

Autoreferat

Analiza mikrouszkodzeń w obiektach zabytkowych przy użyciu metod optycznych i akustycznych

Dr Michał Łukomski

1. Imię i Nazwisko

Michał Łukomski

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/ artystyczne - z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej

- 1999 – magister fizyki: Wydział Matematyki, Fizyki i Informatyki,
Uniwersytetu Jagiellońskiego
praca magisterska:
„Spektroskopia atomowa z zastosowaniem mieszania czterech fal”
- 2003 – doktor nauk fizycznych: Wydział Matematyki, Fizyki i Informatyki,
Uniwersytetu Jagiellońskiego
rozprawa doktorska:
„Spektroskopia cząsteczek van der waalsowskich w strumieniu naddźwiękowym. Charakterystyka stanów elektronowych w CdKr i Cd₂”

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych / artystycznych.

- 1999 - 2003 Studia doktoranckie na Wydziale Matematyki, Fizyki i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Jagiellońskiego, kierunek fizyka, specjalność optyka atomowa
- 2003 - 2006 Asystent w Zakładzie Optyki Atomowej Instytutu Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego
- 2004 - 2006 Staż długookresowy, Kanada, Department of Physics, University of Windsor, Post-doctorate Fellow
- od 2006 Adiunkt w Instytucie Katalizy i Fizykochemii Powierzchni im. Jerzego Habera Polskiej Akademii Nauk (IKiFP PAN)
- od 2010 Zastępca dyrektora do spraw ogólnych IKiFP PAN
- od 2013 Kierownik grupy badawczej „Ochrona Dziedzictwa Kultury” w IKiFP PAN

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.):

Jako osiągnięcie wskazuję jednotematyczny cykl ośmiu publikacji zatytułowany:
„Analiza mikrouszkodzeń w obiektach zabytkowych przy użyciu metod optycznych i akustycznych”

- H1. Ł. Lasyk, M. Łukomski, Ł. Bratasz, 'Simple digital speckle pattern interferometer (DSPI) for investigation of art objects', *Optica Applicata*, 41 (3) (2011) 687-700
- H2. L. Krzemień and M. Łukomski, 'Algorithm for automated analysis of surface vibrations using time-averaged digital speckle pattern interferometry', *Applied Optics*, 51 (2012) 5154-5160
- H3. Ł. Lasyk, M. Łukomski, T.M. Olstad, A. Haugen, 'Digital speckle pattern interferometry for the condition surveys of painted wood: Monitoring the altarpiece in the church in Hedalen, Norway', *Journal of Cultural Heritage*, 13S (2012) 102-108
- H4. M. Strojceki, C. Colla, M. Łukomski, E. Gabrielli, 'Kaiser effect in historic timber elements', *European Journal of Wood and Wood Products*, 71 (6) (2013) 787-793
- H5. W. Zawadzki, M. Bartosik, K. Dzierżęga, Ł. Bratasz, M. Łukomski, E. Peacock, 'Application of fiber Bragg gratings for strain measurement in historic textiles and paintings on canvas', *Optica Applicata*, 42 (3) (2012) 503 – 517
- H6. M. Strojceki, M. Łukomski, L. Krzemień, J. Sobczyk, Ł. Bratasz, 'Acoustic emission monitoring of an eighteenth-century wardrobe to support a strategy for indoor climate management', *Studies in Conservation*, 59 (4) (2014) 225 – 232
- H7. Ł. Bratasz, M. Łukomski, A. Klisińska-Kopacz, W. Zawadzki, K. Dzierżęga, M. Bartosik, J. Sobczyk, F. J. Lennard, R. Kozłowski, 'Risk of climate-induced damage in historic textiles', *Strain*, 51 (2015) 78-88, DOI: 10.1111/str.12122
- H8. L. Krzemień, M. Łukomski, A. Kijowska, B. Mierzejewska, 'Combining Digital Speckle Pattern Interferometry with Shearography in a New Instrument to Characterize Surface Delamination in Museum Artefacts', *Journal of Cultural Heritage*, DOI:10.1016/j.culher.2014.10.006, 2014

Omówienie jednotematycznego cyklu prac wchodzących w zakres habilitacji

Wprowadzenie

Jednym z najważniejszych obszarów badań nad obiektami stanowiącymi materialne dziedzictwo kultury jest analiza wpływu warunków przechowywania, ekspozycji i transportu tych obiektów na zmiany stanu ich zachowania. Praktyczne znaczenie badań wspierających prewencję konserwatorską zostało ostatnio wyeksponowane w opublikowanych w 2012 roku wytycznych Międzynarodowej Grupy Organizatorów Dużych Wystaw (tzw. Grupy Bizot), skupiającej największe światowe muzea. Wytyczne te zalecają oparcie regulacji warunków środowiska w muzeach na podstawach naukowych, co, w opinii twórców raportu, prowadzi do ograniczenia zużycia energii przez systemy klimatyzacyjne i ułatwi wypożyczanie dzieł sztuki na wystawy.

Opracowanie skutecznych metod ochrony opiera się w głównej mierze na analizie wzajemnego oddziaływania, wykonanych z różnych materiałów, elementów składowych dzieła sztuki w zmiennych warunkach środowiskowych. Dotyczy to szczególnie obiektów wytworzonych z materiałów podatnych na oddziaływanie pary wodnej. Ustalenie właściwości mechanicznych i reologicznych oraz dynamiki sorpcji pary wodnej i wilgotnościowych zmian metrycznych materiałów higroskopijnych takich jak drewno, warstwy dekoracyjne, płótno, skóra itp. prowadzi do określenia odkształceń i naprężeń wywołujących nieodwracalne deformacje lub pękanie obiektów, czy poszczególnych ich warstw.

Podstawowym, praktycznym problemem opisanego podejścia jest trudność precyzyjnego wyznaczenia właściwości materiałów użytych przez artystów. Zazwyczaj nie istnieje możliwość pobierania próbek z obiektów muzealnych, a jeżeli nawet opiekunowie zbiorów są gotowi takie próbki pozyskać, ich rozmiary są zbyt małe dla większości wymaganych badań. Dlatego, z reguły, pomiary właściwości fizycznych przeprowadzane są na próbkach imitujących materiały historyczne (podobny skład i technologia wytworzenia) poddawanych procesom przyspieszonego starzenia w warunkach podwyższonej temperatury i wilgotności. W efekcie, można poddawać w wątpliwość poprawność stworzonych w oparciu o badania materiałowe zaleceń dotyczących warunków ekspozycji i przechowywania obiektów zabytkowych a nawet zalecenia te negocjować - w przypadku unikatowych lub wyjątkowo wrażliwych na wpływ środowiska dzieł sztuki.

Aby obejść ten istniejący w dziedzinie badań nad obiektami dziedzictwa problem, dynamicznie rozwija się nurt badań nad bezpośrednim monitorowaniem powstawania mikrouszkodzeń w obiektach podczas ekspozycji w różnych warunkach środowiskowych. Ogromną zaletą tego podejścia jest możliwość uzyskania informacji o zmianach stanu zachowania rzeczywistego obiektu zabytkowego, o ile zastosowany pomiar jest precyzyjny, powtarzalny i odporny na środowiskowy szum. Układy monitorujące pełnią funkcję „systemów wczesnego ostrzegania” informując opiekunów zbiorów o wystąpieniu bodźców środowiskowych powodujących mikro-uszkodzenie obiektów. Co oczywiste, wyniki pomiarów mogą służyć do weryfikacji modeli opisujących deformacje i uszkodzenia obiektów w oparciu o pomiary właściwości materiałów.

Cel naukowy prowadzonych badań

Prace badawcze zrealizowane przeze mnie w ciągu ostatnich 8 lat miały na celu opracowanie akustycznych i interferometrycznych metod bezpośredniego pomiaru mikrouszkodzeń w obiektach zabytkowych. W oparciu o te metody dążyłem również do opracowania sposobów obiektywnej oceny zagrożeń związanych z przechowywaniem lub ekspozycją monitorowanych obiektów w określonych warunkach środowiskowych.

Największym wyzwaniem w porównaniu z aplikacjami inżynierskimi, w których podobne systemy stosuje się powszechnie, jest długi czas pomiaru i konieczność eliminacji szumu środowiskowego. Ponadto, stosowane metody muszą uwzględniać ogromną różnorodność materiałów podlegających procesom niszczenia. Materiały higroskopijne używane przez artystów charakteryzują się różną dynamiką dochodzenia do równowagi z warunkami otoczenia i różnymi współczynnikami rozszerzalności temperaturowej i wilgotnościowej. Dlatego, podczas pomiarów należy uwzględnić fakt że, zależnie od budowy obiektów zabytkowych, mikrouszkodzenia mogą pojawiać się zarówno na powierzchni jak i we wnętrzu badanych obiektów. Co więcej niektóre z materiałów artystycznych podlegają cyklicznym przejściom ze stanu plastycznego do kruchego w temperaturach i wilgotnościach typowych dla warunków ekspozycji muzealnej, co zwiększa zagrożenie uszkodzeniami.

Dodatkowym, bardzo ważnym w dziedzinie ochrony zabytków zagadnieniem jest dążenie do prostoty pomiaru i interpretacji wyników, oraz ich komunikatywność. Ponieważ celem mojej pracy było nie tylko zrozumienie zachodzących procesów niszczących ale również wprowadzenie opracowanych metod monitorowania do praktyki konserwatorskiej, opracowane narzędzia pomiarowe miały, z założenia, w możliwie jak największym stopniu działać automatycznie i dostarczać wyników w łatwej do interpretacji formie.

Mając na uwadze powyższe wymagania zdecydowałem się rozwijać trzy metody badawcze: interferometrię plamkową, emisję akustyczną oraz światłowodowe siatki Bragga. Pierwsze dwie metody pozwoliły na opracowanie układów do pomiaru powstawania uszkodzeń w warstwach malarskich oraz drewnie stanowiącym ich podłoże, w obiektach takich jak obrazy tablicowe oraz zabytkowe meble. Natomiast czujniki światłowodowe umożliwiły wykonanie ciągłych pomiarów deformacji zabytkowych tkanin i płóciennych podobrazii.

Ilustracją głównych osiągnięć mojej pracy naukowej jest cykl ośmiu publikacji. Poniżej przedstawiam wyniki badań podzielone na trzy części poświęcone trzem technikom monitorowania wykorzystanym do diagnozowania zagrożeń specyficznych dla określonych kategorii materiałów i elementów obiektów zabytkowych.

Interferometria plamkowa

Interferometria plamkowa (DSPI - Digital Speckle Pattern Interferometry) jest odmianą interferometrii holograficznej opartej na analizie światła laserowego rozproszonego na

optycznie chropowatej powierzchni. Technika ta jest powszechnie stosowana do analizy sub-mikrometrycznych odkształceń i przesunięć oraz wibracji obiektów. Umożliwia bezkontaktowy pomiar pola odkształceń powierzchni w czasie rzeczywistym z dużą szybkością i precyzją. Na przestrzeni ostatnich dwudziestu lat opracowano wiele technik eksperymentalnych opartych na interferometrii plamkowej wykorzystujących ciągłe bądź impulsowe źródła światła laserowego i różniących się konstrukcją układów optycznych oraz metodami analizy rejestrowanych obrazów. Znalazły one zastosowanie w podstawowych i stosowanych badaniach naukowych oraz kontroli jakości elementów konstrukcyjnych (np. w przemyśle lotniczym i samochodowym).

DSPI zaczęto stosować do analizy stanu zachowania dzieł sztuki w latach 80tych ubiegłego wieku jako alternatywę dla wymagającej warunków laboratoryjnych interferometrii holograficznej. Duża skuteczność w wykrywaniu uszkodzonych fragmentów malowideł na podłożu drewnianym, odporność na środowiskowy szum i obiektywny charakter pomiaru spowodowały, że metodę zaczęto stosować również do oceny stopnia uszkodzenia malowideł ściennych i mozaik. Jednak wysoka cena urządzeń pomiarowych oraz złożony charakter pomiaru i interpretacji jego wyników były przez długi czas poważną barierą w szerokim zastosowaniu interferometrycznych metod pomiarowych w dziedzinie ochrony zabytków.

Sytuacja zmieniła się radykalnie w ciągu ostatnich dziesięciu lat. Cena układów pomiarowych przestała być barierą w ich stosowaniu - obniżenie kosztów komponentów optycznych widać szczególnie w przypadku pompowanych diodami jednomodowych laserów pracy ciągłej. Również ogromne zwiększenie mocy obliczeniowej przenośnych komputerów spowodowało, że złożone obliczenia wymagane podczas analizy wyników pomiarowych można wykonywać niemal w czasie rzeczywistym. Największym wyzwaniem pozostawał złożony sposób wykonania pomiaru i trudność w ilościowej interpretacji interferencyjnych obrazów rejestrowanych podczas pomiarów. Ten drugi problem jest szczególnie istotny dla środowiska konserwatorsko-muzealnego, ponieważ celem analizy stanu zachowania obiektu jest nie tylko wykrycie uszkodzeń powierzchni ale również, a może przede wszystkim, ilościowa ocena stopnia uszkodzenia i ryzyka jego propagacji.

W związku z powyższym moim głównym celem badawczym było opracowanie metody DSPI, która mogłaby skutecznie wspomóc pracę konserwatorów zabytków pozwalając na ilościową ocenę mikro uszkodzeń powierzchni dzieł sztuki; metody, która byłaby łatwa w użyciu, i pozwalała na intuicyjną interpretację uzyskiwanych wyników.

Badania metodą DSPI prowadziłem przy użyciu własnoręcznie konstruowanych interferometrów – takie podejście umożliwia swobodne testowanie różnych elementów toru optycznego oraz konstruowanie urządzeń, których rozmiar i kształt można dopasować do geometrii badanych obiektów. Już na etapie wstępnych prac przygotowawczych zdecydowałem się na zastosowanie techniki pomiaru opartej o rejestrację światła ciągłego. Interferometry wykorzystujące lasery impulsowe pozwalają wprawdzie, dzięki zastosowaniu technik stroboskopowych, na łatwiejszą interpretację wyników w przypadku wibracji powierzchni, ale wymagają użycia większych mocy światła laserowego i precyzyjnej synchronizacji czasu ekspozycji i rejestracji obrazu, co

związane jest z koniecznością dodatkowej kalibracji systemu przed dokonaniem pomiaru. Podstawową zaletą opracowanego przeze mnie układu pomiarowego była jego wielostronność. W najprostszej wersji może on pracować w trybie analizy korelacji obrazów (DIC – digital image correlation), po dodaniu toru wiązki referencyjnej może służyć do analizy przestrzennego rozkładu odpowiedzi metrycznej powierzchni na zmiany temperatury a po zastosowaniu przesuwnika fazy w torze wiązki referencyjnej pozwala na ilościową analizę wibracji powierzchni.

Działanie najprostszego układu pomiarowego (DIC) polega na rejestracji i odejmowaniu od siebie, w czasie rzeczywistym, obrazów powierzchni oświetlonej światłem jednomodowego lasera pracy ciągłej podczas ogrzewania lub chłodzenia powierzchni. Zmiana temperatury powoduje deformację powierzchni, a wielkość tej deformacji zależy od temperatury badanego obszaru. Im większe są różnice temperatury powierzchni pomiędzy kolejnymi rejestracjami, tym większa jest zmiana natężenia światła w rejestrowanych obrazach interferencyjnych. Cyfrowe odejmowanie zarejestrowanych obrazów pozwala więc wykryć niejednorodności w rozkładzie temperatury powierzchni, które z reguły związane są z występowaniem strukturalnych uszkodzeń: pęknięć, rozwarstwień lub odspojień warstw dekoracyjnych. Po rozbudowaniu układu o wiązkę referencyjną (aby maksymalnie uprościć budowę układu optycznego w opracowanym interferometrze użyto matówki w torze wiązki referencyjnej) pomiar odbywa się w identyczny sposób, ale uzyskiwane wyniki mają postać rozkładu prążków interferencyjnych. Prążki zagęszczają się w obszarach gdzie występują lokalne deformacje związane z niejednorodnościami temperatury powierzchni. Metoda jest bardzo czuła, pozwala precyzyjnie wskazać miejsca, w których występują niejednorodności w odpowiedzi materiału na bodziec, jakim jest wzrost lub spadek temperatury. Niemniej wynik pomiaru nie jest jednoznaczny. Przestrzenne zagęszczenie prążków interferencyjnych podczas nagrzewania powierzchni może wynikać z lokalnych różnic pojemności cieplnej lub przewodnictwa cieplnego badanego obiektu, wynikających z różnej grubości warstw dekoracyjnych lub niejednorodności podłoża (np. sęków w strukturze drewna stanowiącego podobrazie). Aby odróżnić uszkodzenia powierzchni (odspojenia warstwy dekoracyjnej od podłoża lub jej rozwarstwienia) od niejednorodności struktury obiektu zastosowałem metodę wzbudzenia drgań powierzchni falą akustyczną. W tej metodzie dźwięk emitowany z głośnika jest źródłem siły wymuszającej drgania powierzchni. Podczas pomiaru, częstotliwość dźwięku jest dostrajana tak aby uzyskać rezonansowe wymuszenie drgań odspojonego fragmentu warstwy dekoracyjnej. Rejestracja drgających fragmentów powierzchni pozwala nie tylko jednoznacznie wskazać na istnienie uszkodzenia, ale dodatkowo umożliwia określenie rozmiaru defektu oraz częstotliwości rezonansowej, na której odbywa się wibracja. Ponadto, zastosowanie algorytmów do odwikłania fazy opartych o kontrolę opóźnienia pomiędzy wiązką obiektową i referencyjną (np. four-frame algorithm) pozwala wyznaczyć przestrzenny rozkład amplitudy wibracji rejestrowanych podczas pomiarów. Ten ostatni wynik wymaga jednak stabilnych warunków pomiarowych – rejestracji co najmniej ośmiu obrazów z dobrze określoną różnicą faz wiązek laserowych.

W efekcie prowadzonych badań udało się zbudować interferometr plamkowy, który umożliwia analizę stanu zachowania powierzchni obrazów, oraz opracować i zoptymalizować procedurę pomiarową. Pierwszym jej etapem jest analiza

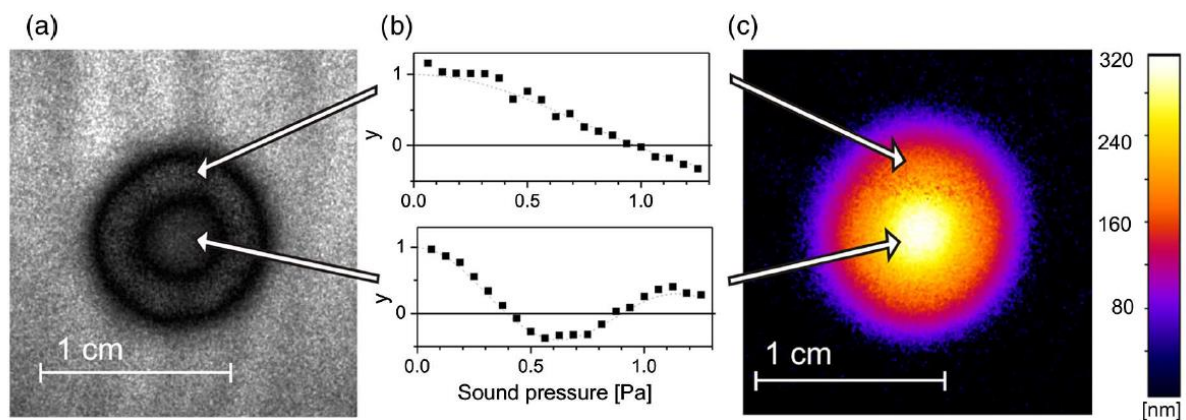
interferogramów uzyskanych przy użyciu wzbudzenia termicznego. Następnie w miejscach wybranych na podstawie wyników tej analizy przeprowadza się pomiar z użyciem wzbudzenia akustycznego, aby potwierdzić istnienie odspojień warstwy malarskiej i scharakteryzować uszkodzone fragmenty malowidła. Charakterystyka uszkodzeń jest trzystopniowa. Po pierwsze można wyznaczyć wielkość drgającego fragmentu powierzchni, po drugie przestrzenny rozkład amplitudy wibracji i wreszcie wartości podstawowych i wyższych harmonicznymi częstotliwości jego drgania rezonansowego. Dokładny opis układu pomiarowego oraz zastosowanych procedur przedstawiony został w pracy H1.

Wyniki uzyskane dla obiektów modelowych w warunkach laboratoryjnych były następnie podstawą do wykonania prac badawczych w zabytkowym kościele w Hedalen w Norwegii. Głównym problemem podjętych badań była ocena wpływu działającego w kościele systemu grzewczego na postęp niszczenia polichromii średniowiecznego ołtarza znajdującego się we wnętrzu. Pomiar przy użyciu interferometrii plamkowej przeprowadzono na wybranych przez konserwatorów z Norweskiego Instytutu Badań nad Dziedzictwem Kultury - NIKU fragmentach ołtarza – kryteriami wyboru badanych powierzchni były ich reprezentatywność dla polichromii znajdujących się w kościele oraz dostępność dla aparatury badawczej. Przeprowadzono dwie kampanie pomiarowe w odstępie jednego roku, aby zaobserwować zmiany stanu zachowania powierzchni na poziomie sub-mikrometrycznym. W wyniku pomiarów udało się precyzyjnie opisać stan zachowania badanego fragmentu ołtarza i wykazać, że zmiany wilgotności względnej we wnętrzu kościoła, spowodowane działaniem systemu ogrzewania, mają bardzo niewielki (ale mierzalny) wpływ na postępujący proces niszczenia warstwy dekoracyjnej ołtarza. Uzyskane wyniki miały praktyczny wpływ na decyzję konserwatorów z NIKU o pozostawieniu cennych i wrażliwych obiektów wewnątrz kościoła, mimo iż początkowo planowali oni umieścić je w muzeum właśnie ze względu na złe warunki klimatyczne panujące w kościele. Wyniki przeprowadzonych pomiarów zostały zaprezentowane w pracy H3.

Kampanie pomiarowe przeprowadzone w zabytkowym wnętrzu kościoła uzmysłowiły mi, że DSPI może skutecznie wspierać proces zarządzania warunkami przechowywania obiektów dostarczając opiekunom zbiorów istotnych i trudnych do uzyskania w inny sposób informacji. Do rozwiązania pozostawały jednak dwa istotne, powiązane ze sobą, problemy. Pierwszym była trudność wykonania pomiarów w warunkach charakteryzujących się dużym szumem środowiskowym. Sama detekcja uszkodzeń powierzchni w oparciu o wzbudzenie termiczne lub akustyczne była możliwa, ale wyznaczenie przestrzennego rozkładu amplitudy wibracji, wymagające przeprowadzenia serii pomiarów z kontrolowaną różnicą faz pomiędzy wiązkami laserowymi, nie było możliwe z powodu niewystarczającej stabilizacji mechanicznej układu pomiarowego. Drugi problem dotyczył kwestii komunikacyjnych. Wyniki pomiaru prezentowane w postaci skupisk prążków interferencyjnych były trudne do zrozumienia dla konserwatorów, a procedury przekształcania obrazów interferencyjnych w mapy pokazujące przestrzenny rozkład wibracji były tylko częściowo zautomatyzowane – w istniejących algorytmach do przestrzennego odwikłania fazy użytkownik musiał sam określić pozycje pierwszego maksimum funkcji Bessela opisującej zależność natężenie

światła od amplitudy drgań oraz manualnie oznaczyć granice drgających obszarów. Na rozwiązaniu tych dwóch problemów skupiłem się w dalszej pracy badawczej.

Aby zautomatyzować metodę wykonywania pomiaru i analizy uzyskiwanych wyników postanowiłem wypróbować zupełnie nowe podejście polegające na rejestracji interferogramów podczas stopniowego zwiększania natężenia wymuszającego te drgania dźwięku. Procedura polega na przeprowadzeniu serii pomiarów z kontrolowaną różnicą faz między wiązkami laserowymi dla stopniowo zwiększającej się amplitudy dźwięku o wybranej wcześniej częstotliwości. W wyniku otrzymujemy serię interferogramów obrazujących rozkład amplitudy drgań powierzchni przy coraz większej amplitudzie drgań. Natężenie sygnału w dowolnym punkcie zarejestrowanego interferogramu jest wyrażone funkcją Bessela pierwszego rzędu, której argumentem jest amplituda drgania powierzchni. Jeśli dodatkowo założymy, że amplituda drgania powierzchni jest proporcjonalna do amplitudy emitowanego dźwięku to możemy przeprowadzić procedurę dopasowania funkcji Bessela do zarejestrowanych w każdym punkcie powierzchni natężeń sygnału dla zwiększającego się ciśnienia fali akustycznej emitowanej przez głośnik. Ideę analizy sygnału prowadzącą do wyznaczenia przestrzennego rozkładu amplitudy vibracji powierzchni pokazano na Rys. 1.



Rys. 1. Analiza wywołanej falą dźwiękową vibracji odspojonego od drewnianego podłoża fragmentu gruntu malarskiego: (a) interferogram obrazujący rozkład amplitudy vibracji powierzchni dla wybranej amplitudy dźwięku; (b) procedura dopasowania funkcji Bessela dla dwóch, wybranych punktów obrazu; (c) wyznaczona mapa amplitudy vibracji.

Poważnym mankamentem takiej procedury obliczeniowej jest jej czasochłonność. Program analizujący dane działa wprawdzie w pełni automatycznie, ale wymaga dopasowania nieliniowej funkcji do zbioru danych we wszystkich punktach rejestrowanego obrazu. W przypadku stosowanej przez nas kamery jest to 6.6 miliona punktów, co na komputerze osobistym trwa kilka godzin. Takie opóźnienie pomiędzy rejestracją sygnału a uzyskaniem wyniku jest nie do zaakceptowania w przypadku pomiarów dotyczących dzieł sztuki, podczas których ze względu na ograniczenia w dostępie do obiektów optymalizacja pomiaru musi być dokonywana na bieżąco na podstawie uzyskiwanych wyników.

Przyspieszenie obliczeń było więc sprawą kluczową. Ponieważ znalezienie parametrów dopasowania funkcji jest najważniejszym elementem procedury wyznaczania amplitudy drgań powierzchni, konieczne było uproszczenie postaci dopasowywanej funkcji poprzez

modyfikację danych pomiarowych. Dokonano tego stosując transformatę Hilberta, której wynikiem jest przesunięcie semi-periodycznej funkcji (jaką jest analizowana funkcja Bessela) o $\pi/2$. Arctg ilorazu sygnału i jego transformaty jest funkcją liniową, której dopasowanie można dobrze zoptymalizować numerycznie. Zastosowanie transformaty Hilberta w procedurze obliczeniowej pozwoliło przyspieszyć tę procedurę kilkadziesiąt razy tak, że wynik pomiaru uzyskuje się już po kilku minutach. Dzieje się to kosztem dokładności pomiaru (operacja przesuwania funkcji jest operacją przybliżoną) jednak różnice w wyznaczonej amplitudzie drgania pomiędzy wynikiem bezpośredniego dopasowywania funkcji Bessela i wynikiem dopasowywania funkcji liniowej dla danych po transformacji Hilberta w typowych przypadkach nie przekraczają 10%. Z punktu widzenia efektywności użycia interferometrii do prowadzenia badań w obiektach zabytkowych korzyść z przyspieszenia pomiarów wydaje się z nadatkiem kompensować niedokładności pomiarowe – tym bardziej że, jeśli zajdzie taka potrzeba, wszystkie obliczenia można powtórzyć używając metody dopasowywania funkcji Bessela już po zakończeniu pomiarów.

Podsumowując, prace nad optymalizacją procedury pomiarowej pozwoliły mi skonstruować urządzenie, które jest łatwe w obsłudze (po znalezieniu częstotliwości rezonansowej defektu całą sekwencję pomiarową można wykonać automatycznie) i zapewnia w pełni automatyczną analizę wyników pomiaru. Dzięki zastosowaniu przybliżonych metod obróbki sygnału wynik jest otrzymywany po kilku minutach co pozwala dobrze planować i efektywnie prowadzić sesje pomiarowe. Warto podkreślić, że amplituda drgania powierzchni jest wyznaczana w każdym jej punkcie niezależnie dzięki czemu pomiar jest odporny na propagację błędów; łatwo wprowadzić kontrolę błędów (np. poprzez kontrolę jakości dopasowania funkcji) i identyfikować błędne wyniki obliczeń. Zastosowana metoda pomiaru i analizy danych została szczegółowo przedstawiona w pracy H2, a analiza dokładności metod analizy danych w pracy nr 6 wymienionej w publikacjach w recenzowanych materiałach konferencyjnych, która nie weszła do zestawu prac będących podstawą postępowania habilitacyjnego.

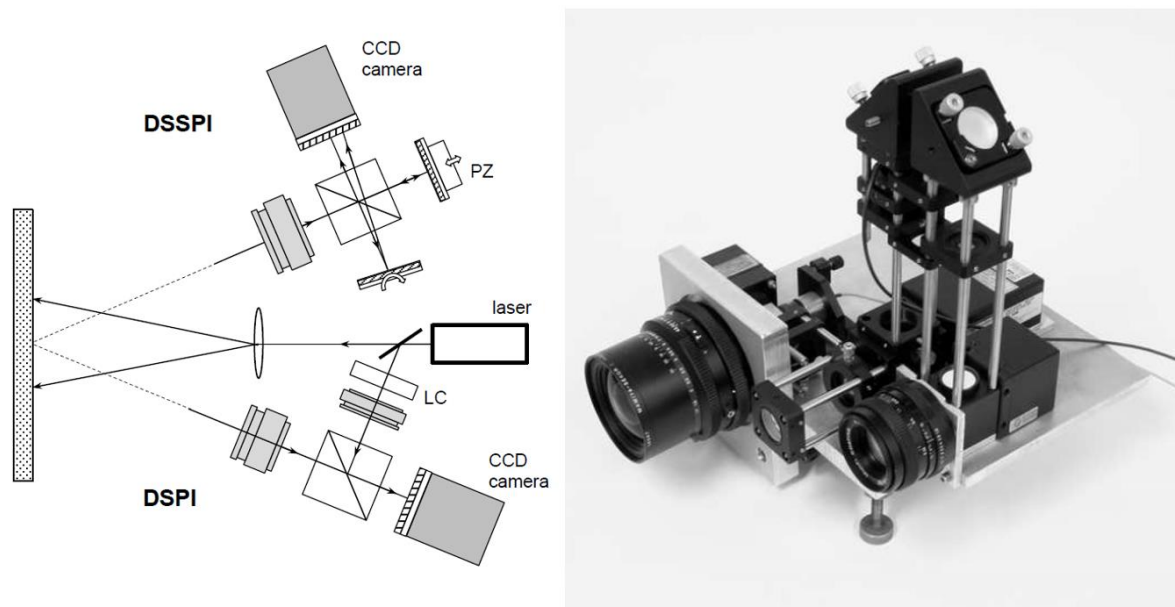
Ostatnim, chyba największym praktycznym problemem występującym podczas prowadzenia pomiarów w warunkach ekspozycji obiektów są niekontrolowane drgania układu pomiarowego względem badanej powierzchni. Interferometr płamkowy wymaga użycia referencyjnej wiązki światła do rekonstrukcji rozkładu amplitudy drgań. Wiązka ta jest związana z układem pomiarowym, więc nawet bardzo niewielkie drgania tego układu względem badanej powierzchni prowadzą do niekontrolowanych, skokowych zmian fazy i zaburzają procedurę pomiarową. Problem można częściowo rozwiązać przez wielokrotne powtarzanie pomiarów dla tej samej amplitudy i częstotliwości wymuszającego drgania dźwięku lub przez odfiltrowywanie błędnych danych na etapie dopasowywania funkcji Bessela do wyniku pomiarów, jednak w niektórych przypadkach szum środowiskowy jest tak duży, że pomiaru nie da się przeprowadzić. Taka sytuacja wystąpiła podczas prac prowadzonych wspólnie z konserwatorami Muzeum Narodowego w Warszawie nad malowidłami ściennymi z Kolekcji Faras. Celem projektu była analiza stanu zachowania fragmentów malowideł w celu określenia stabilności warstwy powierzchniowej wybranych fragmentów fresków, ilościowego opisu odspojień oraz rozwarstwień warstw powierzchniowych oraz oceny ryzyka związanego z ekspozycją tych obiektów w nowej galerii w muzeum. Zadanie okazało się bardzo trudne

ze względu na duże rozmiary malowideł i wynikający stąd brak możliwości sztywnego zespolenia ich z układem pomiarowym. Niemożność ograniczenia wzajemnych drgań obiektu i interferometru skłonił mnie do poszukiwania innego rozwiązania problemu. Ostatecznie zdecydowałem się na rozbudowę układu pomiarowego o układ szerograficzny DSSPI (Digital Speckle Shearing Pattern Interferometry). W układzie DSSPI światło odbite od powierzchni obiektu jest dzielone w układzie interferometru Michelsona tak, aby utworzyć podwójny obraz analizowanej powierzchni. W efekcie wiązka obiektowa i referencyjna związane są z obiektem i drgania układu względem obiektu nie zmieniają różnicy dróg optycznych – nie powodują więc dekoherencji rejestrowanego obrazu interferencyjnego.

Należy podkreślić, że układ szerograficzny działa w skonstruowanym urządzeniu inaczej niż w układach podobnego typu, w których badana jest kierunkowa pochodna deformacji powierzchni. Przesunięcie między interferującymi wiązkami jest tu za każdym razem tak dobierane, aby światło laserowe rozproszone na drgającym elemencie interferowało ze światłem rozproszonym na nieruchomej części powierzchni. Dzięki temu analizę sygnału można przeprowadzać przy pomocy tych samych procedur, które stosuje się w układzie DSPI. Oczywistą konsekwencją takiego rozwiązania jest fakt, że rejestrowany obraz jest rozdwojony, co w przypadku gdy na powierzchni znajdują się liczne odspojenia, lub przeciwnie gdy badany defekt jest większy od połowy pola widzenia, utrudnia interpretację wyników. Dlatego konieczne okazało się połączenie obu układów pomiarowych i opracowanie protokołu pomiaru, który zapewnia jednoznaczność interpretacji wyników (DSPI) oraz nieczułość na wibracje (DSSPI). Układ pomiarowy oraz zdjęcie urządzenia przedstawione jest na Rys. 2.

Procedura pomiarowa dla każdego fragmentu powierzchni przebiega dwuetapowo. W pierwszym kroku używa się układu DSPI ze wzbudzeniem akustycznym do wykrywania odspojień warstw powierzchniowych. Na tym etapie uzyskuje się informację o rozmiarze defektów i ich częstotliwości rezonansowej. W drugim kroku używa się interferometru DSSPI ze wzbudzeniem akustycznym do wyznaczenia przestrzennego rozkładu amplitudy wibracji defektów wykrytych w kroku poprzednim. W rezultacie otrzymuje się pełną charakterystykę defektów powierzchni w wyniku automatycznej procedury obliczeniowej dla danych zarejestrowanych nawet w warunkach dużego szumu środowiskowego. Opracowana metoda pomiarowa okazała się w pełni skuteczna, jej dokładny opis i wyniki uzyskane dla kolekcji z Faras zostały przedstawione w pracy H8.

Podsumowując, metody interferometrii plamkowej okazały się bardzo skuteczne w analizie stanu zachowania powierzchni obiektów zabytkowych. Opracowane przeze mnie układy pomiarowe oraz procedury rejestrowania i analizy danych umożliwiają analizowanie zmian powierzchni z dokładnością pozwalającą na ocenę wpływu warunków przechowywania i ekspozycji na obiekty w stosunkowo krótkim czasie (w typowych kampaniach pomiarowych tym okresem był jeden rok).



Rys. 2. Schemat układu pomiarowego będącego kombinacją DSPI i DSSPI oraz zdjęcie urządzenia; PZ (przetwornik piezoelektryczny) i LC (ciekłokrystaliczny opóźniacz fazy) – elementy służące do kontroli opóźnienia fazy wiązki referencyjnej w obu interferometrach.

Emisja akustyczna

Równolegle do prac nad interferometrycznymi technikami charakteryzowania powierzchni kontynuowałem, rozpoczęte wcześniej w IKiFP PAN, badania nad możliwościami zastosowania metody emisji akustycznej jako narzędzia do oceny warunków przechowywania obiektów zabytkowych. Nazwą „emisja akustyczna” oprócz metody monitorowania określamy również samo zjawisko polegające na powstaniu, podczas mikro-pęknięcia struktury materiału, fali akustycznej. Fala ta propaguje w materiale i można ją rejestrować na powierzchni przy pomocy przetworników piezoelektrycznych, które zamieniają sygnał akustyczny w sygnał napięciowy proporcjonalny do energii uwolnionej podczas rejestrowanego zdarzenia. Pomiar emisji akustycznej umożliwia określenie korelacji między powstaniem uszkodzenia i bodźcem to uszkodzenie wywołującym. Co ważne, metoda pozwala rejestrować w czasie rzeczywistym mikropęknięcia w strukturze materiału co czyni ją komplementarną wobec opisanych wyżej metod interferometrycznych charakteryzujących jedynie powierzchnię obiektu w określonym momencie.

Metoda emisji akustycznej jest używana w inżynierii lądowej i materiałowej od ponad 50 lat do monitorowania bezpieczeństwa budowli i wytrzymałości na obciążenie/zmęczenie krytycznych elementów konstrukcyjnych. W większości materiałów o budowie krystalicznej (głównie metali) sygnały emisji akustycznej nie pojawiają się podczas obciążania materiału dopóki naprężenia nie przekroczą wartości osiągniętej w poprzednich cyklach obciążenia. Ta zdolność „zapamiętywania” najwyższego poziomu naprężenia wywieranego na materiał w przeszłości nazywana jest efektem Kaisera. Badanie efektu Kaisera w materiałach organicznych, takich jak drewno, jest bardzo złożone ze względu na wyraźne właściwości lepko-sprężyste tego materiału, które

prowadzą do relaksacji naprężeń. Opublikowane dotychczas prace dotyczące emisji akustycznej w nowym, ale poddanym procesowi sezonowania, drewnie pokazują, że efekt Kaisera zanika po upływie zaledwie dwóch tygodni od przeprowadzenia testów mechanicznych (przy czym wykonywano zarówno badania rozciągające jak i skręcające). Należy przy tym podkreślić, że całkowity brak efektu Kaisera (czyli mówiąc bardziej obrazowo „pamięci” materiału o wielkości naprężeń którym był poddany) oznacza, że każdy cykl obciążenia obiektu wywołuje identyczne zniszczenie. Efekt taki podważałby powszechnie akceptowaną w środowisku konserwatorskim zasadę aklimatyzacji, zgodnie z którą ryzyko fizycznego uszkodzenia obiektu jest bardzo małe tak długo, jak długo warunki jego przechowywania mieszczą się w zakresach parametrów temperaturowych i wilgotnościowych panujących w przeszłości.

W związku z powyższym uznałem za ważne zbadanie efektu Kaisera w historycznym drewnie, z którego wykonane są zabytkowe meble, podobrazia i konstrukcje nośne budynków. We współpracy z partnerami z Uniwersytetu w Bolonii metodę emisji akustycznej zastosowałem do monitorowania mikro-pęknięcia 150-tetnich belek świerkowych pozyskanych z dachu pałacu Prosperi-Sacraty w Ferrarze. Testy polegały na cyklicznym 4 punktowym zginaniu belek ze zwiększającym się w kolejnych cyklach obciążeniem. Emisję akustyczną rejestrowano przy pomocy zbudowanego w IKiFP PAN układu pomiarowego wykorzystującego szerokopasmowe, multi-rezonansowe czujniki piezoelektryczne. Serię pomiarów powtórzono po roku na tych samych belkach stosując identyczny schemat obciążenia podczas zginania, aby ocenić stopień relaksacji materiału i jej wpływ na mierzony sygnał.

Przeprowadzone badania wykazały istnienie krótkoczasowego efektu Kaisera w badanych próbkach (podobnie jak w próbkach z nowego, sezonowanego drewna) a pomiary przeprowadzone po roku pokazały trwałość efektu Kaisera w tym okresie (czego w próbkach z nowego drewna nie zaobserwowano). Eksperymentalna weryfikacja istnienia efektu Kaisera dla historycznego drewna pozwala na ustalanie historii naprężeń w drewnianych dziełach sztuki i elementach budowli - informacji niezwykle istotnej dla oceny ryzyka uszkodzenia mechanicznego tych obiektów. Zastosowaną metodologię i szczegółowe wyniki przeprowadzonych eksperymentów przedstawiono w pracy H4.

Pomiary cyklicznie obciążanych elementów konstrukcyjnych wykonanych z historycznego drewna kolejny raz potwierdziły wyraźną korelację między wywołanym zewnętrzną siłą odkształceniem materiału a energią rejestrowanych sygnałów emisji akustycznej. Wynik ten zachęcił mnie do podjęcia długookresowych pomiarów powstawania mikrouszkodzeń w drewnianych dziełach sztuki pod wpływem naprężeń wywołanych zmiennymi warunkami mikroklimatycznymi w środowisku, w którym obiekty te są ekspozowane. Wykonanie takich pomiarów wymagało opracowania systemu detekcji emisji akustycznej, umożliwiającego prowadzenie długookresowego monitoringu przy wysokim poziomie szumu. W warunkach ekspozycji muzealnej, w budynku o kontrolowanym klimacie, można oczekiwać bardzo niewielkiej energii sygnałów pochodzących od pęknięcia materiału w porównaniu do rejestrowanego szumu środowiskowego związanego z normalnym użytkowaniem pomieszczeń. Konieczne jest więc zastosowanie wyjątkowo efektywnego odfiltrowywania sygnałów niebędących wynikiem pęknięcia monitorowanego obiektu.

W przypadku emisji akustycznej, powszechnie stosowaną metodą redukcji szumu środowiskowego, jest filtrowanie częstotliwościowe mierzonych sygnałów. Pomiar laboratoryjne wykazały jednak, że nie istnieje jedna charakterystyczna częstotliwość sygnałów emisji akustycznej skorelowanych z mikro-uszkodzeniem drewna. Sygnały, podczas przechodzenia przez materiał ulegają osłabieniu, a ich charakterystyki częstotliwości są dodatkowo zaburzone przez zastosowane detektory i wzmacniacze. W tej sytuacji, zamiast pomiarów z użyciem wąskiego, dobrze zdefiniowanego okna częstotliwościowego, zdecydowałem się na użycie wysokoprzepustowych filtrów w celu odciążenia jedynie niskoczęstotliwościowych sygnałów, które z reguły są wywołane zdarzeniami niezwiązanymi z pękaniem materiału. Dodatkowo przetestowałem układy pomiarowe zbudowane w oparciu o różne detektory (szerokopasmowe: o płaskiej i wielorezonansowej charakterystyce częstotliwościowej oraz wąskopasmowe) i różne amplitudowe progi detekcji. Otrzymane wyniki pokazały, że filtrowanie częstotliwościowe znacznie poprawia stosunek sygnału do szumu i pozwala usunąć większość niepożądanych sygnałów zaciemniających wyniki, jednak nie wystarcza do przeprowadzenia ilościowej analizy postępu niszczenia obiektów w warunkach ekspozycji. Dzieje się tak dlatego, że sygnały pochodzące od personelu i zwiedzających lub elektronicznego szumu, choć rzadkie, mogą mieć porównywalną, lub większą energię od sygnałów związanych z uszkodzaniem struktury monitorowanego obiektu.

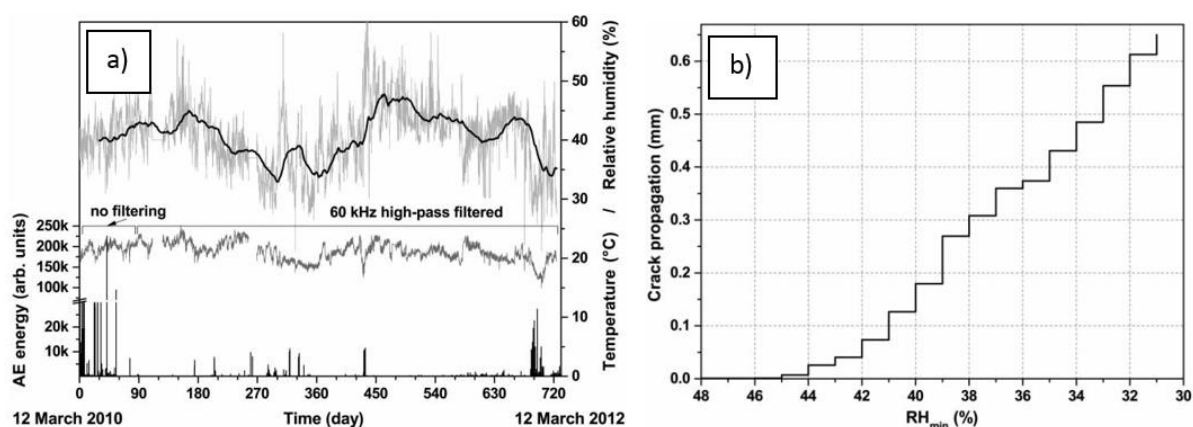
Aby rozwiązać ten problem zaproponowałem system oparty na dwóch szerokopasmowych różnicowych czujnikach emisji akustycznej działających w trybie antykorelacji. Czujniki umieszczone są w takiej odległości, że sygnał rejestrowany przez jeden z nich nie może, z powodu tłumienia materiału, dotrzeć do drugiego a wszystkie zdarzenia rejestrowane w tej samej milisekundzie są odrzucane z analizy jako niezwiązane z uszkodzaniem materiału. Antykorelacyjny pomiar połączony z wysokoprzepustowym filtrowaniem sygnałów pozwolił ostatecznie na efektywny pomiar sygnałów związanych z mikro-pękaniem obiektów wywołanym wahaniami parametrów mikroklimatycznych.

Po raz pierwszy, opracowany system pomiarowy został zastosowany do monitorowania XVIII wiecznej szafy eksponowanej w Galerii Rzemiosła Artystycznego Muzeum Narodowego w Krakowie. Ten masywny, w wielu miejscach uszkodzony, mebel został wybrany przez konserwatorów jako przykład obiektu najbardziej zagrożonego niekontrolowanymi wahaniami parametrów klimatycznych. Czujniki emisji akustycznej przytwierdzono w pobliżu istniejących pęknięć - wierzchołek pęknięcia jest miejscem najbardziej zagrożonym, w którym koncentrują się naprężenia. Monitorowanie obiektu prowadzono przez dwa lata. Analiza wyników polegała na określaniu czasowych korelacji pomiędzy poziomem mierzonego sygnału akustycznego, a rejestrowanymi spadkami wilgotności względnej które prowadzą do skurczu i pęknięcia elementów drewnianych mebli eksponowanych w muzeach.

Pierwszym krokiem analizy wyników monitorowania było określenie zależności czasowych między rejestrowanymi sygnałami emisji akustycznej a wywołującymi je bodźcami klimatycznymi. Czas dochodzenia obiektu do równowagi w zmieniających się warunkach środowiskowych zależy od szybkości dyfuzji pary wodnej w materiale, z którego jest on zbudowany, od rozmiaru obiektu, jego geometrii oraz konstrukcji.

Opracowana procedura oceny zagrożeń polegała na wyborze okna czasowego o długości odpowiadającej czasowi w jakim obiekt w pełni odpowie metrycznie na bodźce klimatyczne. Następnie każdemu zarejestrowanemu sygnałowi emisji akustycznej przypisywano średnią kroczącą wilgotności względnej otoczenia o stałej czasowej odpowiadającej długości wybranego w poprzednim kroku okna (1 tydzień dla badanej szafy). Ostatnim krokiem analizy było określenie korelacji pomiędzy liczbą spadków uśrednionej wilgotności względnej i zarejestrowanej podczas tych spadków energii emisji akustycznej.

Wyniki pomiarów i przyrost pęknięć w ciągu roku w wyniku spadków jednotygodniowej średniej kroczącej wilgotności względnej powietrza do różnych poziomów (RH_{min}) pokazano na Rys. 3. Precyzyjny opis procedury obliczeniowej oraz kalibracyjnej, pozwalającej wyznaczyć uszkodzenia w oparciu o zmierzona energię emisji akustycznej, przedstawiono w pracy H6.



Rys. 3. Wynik dwuletniego monitorowania mebla w galerii w Muzeum Narodowym w Krakowie: a) temperatura i wilgotność względna oraz energia zarejestrowanych zdarzeń emisji akustycznej przedstawiona w postaci pionowych linii; b) przyrost pęknięcia na powierzchni ściany bocznej szafy w ciągu jednego roku.

Zaprezentowany wynik, mimo że uzyskany dla konkretnego obiektu w specyficznych warunkach mikroklimatycznych, ma fundamentalne znaczenie dla określenia zagrożeń związanych z ekspozycją obiektów drewnianych w warunkach niekontrolowanych spadków wilgotności względnej. Jeśli przyjmiemy że badany mebel jest dobrym reprezentantem zbiorów (lub ich najbardziej podatnym na uszkodzenie przedstawicielem) to na podstawie Rys. 3 b możemy określić spodziewany przyrost uszkodzeń w zależności od zastosowanej strategii kontroli wilgotności w galerii. Jest to niezwykle ważne dla projektowania i instalowania nowych i określania algorytmów działania już istniejących systemów klimatyzacji w muzeach

Sukces w zastosowaniu emisji akustycznej do bezpośredniego śledzenia narastania uszkodzenia w obiektach drewnianych wynika z dużej precyzji i nieinwazyjnego charakteru pomiaru. Obecnie prowadzone są prace nad kolejnymi modyfikacjami systemu, których celem jest jego miniaturyzacja, zastosowanie nowych czujników o wysokiej czułości i jednorodnej charakterystyce częstotliwościowej odpowiedzi oraz użycie połączenia internetowego do kontrolowania procesu zbierania danych.

Światłowodowe siatki Bragga

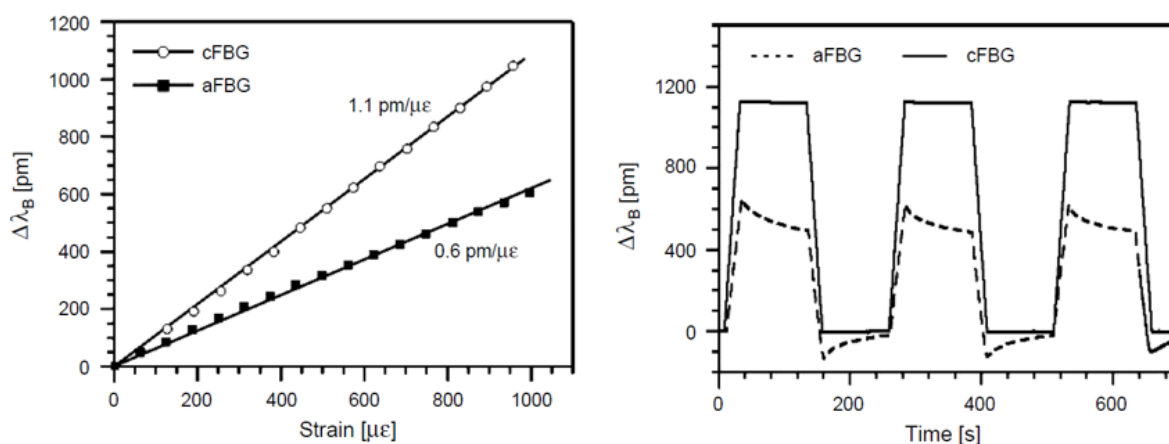
Badania nad możliwością zastosowania światłowodowych siatek Bragga do pomiaru zmian zachodzących w obiektach tekstylnych (w tym w płóciennych podobrazach) były naturalną konsekwencją poszukiwania przez mnie systemów pomiarowych, które umożliwiają monitorowanie szeroko zdefiniowanej niszczącej odpowiedzi wilgotnościowej obiektów zabytkowych wykonanych z materiałów higroskopijnych. Tkaniny stanowią bardzo ważny i liczny zasób w kolekcjach muzealnych. Według konserwatorów i opiekunów zbiorów zmiany wilgotności i temperatury otoczenia prowadzące do cykli skurczu i pęcznienia włókien mogą powodować ich uszkodzenie. Dlatego muzealne normy i wytyczne konserwatorskie zalecają ścisłą kontrolę temperatury i wilgotności w pomieszczeniach, w których obiekty tekstylne są przechowywane.

Długookresowe monitorowanie wywołanych wahaniami parametrów mikroklimatu zmian w strukturze obiektów tekstylnych stanowi trudne wyzwanie. Obiekty te są zbyt niestabilne geometrycznie, aby ich stan zachowania można było skutecznie charakteryzować metodami interferometrycznymi a jednocześnie mają zbyt luźną strukturę i zbyt wysoki współczynnik tłumienia dźwięku, aby analizować postęp ich dezintegracji metodą emisji akustycznej. Natomiast czujniki światłowodowe z wbudowanymi siatkami Bragga wydają się być dobrym rozwiązaniem do monitorowania odkształceń tkanin. Ich konstrukcja jest bardzo prosta: na kilkumilimetrowym odcinku światłowodu wytwarzana jest (techniką naświetlania intensywną wiązką lasera ultrafioletowego) periodyczna zmiana współczynnika załamania światła jego rdzenia. Struktura ta działa jak siatka dyfrakcyjna tzn. odbija fale elektromagnetyczne o dobrze zdefiniowanej długości i szerokości połówkowej mniejszej od 1 nm. Długość odbijanej fali zależy od stałej siatki Bragga. Długość ta jest proporcjonalna do wydłużenia fragmentu światłowodu, w której siatka się znajduje. W efekcie możliwy jest lokalny pomiar zmiany długości światłowodu zespolonego z monitorowanym obiektem. Możliwe jest przy tym wytworzenie na jednym światłowodzie wielu, niezależnych siatek o różnych stałych. Dostarczają one informacji o odkształceniu światłowodu w różnych jego fragmentach. Taki układ czujników może działać w oparciu o jedną diodę superluminescencyjną, której dodatkowo nie trzeba stabilizować, ponieważ wynik pomiaru zależy wyłącznie od zmiany długości odbitej fali (proporcjonalnej do stałej siatki interferencyjnej) a nie od natężenia światła.

Opracowanie skutecznego czujnika odkształcenia bazującego na światłowodowych siatkach Bragga wymagało doboru odpowiednich materiałów (rodzaju rdzenia światłowodu i jego pokrycia), wyboru metody połączenia go z badaną tkaniną oraz właściwej kalibracji systemu pomiarowego.

Ponieważ podstawową cechą opracowywanego czujnika miała być jego długoczasowa stabilność zdecydowano się na użycie jednomodowych światłowodów o rdzeniu kwarcowym, dostosowanych do transmisji światła o długości fali około 1550 nm. Testowano dwa pokrycia światłowodów: akrylowe oraz wykonane z ceramiki organicznej ORMOCER®, która jest hybrydowym materiałem polimerowym syntetyzowanym w procesie zol-żel. Wykonane testy mechaniczne wykazały, że pokrycie

ceramiczne zapewnia lepszy transfer odkształcenia do rdzenia światłowodu oraz w znacznie mniejszym stopniu podlega pełzaniu pod wpływem stałej siły. Porównanie obu czujników pokazano na Rys. 4.

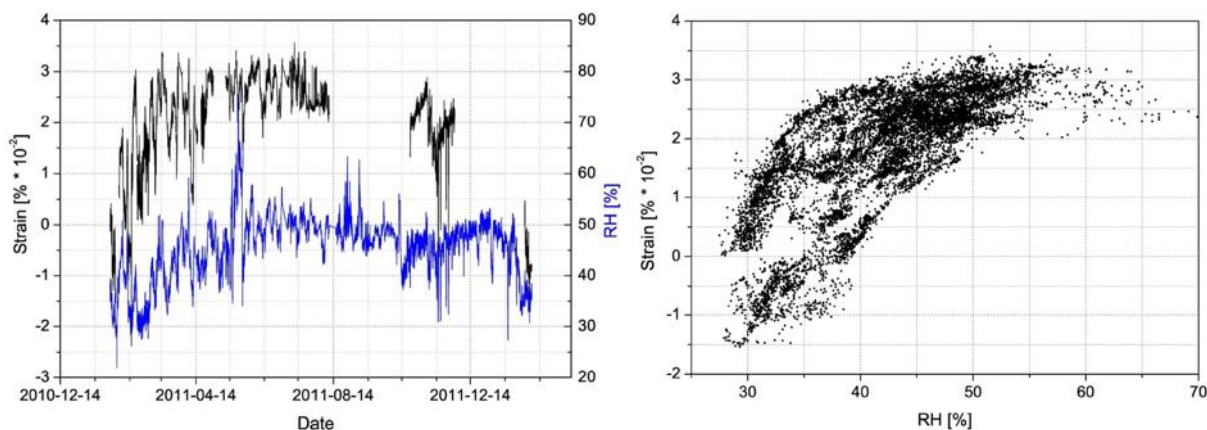


Rys. 4. Porównanie właściwości czujników światłowodowych z pokryciem akrylowym (aFBG) oraz ceramicznym (cFBG). Po lewej stopień przeniesienia odkształcenia z płaszczka do rdzenia, po prawej odpowiedź czujnika na cykliczną zmianę odkształcenia.

Największym problemem pozostawała jednak duża sztywność obu światłowodów (około 31,5 GPa) wynikająca z właściwości kwarcowego rdzenia. Szybko zdałem sobie sprawę, że będzie ona stanowić poważny problem w przypadku monitorowania odkształceń delikatnych tkanin, ponieważ zamontowany czujnik będzie sam istotnie redukował deformacje tkaniny. Wpływ ten można minimalizować poprzez użycie odpowiednio dużych uchwytów mocujących - podczas prowadzonych badań testowałem uchwyty magnetyczne o szerokości od 1 do 10 cm. Trzeba jednak zdawać sobie sprawę, że szerokie uchwyty wprowadzają minimalizują wpływ światłowodu na tkaninę jednak powodują że pomiar odkształcenia przestaje być lokalny.

Mimo tych ograniczeń pokazano, że możliwe jest wykalibrowanie czujnika światłowodowego w funkcji szerokości uchwytów mocujących tak, aby można było przy jego pomocy monitorować odkształcenia tkanin zarówno w warunkach laboratoryjnych jak i w warunkach ekspozycji. Należy przy tym pamiętać, że każdy pomiar wymaga użycia czujników referencyjnych (niezwiązanych z obiektem), które rejestrują wpływ wywołanej zmianą wilgotności i temperatury otoczenia deformacji płaszczka światłowodu na jego rdzeń. Opis konstrukcji czujnika światłowodowego, procedur kalibracyjnych oraz wyników pomiaru deformacji testowych tkanin przedstawiono w pracy H5. Przedstawiono tam również metodę zastosowania opracowanego czujnika do monitorowania naprężeń powstających w płótnie obrazu podczas jego transportu. Aby przeprowadzić taki pomiar światłowód pozbawiony pokrycia zespolono z płótnem podczas przygotowywania podobrazia, a następnie monitorowano odkształcenia podobrazia podczas transportu w różnych odległościach od środka obrazu. Porównanie wyników z pomiarem odkształcenia płótna wykonanym metodą triangulacyjną pokazało, że pomiar przy pomocy czujników światłowodowych jest w tym przypadku bardzo precyzyjny i jednoznaczny.

Opracowane czujniki światłowodowe bardzo pomogły w zrozumieniu wpływu warunków mikroklimatycznych na ryzyko uszkodzenia zabytkowych tkanin. Systematyczne badania nad tym problemem prowadziłem w ramach projektu Mechanizmu Finansowego Europejskiego Obszaru Gospodarczego (EEA). Dla wybranych tkanin historycznych (wełnianych i jedwabnych) oraz współczesnych określono sorpcję pary wodnej, związaną z nią odpowiedź metryczną oraz właściwości mechaniczne na rozciąganie, również podatności na procesy zmęczeniowe wywołane dużą liczbą cykli naprężających. Pomiarzy miały na celu ocenę dwóch potencjalnych procesów niszczących. Pierwszym jest wzrost naprężeń tkanin nieposiadających swobody ruchu podczas ich skurczu pod wpływem zmian wilgotności względnej, drugim proces przecierania włókien w wyniku wywołanego zmianami wilgotności cyklicznego skurczu i rozszerzania tkaniny. Ocena rzeczywistego ryzyka uszkodzenia obiektu zależy przy tym krytycznie od wielkości odkształceń, którym jest on poddawany w czasie cykli naprężających. Ocena wielkości tych bodźców była możliwa właśnie dzięki wynikom rocznego monitorowania czujnikami ze światłowodowymi siatkami Bragga gobelinu eksponowanego w Muzeum Narodowego w Krakowie. Wyniki te pokazały istotnie nieliniową zależność pomiędzy mierzonym odkształceniem a wywołującą je zmianą wilgotności względnej otoczenia (Rys. 5). Całkowite odkształcenie gobelinu nie przekroczyło 0.05% w ciągu roku – ten wynik połączony z wynikami testów zmęczeniowych pozwolił ocenić, że wahania wilgotności nie stwarzają zagrożenia uszkodzeniem fizycznym eksponowanych tkanin i mogą prowadzić do uszkodzeń wyłącznie w przypadku bardzo wrażliwych lub już uszkodzonych obiektów. Wyniki przeprowadzonych badań przedstawiono w pracy H7.



Rys. 5. Wynik monitorowania gobelinu przy użyciu czujnika światłowodowego. Po lewej: mierzone odkształcenie wzdłuż osnowy oraz wilgotność względna w galerii, po prawej: zależność pomiędzy mierzonym odkształceniem względnym a wilgotnością względną powietrza.

Zastosowanie światłowodowych czujników przyczyniło się do rozwiązania istotnego z punktu widzenia ochrony zabytkowych tkanin problemu oceny bezpiecznych warunków ich przechowywania. Otworzyło perspektywę skonstruowania czujnika który przez długi okres czasu, w sposób nieinwazyjny i lokalny może monitorować deformacje tkanin w warunkach ekspozycji. Warunkiem jest rozwiązanie problemu czysto technologicznego,

jakim jest wprowadzenie elastycznych materiałów do konstrukcji rdzenia światłowodowego w których będzie można wytworzyć stabilną siatką Bragga.

Podsumowanie

W ramach zrealizowanych prac badawczych opracowałem systemy monitorowania odkształceń i mikrouszkodzeń w obiektach zabytkowych oraz algorytmy do interpretacji uzyskiwanych przy ich pomocy wyników. Prace nad takimi systemami pomiarowymi wymagają zrozumienia specyficznych problemów związanych z przechowywaniem obiektów i wymagań jakim muszą sprostać systemy detekcji. Sukces zależy w tym przypadku głównie od twórczego wykorzystania istniejącej technologii i adaptacji, bądź opracowania metod pożądaných w dziedzinie konserwacji i ochrony zabytków. Opracowane przeze mnie systemy pomiarowe zostały zastosowane i sprawdzone w ramach kilku programów pomiarowych w muzeach i budynkach zabytkowych. Programy te pozwoliły lepiej zrozumieć i ilościowo opisać wpływ zmiennych warunków środowiskowych na stan zachowania monitorowanych dzieł sztuki. Umożliwiły również określenie dopuszczalnych zakresów zmienności temperatury i wilgotności w otoczeniu obiektów stając się podstawą opracowania nowych strategii kontroli klimatu między innymi w Muzeum X.X. Czartoryskich i Muzeum Narodowym w Krakowie, oraz w Muzeum Wiktorii i Alberta w Londynie.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych

Przebieg pracy naukowej przed uzyskaniem stopnia doktora

Pracę magisterską wykonałem w Zakładzie Optyki Atomowej Uniwersytetu Jagiellońskiego pod kierunkiem prof. dr. hab. Karola Musioła. Wykonany eksperyment polegał na badaniu parametrów argonowego łuku plazmowego przy użyciu dwóch metod diagnostyki plazmy. Pierwsza z nich, emisyjna, polegała na pomiarze natężeń linii widmowych emitowanych ze źródła plazmowego, druga – laserowa - oparta była na nieliniowym zjawisku mieszania czterech fal, zachodzącym w ośrodku pod wpływem silnego pola laserowego. Rezultaty przeprowadzonych eksperymentów potwierdziły poprawność użycia obu metod do badania łuku plazmowego, wykazując jednocześnie na ich ograniczenia, które mogą być podstawą do komplementarnego używania obu metod diagnostyki. Otrzymane wyniki zawarte zostały w pracy magisterskiej *“Spektroskopia atomowa z zastosowaniem mieszania czterech fal”*, były także prezentowane podczas Drugiego Seminarium Polsko-Francuskiego w Krakowie. Prezentowana przeze mnie praca otrzymała nagrodę *“Za jakość eksperymentalnych lub teoretycznych prac badawczych nad plazmą albo jej zastosowaniami wykonanych przez młodego naukowca”* przyznaną przez Francusko-Polski Komitet Fizyki Plazmy.

W latach 2000 – 2003 odbyłem studia doktoranckie w Zakładzie Optyki Atomowej Uniwersytetu Jagiellońskiego. Opiekunem naukowym i promotorem napisanej przeze mnie rozprawy doktorskiej był dr hab. Jarosław Koperski. Celem prowadzonych prac badawczych była charakterystyka potencjałów stanów elektronowych w cząsteczkach van der Waalsowskich (CdKr i Cd₂). Eksperyment polegał na badaniu oddziaływania naddźwiękowej wiązki cząsteczkowej z wiązką przestrajalnego lasera barwnikowego pompowanego laserem Nd:YAG.

Otrzymywane w wyniku pomiarów widma eksperymentalne analizowane były przy użyciu klasycznych, przybliżonych metod (Birge-Sponer, LeRoy Berstein), jak również były źródłem danych do symulacji potencjałów międzyatomowych metodami numerycznymi. Przeprowadzona przeze mnie dwustopniowa procedura obliczeniowa, polegająca na połączeniu metod obu typów, pozwoliła na wyznaczenie krzywej energii potencjalnej o nieregularnym kształcie (stan elektronowy B³¹(5³P₁) w CdKr) na podstawie stosunkowo niewielkiej ilości danych doświadczalnych. Takie dwustopniowe podejście (wykonanie numerycznych obliczeń perturbacyjnych w oparciu o wyznaczoną na podstawie klasycznej analizy krzywą energii potencjalnej badanego stanu cząsteczkowego) dało również bardzo dobre efekty w przypadku badania stanu 0_u⁺(5¹P₁) w Cd₂. Otrzymane wyniki dowiodły, że zastosowana przeze mnie procedura może być traktowana jako integralna metoda analizy elektronowych widm cząsteczkowych. Kolejne projekty badawcze wykonywane w grupie Laserowej Spektroskopii Cząsteczkowej w Zakładzie Optyki Atomowej potwierdziły przydatność perturbacyjnych metod numerycznych jako narzędzia wspierającego klasyczną analizę oscylacyjnych widm cząsteczkowych mierzonych w wiązce naddźwiękowej i zaowocowały szeregiem publikacji naukowych.

Nowym (a jednocześnie trudnym do opisu w ramach istniejącej teorii wiązania van der Waalsowskiego) wynikiem była wyznaczona przeze mnie eksperymentalnie gałąź odpychająca stanu X0_g⁺(5¹S₀) w Cd₂. Wynik ten wykazał niekompletność teoretycznego modelu, opisującego wiązanie stanu podstawowego cząsteczki Cd₂ i stał się istotnym przyczynkiem do badań zmierzających do wyjaśnienia rzeczywistego charakteru oddziaływań van der Waalsowskich. Wyniki prowadzonych prac publikowane były w czasopismach naukowych o zasięgu międzynarodowym i prezentowane podczas międzynarodowych konferencji. Wygłoszony przeze mnie komunikat konferencyjny, prezentujący dwustopniową metodę analizy elektronowych widm cząsteczkowych, został nagrodzony na konferencji w Juracie w 2002 r (The II-nd prize for the “Young Lecturer” of Short Communication on The IV-th Workshop On Atomic Molecular Physics and Optics, Jurata 19-21 Wrzesień 2002). Napisana przeze mnie rozprawa doktorska: *“Spektroskopia cząsteczek van der Waalsowskich w strumieniu naddźwiękowym. Charakterystyka stanów elektronowych w CdKr i Cd₂”* została wyróżniona przez Radę Wydziału Matematyki Fizyki i Informatyki Uniwersytetu Jagiellońskiego.

W latach 2001-2003 byłem wykonawcą projektu badawczego KBN 5 P03B 037 20 zatytułowanego *“Właściwości wiązania van der waalsowskiego w cząsteczkach dwuatomowych w różnych zakresach odległości międzyjądrowych”*. Brałem również udział w realizacji kilku grantów z Centralnej Rezerwy Badań Własnych UJ: Rektorskich (w latach 2000, 2001) i Dziekańskich (w latach 2000 i 2002).

Podczas studiów doktoranckich zaangażowany byłem również w realizację międzynarodowych projektów badawczych, związanych z wykorzystaniem, istniejącego w laboratorium krakowskiej grupy, układu laserowego do celów innych niż spektroskopia cząsteczkowa. Współpraca z Prof. R. Djulgerową (Institute of Solid State Physics, Bulgarian Academy of Sciences) dotyczyła badania dynamiki sygnału optogalwanicznego, indukowanego w neonowej katodzie wnekowej, natomiast projekt realizowany przy współpracy z Dr Pierre-Jean Nacherem (Laboratoire Kastler Brossel, ENS Paris) dotyczył testowania wydajności pompowania optycznego z wymianą metastabilności w ^3He .

Przebieg pracy naukowej po uzyskaniu stopnia doktora

Kolejnym etapem mojej pracy naukowej był dwuletni (lata 2004 i 2005) staż zagraniczny na Uniwersytecie Windsor w Kanadzie, odbyty w grupie Prof. J.W. McConkey'a. Prace prowadzone przez kanadyjską grupę badawczą koncentrowały się na pomiarach przekrojów czynnych na zderzenia atomów i związków chemicznych z elektronami i fotonami. Wyniki takich eksperymentów istotne są zarówno dla badań fundamentalnych w fizyce i chemii, jak również mogą mieć wiele bezpośrednich zastosowań w przemyśle, ochronie środowiska itp. Źródłem wysokiej jakości uzyskiwanych wyników było użycie różnorodnych typów tarcz w procesach rozpraszania oraz równoczesne zastosowania szerokiej gamy technik pomiarowych, między innymi spektroskopii elektronowej, masowej i optycznej, pomiarów czasu przelotu i spektroskopii laserowej.

Eksperyment, nad którym pracowałem, dotyczył pomiarów przekrojów czynnych na zderzenia elektronów z atomami cezu w pułapce magneto-optycznej. Badania cezu mają duże znaczenie teoretyczne, ponieważ jako najcięższy z pierwiastków alkalicznych daje on obecnie najlepsze możliwości obserwacji wpływu efektów związanych z istnieniem atomowej struktury oraz efektów relatywistycznych na wyniki przeprowadzanych eksperymentów. Badania własności atomów cezu są również bardzo istotne z powodu stosowania tego pierwiastka w zegarach atomowych, fizyce zimnej materii i fizyce plazmy.

Zastosowanie pułapki magneto-optycznej do pomiarów przekrojów czynnych na zderzenia atomów z wiązką elektronów było koncepcją nową (pierwszy tego typu eksperyment w pułapce rubidowej wykonano w 1995 r.), posiadającą wiele zalet w porównaniu ze standardowymi eksperymentami wykonywanymi w wiązkach

atomowych. Podstawową zaletą tej techniki jest możliwość pomiaru całkowitego przekroju czynnego na zderzenie, bez konieczności monitorowania gęstości "tarczy". Możliwe jest to dzięki rejestrowaniu wywołanych wiązką elektronową względnych zmian populacji atomów w pułapce, poprzez monitorowanie fluorescencji chmury atomowej. Dodatkową, bardzo istotną korzyścią, wynikającą z zastosowania pułapki magneto- optycznej w pomiarach przekrojów czynnych jest możliwość łatwego wytworzenia i badania atomów w różnych stanach wzbudzonych. Wreszcie zastosowanie rozmaitych procedur i sekwencji pomiarowych daje możliwość oddzielnego badania różnych procesów składających się na całkowity, wywołany elektronami, przekrój czynny.

Rozbudowa istniejącego układu eksperymentalnego, oraz opracowanie nowych metod pomiarowych, zaowocowały wyznaczeniem bezwzględnych wartości przekrojów czynnych na oddziaływanie elektronów i atomów Cs. Najważniejsze z uzyskanych wyników to charakterystyka zależności całkowitego przekroju czynnego na oddziaływanie elektronów i atomów Cs w szerokim zakresie energii elektronów, oraz pierwsze eksperymentalne wyznaczenie przekroju czynnego na jonizację wzbudzonych atomów Cs (w stanie 6^2P), wykonane przy użyciu nowej, oryginalnej metody pomiarowej. Wyniki te zostały opublikowane i zaprezentowane na kilku konferencjach naukowych.

Po powrocie do Polski, przez krótki czas kontynuowałem pracę w Zakładzie Optyki Atomowej w grupie Spektroskopii Cząstek i Informacji Kwantowej na Uniwersytecie Jagiellońskim. Prowadziłem badania eksperymentalne oraz obliczenia kształtów potencjałów elektronowych cząsteczek van der waalsowskich ($CdRG$ (RG =gaz szlachetny) oraz Cd_2) metodą IPA (Inverse Perturbation Method). Jednym z najważniejszych wyników tych prac było określenie, na podstawie rotacyjnej struktury widm fluorescencji $^10u^+(5^1P_1) \leftarrow X^10g^+$, długości wiązania stanu podstawowego cząsteczki Cd_2 co z kolei pozwoliło ilościowo ocenić wielkość domieszki kowalencyjnej do van der waalsowskiego wiązania tego dimeru. Po zmianie miejsca pracy nadal współpracowałem z grupą prof. dr. hab. Jarosława Koperskiego a ta współpraca zaowocowała w latach 2007-2009 powstaniem serii pięciu publikacji dotyczących natury wiązania dimerów kadmu i dwuatomowych cząsteczek kadm – gaz szlachetny.

W roku 2006 nawiązałem współpracę z prof. dr. hab. Romanem Kozłowskim prowadzącym badania nad ochroną obiektów zabytkowych w Instytucie Katalizy i Fizykochemii Powierzchni im. Jerzego Habera PAN (IKiFP PAN) w Krakowie. W tym samym roku otrzymałem grant Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego dla młodych naukowców (POL-POSTDOC II), który stał się podstawą mojego zatrudnienia w IKiFP PAN. Od tego momentu rozpocząłem badania nad wpływem parametrów środowiskowych na proces narastania uszkodzeń obiektów zabytkowych. Prowadzone przeze mnie prace badawcze koncentrowały się wokół analizy zagrożeń związanych z eksponowaniem polichromowanego drewna – jednej z najbardziej wrażliwych kategorii obiektów zabytkowych. Podstawowym problemem badawczym, którego rozwiązanie było i nadal jest głównym celem moich badań naukowych jest opracowanie

nieinwazyjnych metod śledzenia rozwoju mikrouszkodzeń obiektów zabytkowych. Ponieważ zarówno obiekty zabytkowe jak i procesy ich niszczenia są bardzo różnorodne zdecydowałem się na zastosowanie wielu uzupełniających się metod ich charakteryzowania.

Do analizy uszkodzeń warstw powierzchniowych zastosowałem metody aktywnej termografii oraz interferometrii plamkowej, która zastąpiła stosowaną wcześniej w grupie prof. Kozłowskiego metodę wibrometrii laserowej. Interferometria plamkowa okazała się metodą niezwykle czułą i skuteczną w mapowaniu pęknięć i odspojień warstw dekoracyjnych obiektów zabytkowych. Systematyczne prace nad przystosowaniem jej do pracy w warunkach muzealnych zaowocowały skonstruowaniem przenośnego układu pomiarowego oraz opracowaniem metodologii badawczej pozwalającej na wykonywanie precyzyjnych pomiarów poza laboratorium - w warunkach ekspozycji muzealnej oraz we wnętrzach budynków zabytkowych. Najważniejszym wynikiem prowadzonych badań jest opracowanie opartej na wzbudzeniu akustycznych, w pełni automatycznej, ilościowej metody charakteryzowania stanu zachowania powierzchni obiektu z sub-mikrometryczną dokładnością. Wyniki uzyskane tą metodą były podstawą ustalenia strategii kontroli parametrów środowiska w Pałacu Biskupa Erazama Ciołka (oddziale Muzeum Narodowego w Krakowie) oraz w zabytkowym kościele w Hedalen w Norwegii. Opracowywane przeze mnie techniki śledzenia narastania mikrouszkodzeń obiektów znalazły również zastosowanie w Muzeum Wiktorii i Alberta w Londynie oraz w Muzeum Narodowym w Warszawie. W rozwiązaniu problemu zastosowania interferometrii plamkowej do badania powierzchni obiektów zabytkowych kluczowa była moja współpraca z NIKU (Norweskim Instytutem Badań nad Dziedzictwem Kultury) w ramach polsko - norweskiego grantu badawczego oraz mój aktywny udział w działaniach akcji COST IE0601 (Nauka od Drewnie w Konserwacji Dziedzictwa Kulturowego).

Równolegle do prowadzonych badań nad zastosowaniem metod optycznych zdecydowałem się rozwijać, używaną już wcześniej w grupie badawczej prof. Romana Kozłowskiego, metodę Emisji Akustycznej (EA) służącą do rejestrowania sygnałów dźwiękowych powstających podczas mikropęknięcia struktury materiałów. Metoda ta jest komplementarna do interferometrii plamkowej - dostarcza informacji o uszkodzeniach powstających nie tylko na powierzchni ale również w objętości materiału. Ponadto, metoda pozwala „śledzić” rozwój uszkodzenia w czasie rzeczywistym i dzięki temu umożliwia ustalenie korelacji pomiędzy bodźcami środowiskowymi oraz powstającymi w ich wyniku uszkodzeniami struktury obiektu. Współpraca z grupami badawczymi z Uniwersytetu w Stuttgarcie oraz Bolonii w ramach projektu europejskiego „SMooHS” a także konsultacje i wymiana doświadczeń w ramach akcji COST FP0802 (Eksperymentalne i Komputerowe Techniki Mikro-charakterystyki w Mechanice Drewna) pomogły mi w określeniu wymagań wobec tej techniki pomiarowej podczas jej stosowania w obiektach zabytkowych. Wykonane pomiary kalibracyjne (dotyczące zarówno energii mierzonych sygnałów jak również ich charakterystyki częstotliwościowej w różnych materiałach) umożliwiły mi opracowanie ilościowej

metody oceny postępu niszczenia obiektów zabytkowych a zastosowanie metody antykorelacyjnej dało możliwość przeprowadzenia pomiarów w warunkach o dużym szumie środowiskowym.

Trzecim, ważnym dla mnie tematem badawczym jest monitorowanie zmian zachodzących w eksponowanych zabytkowych tkaninach i obrazach na płótnie. Ani metody interferometryczne, ani akustyczne nie mogą być skutecznie stosowane w analizie narastania uszkodzeń materiałów tekstylnych. Aby precyzyjnie śledzić zmiany metryczne historycznych tkanin i podobrazy, wraz z naukowcami z Instytutu Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego, opracowałem metodę pomiaru odkształceń materiałów przy pomocy światłowodowych siatek Bragga. Układ pomiarowy został przetestowany na tkaninach eksponowanych w Muzeum Narodowym w Krakowie oraz na imitacji obrazu podczas jego ekspozycji w galerii oraz podczas transportu. Opracowana technika pomiarowa przyczyniła się do zrozumienia, które czynniki są głównie odpowiedzialne za powstawanie uszkodzeń tkanin podczas ich ekspozycji w muzeum i daje możliwość szerokiego zastosowania w ciągłym monitorowaniu odkształceń obiektów – nie tylko tkanin.

Oprócz współpracy z krajowymi i międzynarodowymi jednostkami naukowymi specjalizującymi się w dziedzinie nieniszczących badań obiektów oraz analizy właściwości fizycznych materiałów bardzo ważna jest dla mnie współpraca z instytucjami zajmującymi się ochroną zbiorów dziedzictwa kulturowego. Niemal od początku mojej pracy w IKiFP PAN zaangażowany byłem w praktyczne działania Muzeum Narodowego w Krakowie takie jak np. określenie zagrożeń podczas transportu kolekcji obrazów z Muzeum w Sukiennicach na czas odbywającego się tam remontu czy określenie ryzyka związanego z przechowywaniem obrazów wzmocnianych konstrukcjami parkietowymi w nieklimatyzowanych salach wystawowych. Koordynowałem również projekt naukowy Muzeum, którego celem było określenie strategii przechowywania obiektów wrażliwych na niestabilne warunki klimatyczne. Współpraca między innymi z Akademią Sztuk Pięknych w Krakowie, Muzeum Zamkowym w Malborku, Muzeum Narodowym w Warszawie oraz Muzeum Wiktorii i Alberta w Londynie pozwoliła mi na praktyczne zastosowanie rozwijanych metod pomiarowych i wdrażanie opracowanych zaleceń konserwatorskich.

Podczas całego okresu zatrudnienia w IKiFP PAN brałem aktywny udział w działalności dydaktycznej i popularyzatorskiej Instytutu. Od roku 2010 pełnię funkcję zastępcy Dyrektora Instytutu ds. Ogólnych a w roku 2013 zostałem kierownikiem grupy badawczej „Ochrona Dziedzictwa Kultury”.

Kraków 17.02. 2015


Michał Łukomski