

Zastosowanie tomografii optycznej do badania stratygrafii obrazów olejnych

Maciej Szkulmowski^a, Michalina Góra^a, Magdalena Targowska^b,
Bogumiła Rouba^b, David Stifter^c, Eva Breuer^c, Piotr Targowski^a

^aInstytut Fizyki, Uniwersytet Mikołaja Kopernika, ul. Grudziądzka 5, 87-100 Toruń, misia@phys.uni.torun.pl

^bInstytut Zabytkoznawstwa i Konserwatorstwa, Uniwersytet Mikołaja Kopernika, ul. Gagarina 9, 87-100 Toruń, brouba@art.uni.torun.pl

^cUpper Austrian Research GmbH, Hafenstrasse 47-51, A-4020 Linz, Austria, david.stifter@uar.at

1. Wstęp

Optyczna koherentna tomografia (OCT, ang. *Optical Coherence Tomography*) jest metodą stworzoną na potrzeby obrazowania w sposób nieinwazyjny wewnętrznej struktury różnych obiektów. Oparta jest ona na detekcji światła o małej spójności czasowej, rozproszonego wstecz od kolejnych warstw w obiekcie. Metoda ta, ze względu na jej nieinwazyjny i bezkontaktowy charakter, jest głównie wykorzystywana w medycynie. Jednak znalazła również zastosowanie w badaniach materiałowych¹. Oprócz zastosowania do pomiaru grubości warstwy werniksu mogłaby być również wykorzystana do analizowania warstw malarskich. Podstawowym ograniczeniem związanym z badaniem obiektów częściowo nieprzezroczystych jest duża absorpcja światła szczególnie w zakresie widzialnym. Do tej pory do tego typu zastosowań używane były fale z zakresu podczerwieni o długości $0.81 \mu\text{m}^2$ i $1.3 \mu\text{m}^3$.

2. Metodyka badań

W tej pracy przedstawione są wyniki uzyskane przy użyciu największej dostępnej dla OCT długości fali ($1.55 \mu\text{m}$) i ich porównanie z wynikami uzyskanymi dla długości fali $0.82 \mu\text{m}$. W obu układach światło rozproszone wstecz na elementach struktury badanego obiektu interferuje w interferometrze Michelsona, następnie jest elektronicznie rejestrowane i analizowane w komputerze. W układzie spektralnego OCT² jako źródła światła użyto zespół sprzężonych optycznych diod superluminescencyjnych typu „Broadlighter” firmy Superlum (Rosja) o $\lambda_{\text{centr}} = 823 \text{ nm}$ i $\Delta\lambda = 74 \text{ nm}$. Takie parametry źródła zapewniają podłużną rozdzielczość $4 \mu\text{m}$, natomiast rozdzielczość poprzeczną można oszacować na $30 \mu\text{m}$. Moc światła padającego na próbkę wynosiła około $600 \mu\text{W}$. W drugim z zastosowanych układów pomiarowych¹ jako źródła światła użyta została 3 mW dioda superluminescencyjna z centralną długością fali 1550 nm oraz szerokością

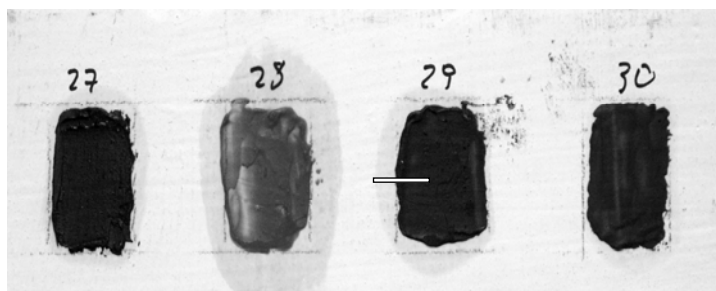
spektralną 51 nm, co prowadzi do 20 μm rozdzielczości podłużnej i podobnej rozdzielczości poprzecznej. Moc światła padającego na próbkę wynosiła 580 μW . W obu instrumentach obrazy przekrojów (tomogramy OCT) uzyskiwane są w sposób nieinwazyjny. Obrazy przedstawione są w skali szarości, która odpowiada natężeniu światła rozproszonego wstecz w danym miejscu na przekroju próbki.

Korekcja refrakcji

Jak wynika z opisu metody OCT mierzone odległości są drogami optycznymi, a nie geometrycznymi. W związku z tym pionowa skala obrazów jest różna w powietrzu (nad próbką) i w samej próbce. Proste przeskalowanie pionowej skali obrazka (poprzez wymnożenie przez grupowy współczynnik załamania światła odpowiedni dla warstwy penetrowanej przez wiązkę światła) jest dopuszczalne jedynie, kiedy pierwsza powierzchnia graniczna (tutaj: powietrze – werniks) jest płaska. W przeciwnym wypadku takie rozwiązanie zawodzi – może pojawiać się zniekształcenie warstwy leżącej pod spodem (Rys 2a i c). Żeby poprawnie odwzorować strukturę próbki należy wówczas zastosować metodę śledzenia promieni (ray tracing procedure). W tym celu cały obraz jest korygowany numerycznie: dla kolejnych pozycji penetrującej wiązki światła liczony jest kąt refrakcji na granicy powietrze – próbka. Następnie wyznaczany jest nowy punkt padania tego promienia na kolejną granicę warstw wewnątrz próbki. Taka procedura powtarzana jest dla wszystkich warstw wewnątrz próbki. Na podstawie uzyskanych danych odpowiadających drogom optycznym można wygenerować nowy obraz (Rys. 3). Dane dotyczące współczynnika załamania mogą być uzyskane z literatury,⁵ lub jak w przypadku warstwy werniksu przy pomocy metody OCT.⁴

Przebadane próbki

Wszystkie przebadane próbki (Rys. 1, Tabela 1) przygotowane zostały w taki sam sposób: na kartonowe podłoże zagruntowane zaprawą kredowo-klejową nałożona została odpowiednia warstwa malarska – komercyjne farby olejne Rembrant (R) lub Van Gogh (VG) firmy Talens (Holandia), Rowney (Wlk. Brytania) lub Maimeri (Włochy).

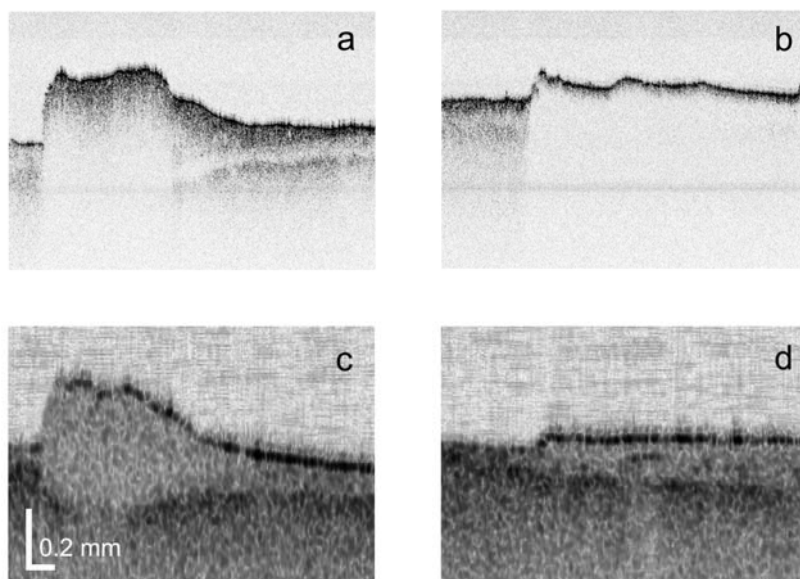


Rys. 1. Przykładowe próbki użyte do badań. Od lewej: Karmin alizarynowy, Kraplak jasny, Kraplak alizarynowy brązowy, Szkarłat alizarynowy. Linia na próbce nr 29 wskazuje miejsce, w którym wykonany został tomogram OCT przedstawiony na Rys. 2a i 2c.

3. Wyniki badań

Tomogramy OCT warstw malarskich.

Do tej pory wiedza dotycząca absorpcji pigmentów była dostępna jedynie dla długości fali większych niż 2.5 μm . Ocena możliwości zastosowania OCT polegała więc na wykonaniu tomogramów 47 próbek przygotowanych w sposób opisany powyżej. Jeżeli pigment słabo absorbuje światło, widoczny jest przekrój warstwy malarskiej. Na rysunku 2. przedstawione są przykłady otrzymanych obrazów przekrojów, dla obu długości fali wykorzystywanych w tym opracowaniu.



Rys. 2. Tomogramy OCT uzyskane dla Kraplaku alizarynowego brązowego (#333, Talens): (a,c) i Asfaltu (#414, Talens): (b) i (d). W obu przypadkach próbki przebadane były obiema długościami fal: 820 nm (a,b) i 1550 nm (c,d). Próbkę skanowaną w poprzek krawędzi farby światłem padającym z góry.

Wyniki pomiaru wszystkich próbek warstw malarskich zebrane zostały w Tabeli 1. Pomiar, dla obu długości fal, wykonywane były na tym samym obszarze próbki. Otrzymane obrazy zostały oszacowane jakościowo w wyniku czego przebadane próbki podzielone zostały na trzy kategorie:

- D - cała warstwa malarska jest rozpoznawalna: granica warstwa malarska – zaprawa jest dobrze widoczna (Rys. 2c),
- Ś - granica warstwa malarska – zaprawa jest widoczna jedynie dla cienkich warstw malarskich (Rys. 2a),
- Z - granica malarska – zaprawa nie jest widoczna z powodu silnego rozpraszania/odbicia (Rys. 2a) lub silnej absorpcji (Rys. 2b) w warstwie malarskiej.

Tabela 1. Farby użyte w pracy. Siła krycia jest opisana w skali 4...1 (przezroczysta, pół-przezroczysta, pół-kryjąca, kryjąca) w przypadku firmy Talens lub t/o (przezroczysta, kryjąca) dla Daler-Rowney. Przydatność metody OCT jest oceniona jako D – dobra, Ś – średnia i Z – zła.

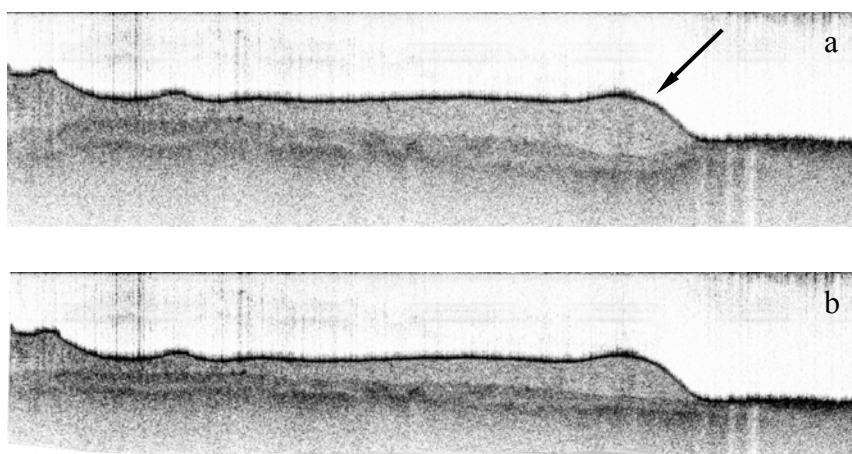
Pigment (nazwa producenta)	Producent	Kat. No.	Siła krycia	Przydatność metody OCT	
				1550 nm	823 nm
Transparent brown	Rowney	260	t	D	D
Transparent oxide yellow	Talens (R)	265	4	D	D
Carmine alizarine	Talens (R)	319	4	D	D
Madder lake light	Talens (VG)	327	4	D	D
Ultramarine deep	Talens (VG)	506	4	D	D
Cobalt blue deep	Talens (R)	515	2	D	D
Scarlet alizarin	Rowney	569	t	D	D
Olive green	Talens (R)	620	4	D	D
Indian yellow	Talens (VG)	244	4	D	D
Brown madder (Aliz.)	Talens (R)	333	4	D	Ś
Burnt umber	Talens (R)	409	3	D	Ś
Asphaltum	Talens (R)	414	4	D	Ś
Stil de grain brun	Talens (R)	418	4	D	Ś
Rembrandt brown	Talens (R)	419	3	D	Ś
Vermilion	Talens (VG)	311	2	D	Z
Paynes grey	Rowney	65	o	D	Z
Green earth	Rowney	380	-	Ś	Ś
Gold ochre	Talens (R)	231	3	Ś	Z
Raw sienna	Talens (R)	234	3	Ś	Z
Cassel earth	Maimeri- Clas.	490	1	Ś	Z
Indigo extra	Talens (R)	533	4	Ś	Z
Cinnabar green light extra	Talens (R)	642	1	Ś	Z
Burnt sienna	Talens (R)	411	3	Z	Ś
Flake (lead) white	Talens (R)	101	1	Z	Z
Zinc white	Talens (R)	104	4	Z	Z
Titanium white	Talens (VG)	105	1	Z	Z
Cerulean blue	Talens (R)	194	-	Z	Z
Naples yellow deep	Talens (R)	223	1	Z	Z
Yellow ochre	Talens (R)	227	1	Z	Z
Brilliant yellow light	Talens (R)	239	1	Z	Z
Aureoline	Talens (R)	242	3	Z	Z
Cadmium red deep	Talens (R)	306	1	Z	Z
English red light	Talens (R)	340	1	Z	Z
Caput mortuum violet	Talens (R)	344	1	Z	Z
Venetian red	Talens (R)	349	1	Z	Z
Pozzuoli earth	Talens (R)	365	1	Z	Z

Brown Vandyke	Talens (R)	403	2	Z	Z
Brown ochre light	Talens (R)	405	2	Z	Z
Raw umber	Talens (R)	408	2	Z	Z
Greenish umber	Talens (R)	410	3	Z	Z
Sepia extra	Talens (R)	416	2	Z	Z
Prussian blue (phthalo)	Talens (VG)	566	3	Z	Z
Cadmium green light	Talens (R)	604	1	Z	Z
Cobalt green deep	Talens (R)	612	2	Z	Z
Cadmium yellow deep	Rowney	613	-	Z	Z
Emerald green	Talens (R)	615	1	Z	Z
Chromium oxide green	Talens (R)	668	1	Z	Z

Zgodnie z przewidywaniami większa długość fali lepiej nadaje się do tego typu zastosowań: dla 1550 nm 16 pigmentów można zakwalifikować jako dobre i 6 jako średnie, natomiast dla 823 nm odpowiednio 9 i 7. Dodatkowym parametrem opisującym próbki jest siła krycia definiowana przez producenta farb. Porównując tę cechę z wynikami uzyskanymi przy użyciu tomografu optycznego, okazuje się, że nie ma między nimi prostego związku. Jednakże, jak można było przypuszczać, najbardziej przezroczyste farby najlepiej nadają się do pomiarów.

Korekcja refrakcji.

Przyglądając się dokładnie obrazom zamieszczonym na rysunku 2a i rysunku 2c można zauważyć, że granica warstwa malarska – zaprawa ulega odkształceniu w miejscu gdzie warstwa malarska przybiera formę wypukłej grudki (strzałka). Efekt ten jest również widoczny na rysunku 3., gdzie granica warstwa malarska – podłoże jest lepiej widoczna.



Rys. 3. Tomogram OCT uzyskany dla Kraplaku jasnego (#327, Talens): (a) obraz zdeformowany przez refrakcję, (b) obraz po zastosowaniu procedury korekcji refrakcji. Oba obrazy są przedstawione w takiej samej skali. Na tomogramach widoczna jest też powójna warstwa zaprawy – za efekt ten odpowiedzialna jest migracja spoiwa farby w głąb warstwy zaprawy.

Na Rysunku 3a. grubsza warstwa farby zachowuje się jak soczewka deformująca kształt warstwy poniżej. Warstwa zaprawy znajdująca się pod warstwa malarską wydaje się nie być płaska. Zastosowanie procedury korekcji refrakcji powoduje spłaszczenie warstwy i tym samym usunięcie artefaktu.

4. Wnioski

Na podstawie wyników uzyskanych z pomiarów (Tabela 1.) widać, że zastosowanie OCT do badania warstw malarskich jest ograniczone do pewnej grupy pigmentów. Bez wątplenia większa długość fali lepiej nadaje się do tego typu zastosowań. Należy jednak zauważyć, że rozdzielczość podłużna układu o prawie dwukrotnie większej długości fali i takiej samej szerokości spektralnej widma jest 4 razy mniejsza. Zastosowanie OCT do uzyskiwania przekrojów warstw malarskich wymaga użycia układu OCT opartego na bardzo szerokim źródle światła o wysokiej długości fali. Gwałtowny rozwój laserów o przestrajalnej długości fali najprawdopodobniej pozwoli sprostać tym wymaganiom.

Praca naukowa finansowana ze środków Komitetu Badań Naukowych w latach 2003-2006 jako projekt badawczy 2H01E 025 25.

Literatura

- [1] D. Stifter, P. Burgholzer, O. Höglinger, E. Götzinger, C. K. Hitzenberger, "Polarisation-sensitive optical coherence tomography for material characterisation and strain-field mapping", *Appl. Phys. A* **76** (2003) 947.
- [2] P. Targowski, M. Góra, B. Rouba, M. Targowska, „Tomografia optyczna”, w *tym tomie*
- [3] 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) 107-114.
- [4] H. Liang, M. Gomez Cid, R. Cucu, George Dobre, B. Kudimov, J. Pedro, D. Saunders, J. Cupitt, A. Podoleanu, "Optical coherence tomography: a non-invasive technique applied to conservation of paintings", *Proc. SPIE*, **5857** (2005) 261-269.
- [5] E. René de la Rie, *Studies in Conservation*, **32** (1978) 1-13.