easel Paintings*, Second European Workshop on Optical Fibre Sensors, edited by J. M. López-Higuera, B. Culshaw, Proceedings of SPIE Vol. 5502 (2004), s. 378-381; H. Liang, M. Gomez Cid, R. Cucu, G.M. Dobre, A.Gh. Podoleanu, J. Pedro, D. Saunders, *En-face optical coherence tomography – a novel application of non-invasive imaging to art conservation*, Optics Express, Vol. 13, No. 16 (2005), s. 6133-6144.

<sup>13</sup> M.-L. Yang, C.-W. Lu, I.-J. Hsu, C.C. Yang, *The use of optical coherence tomography for monitoring the subsurface morphologies of archaic jades*, Archaeometry, 46, 2, 2004, s. 171-182.

odwzorowywania powierzchni za pomocą tomografii optycznej (profilometria) do śledzenia procesu powstawania zniszczeń w obrazach na płótnie pod wpływem wahań klimatu<sup>14</sup>.

## ZASADA DZIAŁANIA OCT ORAZ BUDOWA UKŁADU POMIAROWEGO

Koherentna tomografia optyczna z zastosowaniem interferometrii światła częściowo spójnego pozwala na uzyskiwanie obrazów przekrojów stratygraficznych struktury obiektu w wyniku analizy informacji niesionej przez światło rozproszone w kierunku wstecznym na nieciągłościach struktury tego obiektu. Tomografia optyczna wykorzystuje nieszkodliwe dla materii zabytkowej światło podczerwone o niskim natężeniu i o zakresie fal od 800 do 1550 nm.

Wąski promień światła pada na badany obiekt i wnika weń na głębokość determinowaną właściwościami absorpcyjnymi materiału. Metoda wykorzystuje zjawisko interferencji wiązek światła częściowo spójnego. Badanie polega na rejestracji i analizie sygnału powstałego z nakładania się światła rozproszonego na strukturach wewnętrznych badanego obiektu z wiązką odniesienia odbitą od zwierciadła referencyjnego. Dzięki temu można uzyskać i rozróżnić informacje pochodzące z różnych głębokości w obrębie struktury materiału.

Analiza sygnału uzyskanego w OCT dostarcza informacji o rozkładzie centrów rozpraszających wzdłuż kierunku wiązki promienia (z). Dwuwymiarowy obraz przekroju powstaje poprzez złożenie kolejnych pomiarów wykonanych wzdłuż wiązki przesuwanej prostopadłe do kierunku padania światła. Trójwymiarowy obraz badanej struktury otrzymuje się przesuując promień sondujący w płaszczyźnie x, y – w ten sposób zbierane są dane z objętości badanej struktury.

W spektralnym tomografie optycznym skonstruowanym w ośrodku Toruńskim (Il. 1) źródłem światła jest dioda superluminescencyjna emitująca światło podczerwone w zakresie długości fali od 800 nm do 870 nm. Bardzo istotnym parametrem tomografu optycznego jest jego rozdzielczość w głąb (osiowa), wyznaczająca w praktyce minimalną grubość obserwowanej na obrazie przekroju warstwy, wynosząca w przypadku omawianego urządzenia 10  $\mu\text{m}$ . Rozdzielczość poprzeczna determinuje minimalny rozmiar obserwowanych struktur (ok. 15  $\mu\text{m}$ ). Bardzo krótki czas pomiaru pozytywnie wpływa na stabilizację obrazu i wynosi odpowiednio: 30 do 50  $\mu\text{s}$  dla uzyskania tzw. A-skanu (pomiar w jednym punkcie) oraz 0,1 s dla uzyskania dwuwymiarowego obrazu przekroju (skanowanie wzdłuż linii). Zebranie danych z powierzchni

<sup>14</sup> T. Bajraszewski, I. Goczyńska, B. Rouba, P. Targowski, *Spectral domain optical coherence tomography as the profilometric tool for examination of the environmental influence on paintings on canvas*, [w:] *Lasers in the Conservation of Artworks LACONA VI Vienna, Austria 2005*, edited by J. Nimmrichter, W. Kautek, M. Schreiner, Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York 2006; P. Targowski, M. Góra, T. Bajraszewski, M. Szkulmowski, B. Rouba, T. Łękawa-Wysłouch, L. Tymińska-Widmer, *Optical Coherence Tomography for Tracking Canvas Deformation*, Laser Chemistry 2006, [dokument elektroniczny] tryb dostępu: <http://www.hindawi.com/journals/lc/>.



Il. 1. Badanie obrazu sztalugowego za pomocą urządzenia OCT skonstruowanego do celów konserwatorskich: na ilustracji widoczna jest głowica na wysięgnikach zamocowanych do stołu optycznego oraz blok zasilania

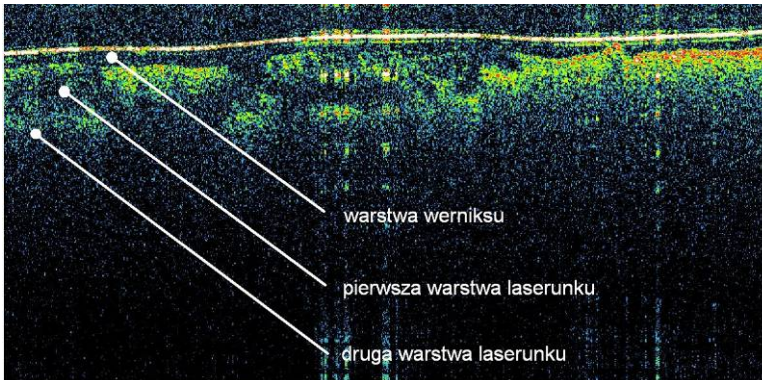
objektu trwa 5 do 10 s; otrzymuje się w ten sposób dane objętościowe, które mogą być oglądane w postaci filmu składającego się z sąsiadujących przekrojów. Zaletą metody jest także niskie napromienienie próbki: 200 – 600  $\mu\text{W}$ .

## ZASTOSOWANIA OCT

### BADANIE STRATYGRAFII DZIEŁ SZTUKI

Badania stratygrafii dzieł sztuki wykonuje się przede wszystkim w celu zbadania technologii i techniki ich wykonania. W ramach rozpoznania budowy obiektu dąży się do stwierdzenia, z ilu warstw oryginalnych (technologicznych) i wtórnych zbudowane jest dzieło sztuki oraz do określenia grubości tych warstw<sup>15</sup>. Drugim celem może być poznanie historii obiektu, w tym śladów

<sup>15</sup> J.S. Martin, *Microscopic Examination and Analysis of the Structure and Composition of Paint and Varnish Layer*, [w:] *Painted Wood: History and Conservation. Proceedings of a symposium organized by the Wooden Artifacts Group of the American Institute for Conservation of Historic*



Il. 2. Przykładowy tomogram OCT uzyskany z badania obrazu sztalugowego

dawnych renowacji (przemalowania) i zabiegów konserwatorsko-restauratorskich (użyte materiały, np. wtórne werniksy, spoiwa dublażowe). Badania stratygraficzne mogą przyczynić się także do oceny skuteczności i skutków zabiegów konserwatorskich.

Klasyczne badania stratygrafii dzieła sztuki oparte na mikroskopowej obserwacji przekrojów próbek oryginalnej materii zabytkowej dostarczają informacji bardzo precyzyjnej, pozwalając na określenie liczby warstw, ich barwy, struktury, grubości oraz kwestii, czy są oryginalne, czy wtórne. Z drugiej jednak strony, zasięg tego typu badań ograniczony jest ich niszczącym charakterem (konieczność pobierania próbek materii zabytkowej). Dostarczają one więc informacji nie tylko punktowej<sup>16</sup>, ale co więcej – dotyczącej tylko tych obszarów obiektu, w obrębie których pobieranie próbek nie zostanie uznane za niedopuszczalne ze względu na zasady etyki konserwatorskiej.

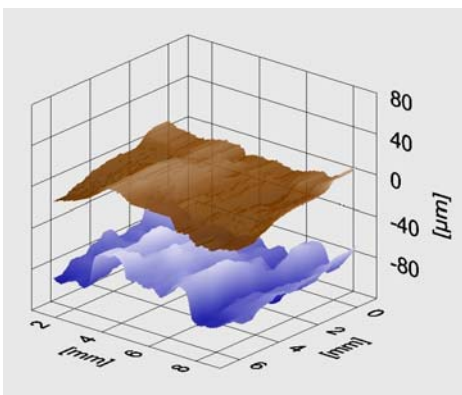
Analiza stratygrafii budowy obiektu zabytkowego wykonana za pomocą OCT (il. 2) dostarcza informacji o innym charakterze niż klasyczne metody niszczące i dlatego powinna być traktowana jako ich uzupełnienie, a nie próba zastąpienia.

Na przykładowym tomogramie OCT obrazującym warstwy technologiczne obrazu olejnego na płótnie (Il. 2) zostało przedstawione w fałszywych kolorach natężenie światła rozproszonego na różnych głębokościach w obiekcie. Za pomocą kolejno kolorów: białego, czerwonego, żółtego, zielonego i niebieskiego

*and Artistic Works and the Foundation of the AIC, Williamsburg, Virginia 11–14 November 1994*, edited by V. Dorge, F.C. Howlett, The Getty Conservation Institute, Los Angeles 1998, s. 64-79; K. Keune, *Binding medium, pigments and metal soaps characterised and localised in paint cross-sections*, PhD Thesis, AMOLF, Amsterdam 2005, s. 8 [dokument elektroniczny] tryb dostępu: <http://www.amolf.nl/publications/theses/keune/keune.html>.

<sup>16</sup> Odnośnie kwestii reprezentatywności informacji pochodzących z pojedynczych punktów obiektu zob.: J. Plesters, *Cross-sections and Chemical Analysis of Paint Samples*, *Studies in Conservation*, 2, 3, 1956, s. 110-132; T.J. Reedy, C.L. Reedy, *Statistical Analysis in Art Conservation Research*, *Research in Conservation*, Getty Conservation Institute, Marina del Rey, Calif. 1988.

odwzorowany został rozkład natężenia światła od największego do najmniejszego; obszary nie rozpraszające widoczne są jako czarne. Po prawej stronie tomogramu zauważalny jest płynny zanik koloru, który świadczy o wielokrotnym rozproszeniu i absorpcji w warstwie (wynikających z właściwości optycznych badanego materiału). Biała linia oddzielająca warstwę werniksu od powietrza zaznacza się bardzo wyraźnie, ponieważ padające od góry światło napotyka granicę ośrodków o dużej różnicy współczynnika załamania. Warstwa werniksu uwidoczniła jest natomiast jako ciemna, ponieważ werniks (podobnie jak szkło) w swojej objętości nie rozprasza światła ani go nie pochłania (tylko przepuszcza w głąb, umożliwiając obserwację warstw spodnich). Laserunkowe warstwy malarskie, leżące pod werniksem, wykazują zdolność rozpraszania światła i słabej jego absorpcji. Zbyt silna absorpcja światła podczerwonego w danym materiale spowoduje, że na tomogramie nie będzie widoczna dolna granica warstwy; zjawisko to można na powyższym przykładzie zaobserwować w przypadku drugiej warstwy laserunku.



Il. 3. Wynik komputerowego przetworzenia danych objętościowych OCT uzyskanych z badania XVIII-wiecznego obrazu sztalugowego; żółtym kolorem odwzorowano wierzchnią powierzchnię werniksu, natomiast kolorem niebieskim przedstawiono odwzorowanie powierzchni warstwy malarskiej pod werniksem

Technika tomografii optycznej poniekąd z definicji ogranicza zakres badań do warstw werniksów i niektórych półprzezroczystych warstw malarskich. Wyjątkowość metody wynika jednak z jej dwóch właściwości. Po pierwsze, **jest to jedyna nieniszcząca i bezkontaktowa technika pozwalająca uzyskiwać obrazy przekrojów warstw obiektu z rozdzielczością wystarczającą do rozgraniczenia poszczególnych warstw i mierzenia ich grubości**. Po drugie, pozwala ona na pozyskiwanie danych z dowolnych i niezliczonych punktów badanego obiektu, a poprzez szybkie skanowanie powierzchni, fragment po fragmencie, **daje możli-**

**wość analizy struktury i grubości badanej warstwy nawet w obrębie całego obrazu.** W praktyce oznacza to np. możliwość sporządzenia komputerowej mapy zasięgu i grubości werniksu lub laserunku (il. 3).

W wyniku systematycznych badań<sup>17</sup> rozdzielczość osiową toruńskiego instrumentu OCT oceniono na 9-11  $\mu\text{m}$ . Jest to zarazem minimalna grubość warstw, których obrazowanie jest możliwe za pomocą OCT. Pomiar grubości warstw obrazowanych za pomocą OCT jest skuteczny i został zweryfikowany

<sup>17</sup> M. Targowska, *Pomiary konserwatorskie*, op. cit.

niezależną metodą. Należy zauważyć, że technika tomografii optycznej jest obecnie, wedle wiedzy autorki, jedyną możliwą do zastosowania nieniszczącą metodą pomiaru grubości powłok werniksów na podłożach malarskich<sup>18</sup> z taką rozdzielczością.

Metoda tomografii optycznej w większości przypadków nadaje się do obrazowania dawnych werniksów wraz z bezinwazyjnym pomiarem ich grubości w dowolnym miejscu na powierzchni malowidła. Dzieje się tak, ponieważ powłoki werniksów zabytkowych wykazują zwykle średnią grubość wystarczającą dla obrazowania za pomocą OCT. Natomiast współczesne werniksy syntetyczne w stężeniach używanych podczas zabiegów konserwatorsko-restauratorskich oraz werniksy w sprayu<sup>19</sup> tworzą zazwyczaj powłoki niemożliwe do obrazowania za pomocą tego aparatu OCT; przyczyną jest zbyt mała grubość błon. Stwierdzono, że nawet grubość powłok powstałych w wyniku nałożenia kilku warstw werniksu nie przekracza 5  $\mu\text{m}$  – niezależnie od stopnia chłonności podłoża (te same werniksy użyte w stężeniach fabrycznych tworzyły powłoki widoczne na tomogramach). Wyniki te mogą służyć dla konserwatorów malarstwa jako wskazówka przy wyborze odpowiedniego werniksu dla konkretnego obiektu, jako że np. przepuszczalność pary wodnej przez powłokę werniksu jest odwrotnie proporcjonalna do grubości jego powłoki<sup>20</sup>. Niewielka grubość błon, a co za tym idzie, także słabe uszczelnienie struktury obrazu przez większość badanych werniksów syntetycznych<sup>21</sup> w zależności od warunków ekspozycji obrazu może przynieść dla niego tak pozytywne jak i negatywne skutki<sup>22</sup>.

Okazało się także, że stopień postarzenia próbek werniksów nie miał znaczącego wpływu na *możliwość* obrazowania powłok, a jedynie na *jakość* uzyskiwanych tomogramów. W wyniku starzenia połysk błon werniksów obniża się<sup>23</sup>, co

---

<sup>18</sup> Grubościomierz powłok z czujnikiem hallotronowym, choć o większej rozdzielczości, nadaje się do pomiaru grubości powłok lakierniczych i tworzyw sztucznych jedynie na powierzchniach metalowych.

<sup>19</sup> Oczekiwano, że badania potwierdzą teorię, jakoby werniksy nakładane w sprayu w mniejszym stopniu wnikały w podłoże, tworząc w ten sposób bardziej szczelny film na powierzchni warstwy malarskiej. Tymczasem okazało się, że powłoki utworzone przez te werniksy były równie cienkie jak te utworzone przez ich odpowiedniki nakładane w stężeniach konserwatorskich za pomocą pędzla.

<sup>20</sup> R.J. Gettens, G.L. Stout, *Painting Materials. A short encyclopaedia*, Dover Publications, Inc., New York 1966, s. 68.

<sup>21</sup> Spośród werniksów syntetycznych badanych przez autorkę tego artykułu wyjątkiem był werniks akrylowy matowy (Talens 115), który jako jedyny z werniksów pochodzenia syntetycznego użytych w stężeniach używanych podczas zabiegów konserwatorsko-restauratorskich utworzył wyraźnie grubsze, widoczne w OCT powłoki, na co zapewne wpłynął dodatek krzemionki koloidalnej. Grubości powłok tego werniksu były porównywalne z grubościami powłok utworzonych przez werniks damarowy (20% roztwór damary w benzynie lakowej).

<sup>22</sup> B. Rouba, E. Szmít-Naud, *Próby określenia przepuszczalności pary wodnej przez strukturę obrazów na płótnie w zależności od wprowadzonych materiałów konserwatorskich* [w:] M. Roznerska, J. Arszyńska (red.), *Problemy dublowania obrazów na płótnie*, Wyd. UMK, Toruń 2005, s. 55-67.

<sup>23</sup> E. Szmít-Naud, *Uzupełnienia ubytków warstwy malarskiej obrazów. Zmiany optyczne a stabilność stosowanych materiałów*, Wyd. UMK, Toruń 2006, s. 151.

przyczynia się do poprawy jakości obrazowania, poprzez zmniejszenie natężenia refleksów zwierciadlanych. Znajduje to potwierdzenie w wynikach obrazowania warstw dawnych werniksów na malowidłach zabytkowych: refleksy zwierciadlane na tomogramach są zwykle niemal niezauważalne, a granice między warstwą werniksu i powietrzem – doskonale widoczne.

Tomografia optyczna, jak okazało się w toku badań, może służyć także jako dobre narzędzie do badania właściwości optycznych werniksów. W szczególności badano zdolność pogłębienia barwy warstwy malarskiej przez powłoki różnorodnych werniksów. Ogólnie uważa się, że zdolność ta będzie tym lepsza, im mniej białego światła zostanie odbite od powierzchni obrazu. W związku z tym długo za najistotniejszy parametr determinujący właściwości optyczne werniksu uważano różnicę w wartości współczynników załamania światła spoiwa warstwy malarskiej i werniksu (ponieważ na granicy dwóch ośrodków o różniących się wartościach tego współczynnika dochodzi do wstecznego odbicia światła). Dziś jednak wielu autorów uważa, że za dobre nasycenie barwy warstwy malarskiej odpowiada przede wszystkim zdolność werniksu do wyrównywania chropowatości jej powierzchni<sup>24</sup>. Na powierzchni rozwiniętej pojawi się oczywiście więcej niekorzystnych dla widza mikrorefleksów białego światła niż w przypadku powierzchni gładkiej, gdy większość padającego światła jest odbijana w określonym kierunku.

Tendencję do odwzorowywania powierzchni warstwy malarskiej (dając w efekcie rozwiniętą powierzchnię obrazu) mają werniksy o wysokiej masie cząsteczkowej żywicy bazowej, jak np. akrylowe (il. 4), podczas gdy te o niskiej masie cząsteczkowej żywicy, np. damarowe, mastyksowe, ketonowe (il. 5) czy otrzymywane z uwodornionych żywic węglowodorowych zalewają jej nierówności. Daje to powierzchnię bardziej gładką, wpływając pozytywnie na odbiór wizualny warstwy malarskiej. Należy zauważyć, że mamy tu do czynienia ze zjawiskiem powstającym w procesie wysychania werniksu; tomografia optyczna jest w tym momencie jedyną metodą pozwalającą na śledzenie tego procesu na przekrojach w czasie rzeczywistym.

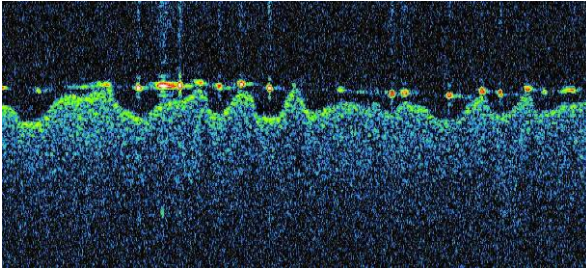
Za doskonałą ilustrację tego zjawiska mogą posłużyć przedstawione tomogramy (il. 4, il. 5).

Studia nad przydatnością OCT do badania warstw malarskich przeprowadzono dwuetapowo. Najpierw przeprowadzono badania na próbkach fabrycznych farb, a następnie podjęto badania autentycznych warstw na zabytkowych obrazach konserwowanych obecnie w ZKMIRP UMK.

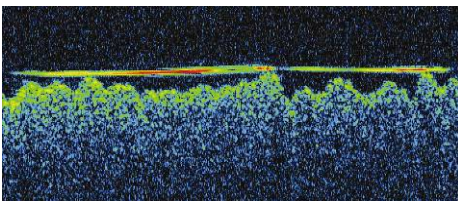
---

<sup>24</sup> R.L. Feller, *Factors Affecting the Appearance of Picture Varnish*, Science 1957, 125, 1143-1144; E.R. de la Rie, *The Influence of Varnishes on the Appearance of Paintings*, Studies in Conservation, 1987, 1, 1-13; idem, *Exploring the Optical Properties of Picture Varnishes Using Imaging Techniques*, Studies in Conservation, 48, 2003, 73-82; P. Diemann, *Towards More Stable Natural Resin Varnishes for Paintings. The Aging of Triterpenoid Resins and Varnishes*, PhD Thesis, Swiss Federal Institute of Technology, Zürich 2003, s. 20-21.





- II. 4. Przykład zjawiska odwzorowywania powierzchni warstwy malarskiej przez werniks o wysokiej masie cząsteczkowej żywicy bazowej; powłoka werniksu akrylowego (Talens 114) na farbie olejnej, 5 warstw



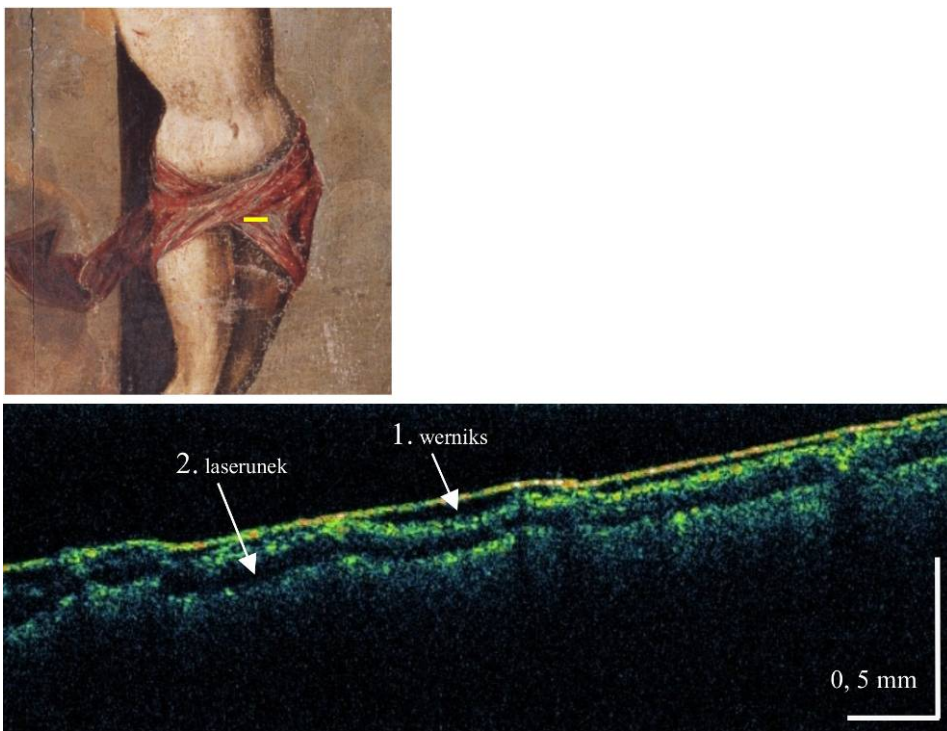
- II. 5. Przykład zjawiska wyrównywania powierzchni warstwy malarskiej przez werniks o niskiej masie cząsteczkowej żywicy bazowej; powłoka werniksu ketonowego (Talens 002) na farbie olejnej, 5 warstw

W ramach badań wstępnych oceniono wpływ absorpcji promieniowania podczerwonego w warstwie malarskiej na wynik obrazowania tej warstwy za pomocą OCT. Korzystając z dwóch aparatów OCT (operujących źródłami światła o różnej długości fali), przebadano 47 próbek warstw malarskich utworzonych z dostępnych w handlu farb olejnych<sup>25</sup>. Dobre rezultaty obrazowania uzyskano dla 34% próbek w przypadku aparatu o centralnej długości fali źródła światła 1550 nm i dla 20% za pomocą aparatu o centralnej długości fali 830 nm. Zgodnie z oczekiwaniami, wraz ze wzrostem użytej centralnej długości fali źródła światła zwiększa się ilość pigmentów tworzących warstwy możliwe do obrazowania tomografem optycznym. Okazuje się, że możliwość obrazowania warstwy malarskiej zależy przede wszystkim od właściwości absorpcyjnych pigmentów (a więc od składu chemicznego farby), w mniejszym stopniu natomiast od grubości warstwy.

<sup>25</sup> Szczegółowy opis i rezultaty omawianych badań były przedmiotem odrębnych publikacji, dlatego nie zostaną tu szerzej omówione. Por. A. Szkulmowska, M. Góra, M. Targowska, B. Rouba, D. Stifter, E. Breuer, P. Targowski, *The Applicability of Optical Coherence Tomography at 1.55  $\mu\text{m}$  to the Examination of Oil Paintings*, [w:] *Lasers in the Conservation of Artworks LACONA VI Vienna, Austria 2005*, edited by J. Nimmrichter, W. Kautek, M. Schreiner, Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York 2006; M. Szkulmowski, M. Góra, M. Targowska, B. Rouba, D. Stifter, E. Breuer, P. Targowski, *Zastosowanie tomografii optycznej do badania stratygrafii obrazów olejnych*, [w:] G. Śliwiński (red.), *Techniki analityczne w konserwacji zabytków*, Wydawnictwo Instytutu Maszyn Przepływowych, Gdańsk 2007, s. 79-83; M. Targowska, *Pomiary konserwatorskie*, op. cit.



Il. 6. *Ukrzyżowanie*, widok w świetle rozproszonym (fot. B. Gmińska)



Il. 7. *Ukrzyżowanie*, tomogram OCT uzyskany przez skanowanie partii perizonium Chrystusa (fot. B. Gmińska), linię skanowania zaznaczono na żółto; protokół pomiarowy 1 x 6000 linii

W drugim etapie badań podjęto próby obrazowania werniksów oraz warstw laserunków na zabytkowych obrazach sztalugowych.

W niniejszej publikacji za przykład możliwości wykorzystania tomografii optycznej posłużą badania obrazu *Ukrzyżowanie* (I poł. XVII wieku) pochodzącego z Nieborowa<sup>26</sup> (il. 6). Obraz namalowano farbami olejnymi w technice warstwowej. Laserunki stanowiące wykończenie niektórych partii kompozycyjnych zawierają barwniki organiczne lub smaltę. Werniks oryginalny zachowany jest słabo; podczas dawnych renowacji został ścieniony, a w niektórych partiach nie zachował się wcale.

Szczególnie interesujący okazał się tomogram OCT uzyskany w wyniku skanowania partii perizonium Chrystusa (il. 7). Z tego obszaru malowidła nie pobierano próbek do badań budowy technicznej – ze względu na dobry stan

<sup>26</sup> Obraz poddawany jest obecnie zabiegom konserwatorsko-restauratorskim w Zakładzie Konserwacji Malarstwa i Rzeźby Polichromowanej UMK w ramach pracy dyplomowej Barbary Gmińskiej, realizowanej pod kier. prof. dr B. Rouba oraz mgr T. Łękawcy-Wystouch, mgr L. Tymińskiej-Widmer i mgr K. Szczepińskiej. Badania budowy technicznej obrazu wykonała B. Gmińska pod kier. prof. dr. art. kons. J. Flika, dr hab. J. Olszewskiej-Świetlik oraz mgr M. Górzyńskiej w Zakładzie Technologii i Technik Malarskich UMK.

zachowania warstwy malarskiej oraz wysoką wartość artystyczną obrazu. Badanie za pomocą tomografii optycznej okazało się w tym przypadku jedyną drogą do poznania struktury malowidła: pod cienką warstwą werniksu (1) położone są laserunki (2), doskonale widoczne na tomogramie.

W ramach kolejnego zastosowania OCT do badania stratygrafii dzieł sztuki podjęto próby uzyskania przekroju pergaminu, w celu śledzenia procesów jego destrukcji postępującej w wyniku działania atramentów żelazowo-galusowych. Jako że atramenty te są przezroczyste dla promieniowania podczerwonego, możliwe jest uzyskanie za pomocą OCT obrazu przekroju ich pergaminowego podłoża<sup>27</sup>.

## PROFILOMETRIA OBRAZÓW NA PŁÓTNIE

Poza obrazowaniem struktury wewnętrznej niektórych materiałów, technikę tomografii optycznej można wykorzystywać jako narzędzie profilometryczne, to znaczy dobrze odwzorowujące powierzchnię. Metoda pozwala śledzić w czasie rzeczywistym ruch powierzchni obrazu na płótnie powstający pod wpływem wahań wilgotności względnej powietrza, umożliwiając analizę procesu powstawania zniszczeń<sup>28</sup>.

## KONTROLA PROCESU ABLACJI LASEROWEJ WERNIKSU ZA POMOCĄ OCT

Ostatnio zasygnalizowanym nowym i obiecującym zastosowaniem OCT jest próba wykorzystania metody do kontroli ablacji laserowej werniksu z obrazów sztalugowych. Ta metoda usuwania werniksu budzi pewne kontrowersje i jest ciągle w stadium prób<sup>29</sup>. Niemniej jednak wskazuje się na jej zalety wobec niektórych tradycyjnych metod, wymagających stosowania rozmaitych rozpuszczalników. Wprowadzenie tych substancji w głąb warstwy malarskiej może mieć niekorzystny wpływ na przebieg dalszych procesów konserwatorskich, a w krańcowych przypadkach może przyczynić się do nieodwracalnego uszkodzenia obiektu. Obecnie poszukuje się optymalnych warunków dla procesu ablacji, w szczególności najbardziej odpowiedniego dla tego szczególnego zastosowania, lasera. Drugim istotnym problemem do rozwiązania jest opracowanie metody bieżącej kontroli zasięgu tego zabiegu.

<sup>27</sup> P. Targowski *et al.*, *Tomografia optyczna*, op. cit.; M. Góra *et al.*, *Optical Coherence Tomography for Examination of Parchment Degradation*, op. cit.

<sup>28</sup> P. Targowski *et al.*, *Zastosowanie optycznej tomografii*, s. 127; P. Targowski *et al.*, *The Application of Optical Coherence Tomography*, op. cit., s. 109-111; T. Bajraszewski, I. Gorczyńska, B. Rouba, P. Targowski, *Spectral domain optical coherence tomography*, op. cit.; P. Targowski *et al.*, *Optical Coherence Tomography for Tracking Canvas Deformation*, op. cit.

<sup>29</sup> R. Bordalo, P.J. Morais, H. Gouveia, C. Young, *Laser Cleaning of Easel Paintings: an overview*, Laser Chemistry 2006, [dokument elektroniczny] tryb dostępu: <http://www.hindawi.com/journals/lc/>; *Advanced workstation for controlled laser cleaning of works of art*, Final Report CRAFT project ENV4-CT98-0787 (2001), [dokument elektroniczny] tryb dostępu: <http://www.art-innovation.nl/>.

Obecnie stosuje się w tym celu LIBS (analizę widma fluorescencji plazmy wytwarzanej w procesie ablacji)<sup>30</sup>. Pierwsze ślady pierwiastków występujących w warstwie malarskiej wykryte za pomocą LIBS są sygnałem do zaprzestania ablacji werniksu. W tym tkwi jednak ograniczenie metody – nie pozwala na pozostawienie ochronnej cienkiej warstwy werniksu ani na jego częściowe usunięcie. Dodatkowo, stosowanie LIBS do monitorowania ablacji wyklucza użycie laserów pracujących w zakresie podczerwieni (np. Er:YAG) ponieważ tego typu lasery nie wytwarzają plazmy. Jako że tomografia optyczna w odmianie spektralnej pozwala na wizualizację warstwy werniksu i jej zmian w czasie rzeczywistym *in situ*, zastosowanie tej metody do kontroli procesu ablacji laserowej wydaje się być naturalnym. Takie badania zostały podjęte przez zespół toruński we współpracy z Instytutem Optoelektroniki Wojskowej Akademii Technicznej<sup>31</sup>. Udało się jak dotąd opracować metodę wizualizacji kraterów ablacyjnych, oceny ich rozmiarów i dynamiki procesów relaksacji warstwy werniksu.

#### PODSUMOWANIE

Nie ma wątpliwości, że technika OCT nadaje się do obrazowania werniksów i niektórych warstw malarskich, mierzenia ich grubości oraz charakteryzowania powierzchni. Mimo ograniczeń, tomografia optyczna jest obecnie jedyną nieniszczącą metodą pozyskiwania niezliczonych przekrojów struktury dzieła sztuki. Niewątpliwą zaletą tej techniki jest możliwość obrazowania i mierzenia grubości warstw na różnego typu podłożach malarskich, nie przygotowanych specjalnie do tego celu (z wyjątkiem silnie odbijających światło podłoża metalowych); z tego względu OCT może być wykorzystane jako skuteczne narzędzie zarówno do badań właściwości materiałów konserwatorskich, jak i badań obiektów zabytkowych.

W zakresie obrazowania warstw malarskich głównym ograniczeniem metody OCT jest fakt, że wiele pigmentów nie jest wystarczająco przezroczystych dla promieniowania podczerwonego. W obecnym momencie ogranicza to zastosowanie metody do badania pewnych tylko partii malowideł, jednak jako że wraz ze wzrostem długości fali źródła światła poprawia się transparentność pigmentów w podczerwieni, w przyszłości można spodziewać się znacznego postępu w obrazowaniu warstw malarskich w wyniku zastosowania aparatów OCT nowych źródeł światła o centralnej długości fali z zakresu 1500 – 2500 nm.

---

<sup>30</sup> Ibidem; R. Teule, H. Scholten, O.F. van den Brink, R.M.A. Heeren, V. Zafirooulos, R. Hesterman, M. Castillejo, M. Martín, U. Ullenius, I. Larsson, F. Guerra-Librero, A. Silva, H. Gouveia, *Controlled UV laser cleaning of painted artworks: A systematic effect study on egg tempera paint samples*, Proceedings Lasers in the Conservation of Artworks IV, September 2001, Paris, [dokument elektroniczny] tryb dostępu: <http://www.art-innovation.nl/>.

<sup>31</sup> P. Targowski *et al.*, *Tomografia optyczna*, op. cit.; M. Góra *et al.*, *Varnish ablation control by Optical Coherence Tomography*, op. cit., M. Góra *et al.*, *From Medical to Art Diagnostics*, op. cit.

Wydaje się, że aby w pełni wykorzystać potencjał metody tomografii optycznej do celów konserwatorskich, pożądane jest zwiększenie rozdzielczości osiowej urządzenia OCT do przynajmniej 3  $\mu\text{m}$ . Jest to możliwe do osiągnięcia dla obrazowania w paśmie 800 nm za pomocą dostępnych komercyjnie, choć bardzo kosztownych źródeł światła. Obecny stan techniki nie pozwala osiągnąć takiej rozdzielczości w paśmie 2500 nm, obserwując jednak tempo postępu technicznego, można mieć nadzieję, że w krótkim czasie ograniczenie to zostanie przewyżczone poprzez zastosowanie źródeł światła nowego typu. Z tego samego powodu, obecnie bardzo wysoki koszt urządzenia OCT (ok. 200 tys. złotych), który można uznać za kolejną wadę tej metody, z pewnością będzie ulegał obniżeniu. Wydaje się więc, że metody badania dzieł sztuki przy pomocy tomografii optycznej warto rozwijać, aby być przygotowanym na jej szybką implementację, jednocześnie ciągle poszukując najefektywniejszych dla niej zastosowań. Poprzez formułowanie zaleceń dla konstruktorów, konserwatorzy dzieł sztuki powinni aktywnie wpływać na kształt przyszłych rozwiązań w tej dziedzinie.