

Akademia Górniczo-Hutnicza
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej



Interferometria plamkowa i inne metody optyczne w analizie uszkodzeń obiektów zabytkowych

Łukasz Lasyk

Praca doktorska
wykonana pod kierunkiem doc. dr. hab. Romana Kozłowskiego
Kraków 2010

Pragnę wyrazić moje podziękowania

Współpracownikom z grupy badawczej Ochrona Dziedzictwa Kultury z Instytutu Katalizy i Fizykochemii Powierzchni PAN gdzie zrealizowałem tę pracę,

doc. dr. hab. Romanowi Kozłowskiemu,

mojemu promotorowi za ciekawy temat pracy doktorskiej, za pomoc w jej redakcji oraz za wiele inspirujących dyskusji,

dr. Łukaszowi Brataszowi,

za zaufanie od samego początku i wprowadzenie mnie w temat badań nad ochroną dziedzictwa kultury,

dr. Michałowi Łukomskiemu,

za cierpliwość, cierpliwość i jeszcze raz za cierpliwość mi okazaną, oraz za pomoc przy konstrukcji układu DSPI,

dr. Sławomirowi Jakiele,

za pokazanie, że elektronika nie musi być monotonna, a może być ciekawa,

Tone Marie Olstad z Norweskiego Instytutu Badań nad Dziedzictwem Kultury NIKU w Oslo

za współpracę w czasie pomiarów w kościele w Hedalen,

oraz

dr. Marionowi Mecklenburgowi ze Smithsonian Institution w Waszyngtonie i
dr. Stefanowi Michalskiemu z Kanadyjskiego Instytutu Konserwacji w Ottawie,

za liczne rady, których udzielili mi podczas odbytych spotkań.

Dla moich wspaniałych Rodziców,
y para mi novia maravillosa Ana Maria

Autor

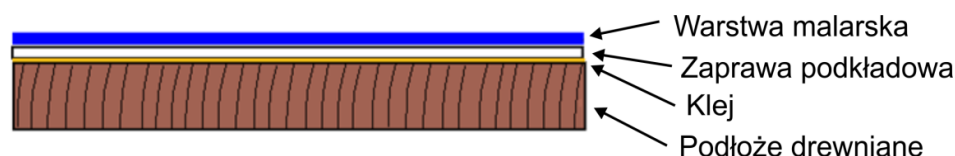
Spis treści

1. STRUKTURA I WŁAŚCIWOŚCI DREWNA POLICHROMOWANEGO	6
1.1. PODŁOŻE DREWNIANE	6
1.1.1. WODA W STRUKTURZE DREWNA	8
1.1.2. ZMIANY WYMIAROWE DREWNA	11
1.1.3. TRANSPORT PARY WODNEJ W DREWNI.....	13
1.1.4. WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE.....	16
1.1.5. RELAKSACJA NAPRĘŻEŃ W DREWNI.....	18
1.2. ZAPRAWA.....	19
1.2.1. ZMIANY WYMIAROWE ZAPRAWY KLEJOWEJ	21
1.2.2. WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE ZAPRAWY KLEJOWEJ.....	25
1.2.3. ADHEZJA DO PODŁOŻA DREWNIANEGO.....	27
2. MECHANIZM POWSTAWANIA USZKODZEŃ DREWNIANYCH OBIEKTÓW POLICHROMOWANYCH POD WPŁYWEM ZMIAN PARAMETRÓW MIKROKLIMATYCZNYCH OTOCZENIA	29
2.1. MECHANIZM POWSTAWANIA USZKODZEŃ W DREWNI	29
2.2. MECHANIZM POWSTAWANIA USZKODZEŃ W WARSTWIE ZAPRAWY	33
2.3. OKREŚLENIE DOPUSZCZALNYCH WAHAŃ PARAMETRÓW MIKROKLIMATU DLA DREWNA POLICHROMOWANEGO NA DRODZE ANALIZY „MIKROKLIMATU HISTORYCZNEGO”	37
3. BEZKONTAKTOWE METODY ANALIZY POWIERZCHNI DZIEŁ SZTUKI.....	40
3.1. ANALIZA KSZTAŁTU POWIERZCHNI	40
3.1.1. TECHNIKI FOTOGRAMETRYCZNE	40
3.1.2. TRÓJWYMIAROWE LASEROWE SKANOWANIE POWIERZCHNI	41
3.1.3. TOPOGRAFIA MORY	44
3.2. ANALIZA DEFECTÓW POWIERZCHNI	45
3.2.1. INTERFEROMETRIA HOLOGRAFICZNA	45
3.2.2. INTERFEROMETRIA PLAMKOWA.....	46
3.2.3. WIBROMETRIA LASEROWA	47
3.2.4. TERMOGRAFIA.....	48
4. CEL PRACY.....	50
5. BADANE MATERIAŁY	52

5.1.	DREWNO LIPY	52
5.2.	ZAPRAWA	53
6.	ZASTOSOWANE METODY DOŚWIADCZALNE.....	55
6.1.	PROFILOMETR LASEROWY	55
6.2.	BADANIA PRZY POMOCY WIBROMETRU LASEROWEGO	58
6.3.	INTERFEROMETR PLAMKOWY	60
6.3.1.	POMIAR METODĄ CYFROWEJ KORELACJI OBRAZU (DIC)	61
6.3.2.	OPIS UKŁADU DOŚWIADCZALNEGO DSPI	63
6.3.3.	POMIAR DSPI PRZY UŻYCIU WZBUDZENIA TERMICZNEGO.....	66
6.3.4.	POMIAR DSPI ZE WZBUDZENIEM POWIERZCHNI FALA DŹWIĘKOWĄ	67
6.3.5.	ANALIZA WYNIKÓW	70
7.	WYNIKI I DYSKUSJA	78
7.1.	WYZNACZENIE KRZYWEJ ZMĘCZENIOWEJ WARSTWY DEKORACYJNEJ NA DREWNIÉ	78
7.1.1.	SPRAWDZENIE POPRAWNOŚCI PRZYJĘTEJ METODYKI IMITACJI ODPOWIEDZI WILGOTNOŚCIOWEJ DREWNA PRZEZ ROZCIĄGANIE MECHANICZNE	79
7.1.2.	CYKLICZNE ODKSZTAŁCENIA PRÓBEK IMITUJĄCYCH ZABYTKOWE POLICHROMIE	84
7.1.3.	PRZELICZANIE KRYTYCZNYCH WARTOŚCI ODKSZTAŁCEŃ NA DOPUSZCZALNE ZMIANY WILGOTNOŚCI WZGLĘDNEJ	90
7.2.	POMIARY USZKODZEŃ ZABYTKOWYCH OBIEKTÓW	92
7.2.1.	BADANIA LABORATORYJNE	92
7.2.2.	BADANIA <i>IN SITU</i>	95
7.3.	WNIOSKI KOŃCOWE	104
8.	LITERATURA	107

1. Struktura i właściwości drewna polichromowanego

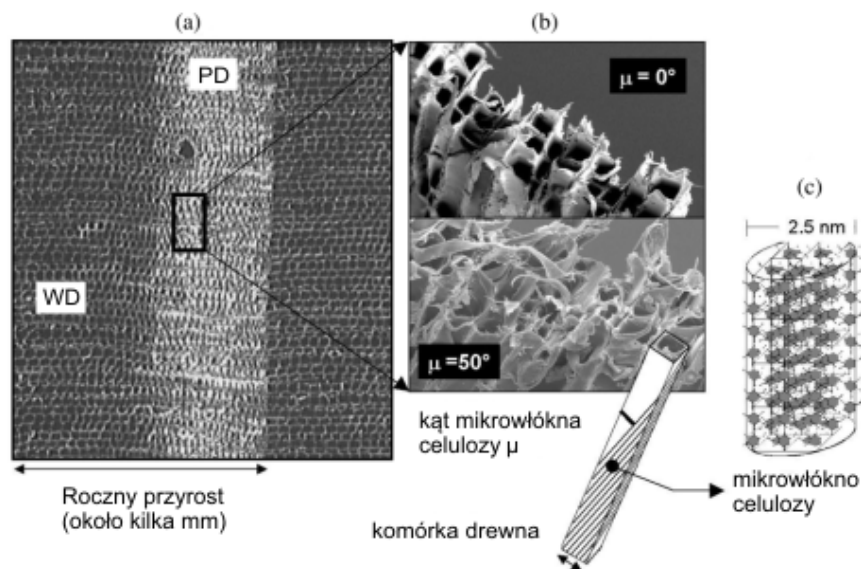
Drewniane obiekty polichromowane stanowią złożoną wielowarstwową strukturę, która składa się z drewna, kleju zwierzęcego, zaprawy i warstwy malarskiej, materiałów wrażliwych na zmiany wilgotności względnej oraz temperatury w ich otoczeniu (rys. 1). Każdy z tych składników odpowiada w inny sposób na fluktuacje parametrów mikroklimatycznych. Szczegółowe badania układu pokazały, że struktura, właściwości mechaniczne i odpowiedź wymiarowa dwóch materiałów - drewna i malarskiej zaprawy podkładowej - są kluczowe dla zrozumienia mechanizmu powstawania uszkodzeń fizycznych, takich jak deformacja i pękanie drewna, oraz odspojenia i spękania warstwy dekoracyjnej. Właściwości te zostaną omówione w części 1 i 2 niniejszego rozdziału.



Rys. 1. Przekrój obrazu malowanego na desce.

1.1. Podłoże drewniane

Celuloza jest zasadniczym związkiem chemicznym budującym strukturę drewna. Molekuły celulozy są łańcuchowymi policukrami, przy czym podstawowa, powtarzająca się jednostka molekularna składa się z dwóch pierścieni cukrowych. Celuloza występuje w naturze w komórkach roślinnych w cienkich mikrowłóknach w postaci nanokryształów o strukturze I. Heksagonalna oś tej struktury krystalicznej jest zgodna zazwyczaj z osią mikrowłókna. Nanokryształ celulozy występujący w drewnie świerka jest pokazany na rys. 2c. Jego grubość wynosi 2,5 nm. Grubość ta zależy od gatunku rośliny.



Rys. 2. Struktura drewna świerkowego [1]. Dokładny opis rysunku znajduje się w tekście.

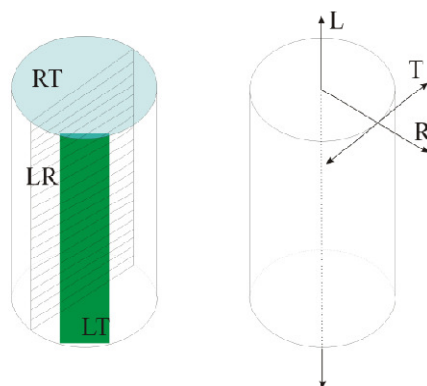
W drewnie, mikrowłókna celulozowe tworzące dominującą, najgrubszą warstwę ściany komórkowej S_2 są ułożone spiralnie (rys. 2b), a kąt μ nachylenia mikrowłókna w stosunku do osi komórki jest ważnym parametrem decydującym o jej właściwościach mechanicznych oraz skurczu w czasie wysychania. Inne orientacje mikrowłókien występują w cienkich warstwach ściany komórkowej S_1 i S_3 . Rys. 2b pokazuje zdjęcia mikroskopowe przełamów w dwóch strukturach drewna zawierających komórki o różnych kątach nachylenia mikrowłókien. Struktura drewna powstaje poprzez aglomerację komórek, jak pokazano na rys. 2a, przy czym grubość ścian komórkowych jest większa dla drewna późnego (letniego - PD) niż drewna wczesnego (wiosennego - WD). Poznanie dokładnej struktury drewna stało się możliwe dzięki zastosowaniu w ostatnich latach nowoczesnych technik analizy strukturalnej, takich jak skaningowa mikrodyfrakcja rentgenowska przy zastosowaniu promieniowania synchrotronowego [2], nisko- i szerokątowego rozpraszania promieniowania rentgenowskiego, czy różnych wysokorozdzielczych technik mikroskopowych [3,4].

W pniu drewna można wyróżnić trzy główne kierunki (rys. 3):

- promieniowy (R) – prostopadły do osi pnia,
- styczny (T) - styczny do pierścieni corocznego przyrostu,
- wzdłużny (L) - równoległy do osi pnia.

Z kolei te trzy kierunki wyróżniają trzy podstawowe przekroje drewna:

- dwa wzdłużne: styczny (LT) i promieniowy (LR),
- jeden poprzeczny (RT).



Rys. 3. Kierunki anatomiczne w drewnie.

1.1.1. Woda w strukturze drewna

Celuloza ma właściwości higroskopijne tj. ma zdolność pobierania pary wodnej z otoczenia w czasie wzrostu wilgotności względnej (zjawisko sorpcji) oraz oddawania pary wodnej do otoczenia w czasie spadku tego parametru (zjawisko desorpcji). Zawartość wody w drewnie znajdującym się w równowadze z otoczeniem o stałej temperaturze i wilgotności względnej osiąga po pewnym czasie wartość stałą zwaną równowagową zawartością wody (EMC z ang. *equilibrium moisture content*). Zależność pomiędzy wilgotnością względną a równowagową zawartością wody w stałej temperaturze nosi nazwę izotermy sorpcji lub desorpcji pary wodnej.

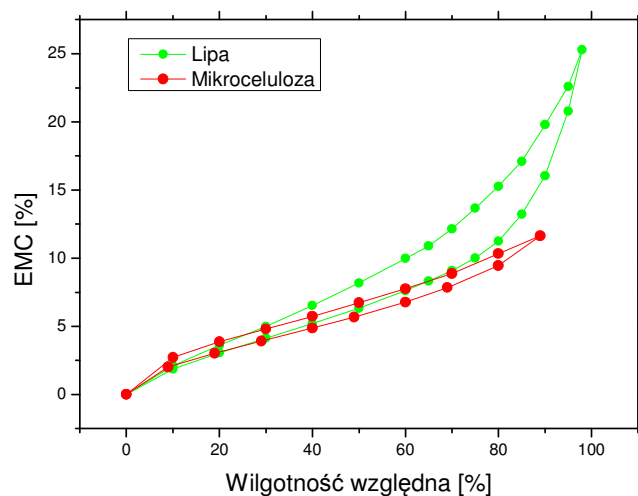
Najbardziej pełny obraz możliwych stanów wody występującej w strukturze drewna uzyskuje się analizując desorpcję wody od stanu całkowitego nasycenia tej struktury wodą, co można osiągnąć wprowadzając wodę do drewna po ciśnieniu [5,6]. Otrzymana krzywa desorpcji nosi nazwę granicznej krzywej desorpcji i pokazuje maksymalne zawartości wody w drewnie dla danej wielkości wilgotności względnej w czasie desorpcji. Dwa rodzaje wody są obecne w strukturze drewna nasyconej wodą: ‘woda związana’ zaadsorbowana na powierzchni struktur budujących ścianki komórkowe i ‘woda ciekła lub naczyniowa’ znajdująca się w kapilarach struktury drewna. Badania metodą NMR pokazały, że wodę ciekłą można dodatkowo podzielić

na dwa rodzaje w zależności od rozmiarów i objętości elementów naczyniowych ([5] i literatura w niej cytowana). Przy zmniejszaniu wilgotności względnej kapilary ulegają stopniowemu opróżnieniu aż do osiągnięcia punktu nasycenia włókien (FSP z ang. *fiber saturation point*). Wielkość tę definiuje się jako równowagową zawartość wody, przy której ściany komórkowe są nasycone wodą związaną, a struktura jest wolna od wody ciekłej w świetle komórek. Jak pokazały badania, desorpcja wody związanej może następować dla całkowitych zawartości wody znacząco wyższych od FSP, ze względu na histerezę w oddawaniu wody ciekłej z wąskich kapilar i kanalików w drewnie. Uznaje się jednak, że całkowite usunięcie wody ciekłej ze struktury drewna następuje dla wilgotności względnych poniżej 60%.

Po całkowitym osuszeniu drewna, na przykład w warunkach próżni lub podwyższonej temperatury, zwiększanie wilgotności względnej prowadzi do najpierw monowarstwowej, później wielowarstwowej adsorpcji fizycznej cząsteczek wody. Grubość warstwy zaadsorbowanej stopniowo rośnie w miarę wzrostu wilgotności względnej, aż do ciśnienia nasyconej pary wodnej. Dla zjawiska sorpcji obserwuje się efekt histerezy, tj. wyższą zawartość wody w trakcie desorpcji niż adsorpcji dla danej wartości wilgotności względnej. Histereza sorpcji pary wodnej na drewnie rozciąga się do najniższych ciśnień i pełne usunięcie zaadsorbowanej wody jest możliwe dopiero po odgazowaniu drewna w próżni. Zjawisko niskociśnieniowej histerezy gazów występuje powszechnie w niesztynnych materiałach porowatych, które pęcznią w trakcie adsorpcji [7]. Materiałem takim jest również drewno. Można stąd przyjąć, że histerezie w oddawaniu wody z wąskich kapilar i kanalików w drewnie, opisaną powyżej, towarzyszy histereza sprężysta, to znaczy nie w pełni odwracalne odkształcenie drewna w trakcie sorpcji (pęcznienia) i desorpcji (skurczu).

Rys. 4 przedstawia izotermy adsorpcji i desorpcji dla drewna lipowego. Na tym samym rysunku zamieszczono dane sorpcyjne dla mikrokrystalicznej celulozy (HCC) przyjętej przez Biuro Wzorców Komisji Europejskiej jako materiał wzorcowy 302 posiadający dobrze określone i odtwarzalne właściwości sorpcji pary wodnej [8]. W czasie preparatyki MCC, otrzymuje się czysty proszek celulozy zawierający wyłącznie agregaty mikrowłókien zbudowanych z nanokryształów celulozy o strukturze I [9]. Pełna analiza obydwu wykresów pokazuje, że dla zakresu niskich i średnich wartości wilgotności względnej procesy sorpcyjne całkowicie określa celuloza. Jedynie dla wysokich wartości wilgotności względnych obserwuje się wzrost ilości wody

pojawiającej się zapewne w kapilarach struktury komórek drewna, która daje znaczny efekt histerezy przy desorpcji.



Rys. 4. Izotermy adsorpcji i desorpcji pary wodnej dla drewna lipowego i mikrokrystalicznej celulozy (pomiar własne autora).

Zależność pomiędzy ilością wody związanej w ścianach komórkowych w stałej temperaturze, a wilgotnością względną (izotermę adsorpcyjną) można opisać sigmoidalną izotermą typu II według klasyfikacji Międzynarodowej Unii Chemii Czystej i Stosowanej IUPAC z 1985 roku [7]. W ostatnich latach rosnącą popularność zdobywa opis izotermę adsorpcyjnej przy pomocy równania Guggenheima-Andersena-de Boera (GAB) ze względu na jego zdolność opisu zależności dla niemal całego zakresu wilgotności względnej i klarowny fizyczny sens jego parametrów, takich jak monowarstwowe pokrycie powierzchni i stała energetyczna związana z molowym ciepłem adsorpcji [10]:

$$v\left(\frac{p}{p_0}\right) = \frac{v_m c k \frac{p}{p_0}}{\left(1 - k \frac{p}{p_0}\right) \left(1 + (c - 1) k \frac{p}{p_0}\right)} \quad (1)$$

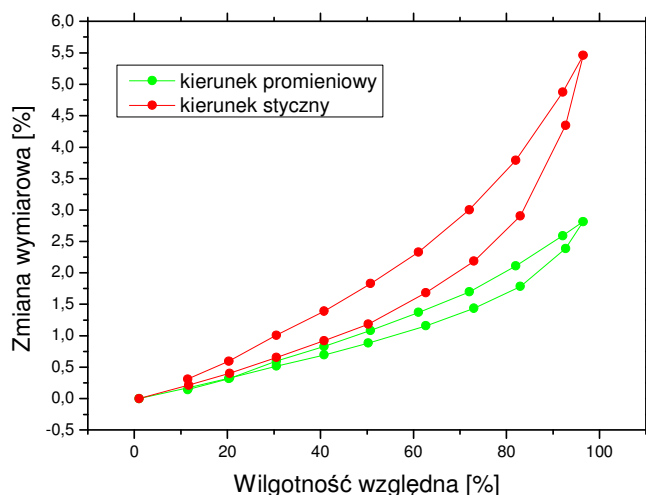
gdzie p jest cząstkowym ciśnieniem pary wodnej, a p_0 cząstkowym ciśnieniem nasyconej pary wodnej (wilgotność względna odpowiada stosunkowi $\frac{p}{p_0}$ wyrażonemu w procentach), v -objętością wody zaadsorbowaną przez jednostkową masę drewna przy

określonej wartości stosunku $\frac{p}{p_0}$, v_m – objętością monowarstwy, c – stałą energetyczną związaną z różnicą w entalpii swobodnej cząsteczek wody zaadsorbowanych w monowarstwie a w wyższych warstwach, oraz k – parametrem związanym z kolei z różnicą w entalpii swobodnej cząsteczek wody zaadsorbowanych w wyższych warstwach, a woda ciekłą.

Wykazano ponadto, że równanie GAB jest równoważne z równaniem Hailwooda i Horrobina (H-H) szeroko stosowanym w nauce o drewnie, które jednak nie ma jasnego sensu fizycznego [11].

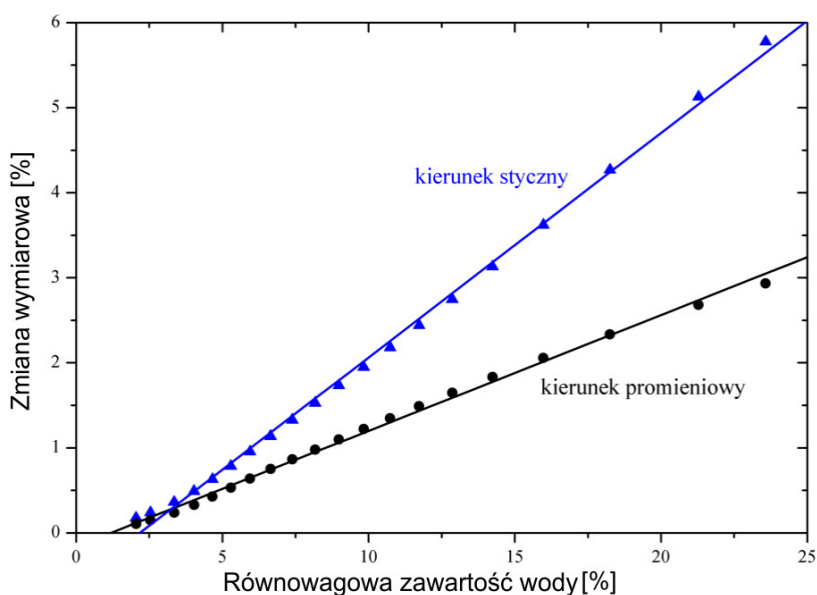
1.1.2. Zmiany wymiarowe drewna

Tak jak napisano powyżej, w odpowiedzi na zmiany zawartości wody w drewnie, zmieniają się jego wymiary. Analiza zmian wymiarowych drewna w czasie desorpcji wody od stanu całkowitego nasycenia wskazuje na brak skurczu, kiedy z materiału jest usuwana tylko woda ciekła wypełniająca światła komórek [6]. Dopiero poniżej punktu nasycenia włókien, kiedy zaczyna desorbować woda związana w ściankach komórkowych, obserwuje się efekt kurczenia się drewna. Podobnie pęcznienie drewna w trakcie sorpcji pary wodnej przebiega jedynie do punktu nasycenia włókien drewna FSP.



Rys. 5. Izotermi pęcznienia i skurczu dla kierunków stycznego i promieniowego drewna lipowego.

Zależność pomiędzy zmianami wymiarowymi drewna a wilgotnością względną zmierzona w stałej temperaturze nosi nazwę izotermy pęcznienia (lub skurczu). Izotermy takie dla drewna lipowego, wyznaczone przez autora odrębnie dla dwóch różnych kierunków anatomicznych, przedstawia rys. 5. Dogodnym sposobem opisu pęcznienia i skurczu drewna jest wykreślenie zmiany wymiarowej w funkcji równowagowej zawartości wody (EMC).



Rys. 6. Zmiana wymiarowa w funkcji równowagowej zawartości wody. Zależność dla drewna lipowego dla kierunków stycznego i promieniowego.

Rys. 6 przedstawia taką zależność dla drewna lipowego dla kierunków stycznego i promieniowego. Zależność ma przebieg liniowy dla szerokiego zakresu pomiędzy 5 – 25% EMC. Nachylenie części liniowej odpowiada współczynnikowi wilgotnościowej zmiany wymiarowej, wynoszącemu dla analizowanego drewna 0,28 w kierunku stycznym i 0,13 w kierunku promieniowym.

Silna anizotropia budowy drewna powoduje różnice w skurczu lub pęcznieniu w zależności od kierunków anatomicznych. Całkowite zmiany wymiarowe od stanu nasycenia wodą do stanu suchego w kierunkach anatomicznych wynoszą odpowiednio [12] :

- wzdłuż włókien 0,8 - 1 %
- w kierunku promieniowym 3 - 6 %
- w kierunku stycznym 5 - 13 %

Współczesne modele biomechaniczne drewna pozwalają wyprowadzić zależność zmiany wymiarowej od kierunków anatomicznych z wielowarstwowej struktury ścian komórkowych, szczególnie z wartości kąta nachylenia mikrowłókien [13,14]. Modele te opierają się analizie wewnętrznych naprężeń powstających w trakcie skurczu drewna podczas schnięcia i odpowiedzi struktury na te naprężenia, która zależy od silnie anizotropowych właściwości mechanicznych komórek.

Zmiany wymiarowe drewna we wszystkich kierunkach anatomicznych zachodzą również w odpowiedzi na zmiany temperatury otoczenia. Drewno wykazuje bardzo niewielki współczynnik rozszerzalności cieplnej, który wynosi $10^{-5} - 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$ w kierunkach prostopadłych do kierunku włókien [12]. Współczynnik ten wzdłuż kierunku włókien jest 5 – 10 razy mniejszy. Współczynniki rozszerzalności cieplnej w poprzek włókien jest liniowo zależny od gęstości. Rozszerzalność cieplna prowadzi w normalnych warunkach przechowywania zabytkowych obiektów drewnianych do zanedbywalnie małych zmian wymiarowych w porównaniu ze skurczem oraz pęcznieniem powodowanymi zjawiskami desorpcji lub sorpcji pary wodnej.

1.1.3. Transport pary wodnej w drewnie

Znajomość izoterm sorpcji lub desorpcji pary oraz różnych stanów wody w strukturze drewna nie wystarcza do opisu oddziaływania wody z tym materiałem, ponieważ dotyczy wyłącznie stanów równowagi. Tymczasem w rzeczywistych warunkach w otoczeniu zabytkowych obiektów drewnianych zachodzą bezustanne zmiany temperatury i wilgotności względnej o różnych okresach od cyklicznych zmian rocznych wynikających z następstwa pory ciepłej i zimnej, poprzez wahania średniokresowe wywoływane zmianami warunków atmosferycznych na zewnątrz, do fluktuacji krótkookresowych związanych z dobowym cyklem nasłonecznienia lub użytkowaniem budynku, na przykład krótkotrwałym ogrzaniem wnętrza. Drewno bezustannie dostosowuje się do zmian parametrów klimatu w swoim otoczeniu na drodze adsorpcji i desorpcji pary wodnej. Ograniczona szybkość dyfuzji wody, rozumianej jako strumień masy cząsteczek wody wynikający z gradientu stężenia, prowadzi do powstawania złożonych profili zawartości wody w przekroju elementów drewnianych, w konsekwencji do zróżnicowanej zmiany wymiarowej poszczególnych stref drewna i naprężeń. Poznanie procesów transportu pary wodnej w drewnie jest

zatem niezbędne do zrozumienia i oceny zagrożenia obiektów drewnianych deformacją lub uszkodzeniem fizycznym. W niniejszym zwięzłym omówieniu informacji literaturowych ograniczono się do procesów transportu wody w drewnie poniżej punktu nasycenia włókien FSP, jakie jedynie występują w obiektach drewnianych przechowywanych we wnętrzu budynków. Natomiast pominięto analizę transportu kapilarnego wody ciekłej o kluczowym znaczeniu dla konstrukcji i elementów drewnianych eksponowanych na infiltrację wody deszczowej [15].

Jednym z najważniejszych parametrów opisujących transport wody w drewnie poniżej FSP jest współczynnik dyfuzji wody związanej. Dyfuzja ta składa się z dwóch strumieni masy: dyfuzji pary wodnej w pustych przestrzeniach struktury oraz dyfuzji wody związanej poprzez ściany komórkowe. W zabytkowych obiektach drewnianych najczęściej można ograniczyć się do dyfuzji przebiegającej w jednym, dominującym kierunku. Kierunkiem takim w drewnianej rzeźbie jest kierunek promieniowy, a w obrazie na desce kierunek prostopadły do płaszczyzny obrazu. Proces dyfuzji wody związanej wzdłuż jednego kierunku w warunkach nieustalonych w czasie przybliża się liniowym cząstkowym równaniem różniczkowym drugiego stopnia, opisującym drugie prawo Ficka:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad (2)$$

gdzie c jest zawartością wody (stężeniem), t czasem, x współrzędną przestrzenną wzdłuż kierunku transportu wody oraz D jest współczynnikiem dyfuzji zależnym od zawartości wilgoci. Współczynnik ten można wyznaczyć eksperymentalnie na drodze pomiaru kinetyki procesu sorpcji przebiegającego w warunkach nieustalonych w czasie. Poprawne modelowanie tego procesu wymaga uwzględnienia oporu transportu w warstwie przyściennej między drewnem a otoczeniem oraz zależności współczynnika dyfuzji wody związanej od zawartości wody. Badania Oleka i Weresa [16] pokazały, że zależność współczynnika dyfuzji od zawartości wody najlepiej opisuje równanie:

$$D = D_0 e^{-ac(t)+bc^2(t)} \quad (3)$$

gdzie D_0 , a i b są współczynnikami uściślonymi w procedurze modelowania. Z kolei opór transportu w warstwie przyściennej opisuje równanie:

$$\left(-D \frac{\partial c}{\partial x}\right) = \sigma(c(x, t) - c_{\infty}) \quad (4)$$

gdzie σ jest współczynnikiem emisji powierzchniowej, a c_{∞} końcową, równowagową zawartością wody na powierzchni.

Należy zaznaczyć, że literatura przedmiotu odnotowuje różnice pomiędzy danymi eksperymentalnymi a wynikami modelowania procesu sorpcji przy zastosowaniu drugiego prawa Ficka i współczynników emisji powierzchniowej i dyfuzji. Odchylenia te przypisuje się uproszczonemu opisowi kinetyki sorpcji pary wodnej przez to prawo, który nie uwzględnia subtelnych czynników energetycznych i strukturalnych mających wpływ, oprócz kluczowego gradientu stężeń, na przebieg zjawisk sorpcji i desorpcji ([17] i literatura w niej cytowana).

Współczynniki dyfuzji i emisji powierzchniowej wyznaczano również w oparciu o pomiar eksperymentalny profili zawartości wody w próbce drewna, w której jest utrzymywany gradient zawartości wilgoci, przy zastosowaniu obrazowania neutronowego [18] lub metodą wagową przez suszenie próbek pobranych z przekroju drewna [19].

Odrębnym podejściem eksperymentalnym jest oznaczenie szybkości przenikania pary wodnej przez drewno w warunkach ustalonych w czasie. Pomiary te są opisane w normach jako metoda wagowa (miscozowa) [20,21]. Odpowiednio wyciętą próbkę drewna o określonej grubości mocuje się szczelnie do naczynia wypełnionego roztworem nasyconym soli, zapewniającym stałą wilgotność względną. Naczynie umieszcza się w eksykatorze, w którym roztwór nasycony innej soli utrzymuje stały poziom wilgotności względnej, zazwyczaj różniący się od wilgotności względnej w naczyniu o 10%. Stały gradient wilgotności względnej prowadzi po pewnym czasie do ustalenia się strumienia cząsteczek pary wodnej J , który opisuje pierwsze prawo Ficka:

$$J = -D \frac{\partial c}{\partial x} \quad (5)$$

Stosując nasycone roztwory różnych par soli można zmieniać średnią wilgotność względną w przekroju próbki w szerokich granicach od 10 – 97%, zmieniając w ten sposób średnią zawartość wody w próbce i uzyskując zależność współczynnika dyfuzji

od tej zawartości. Prowadząc pomiary dla próbek o różnej grubości oraz naczyń bez próbek, a następnie ekstrapolując grubość próbki do zera, oznacza się opór transportu pary w warstwie przyściennej, który można uwzględnić w obliczaniu poprawnego współczynnika dyfuzji [22].

1.1.4. Właściwości mechaniczne

Drewno jest silnie anizotropowym materiałem, który posiada różne właściwości mechaniczne we wszystkich trzech głównych, prostopadłych do siebie kierunkach anatomicznych (rys. 3). Do opisu tych właściwości w obszarze sprężystym potrzeba 12 stałych (z których 9 jest niezależnych):

- trzech modułów sprężystości podłużnej, nazywanych również modułami Younga E_r, E_t, E_l
- trzech modułów sztywności: G_{lr}, G_{lt}, G_{rt}
- sześciu współczynników Poissona : $\nu_{lr}, \nu_{lt}, \nu_{rt}, \nu_{tr}, \nu_{rl}, \nu_{tl}$

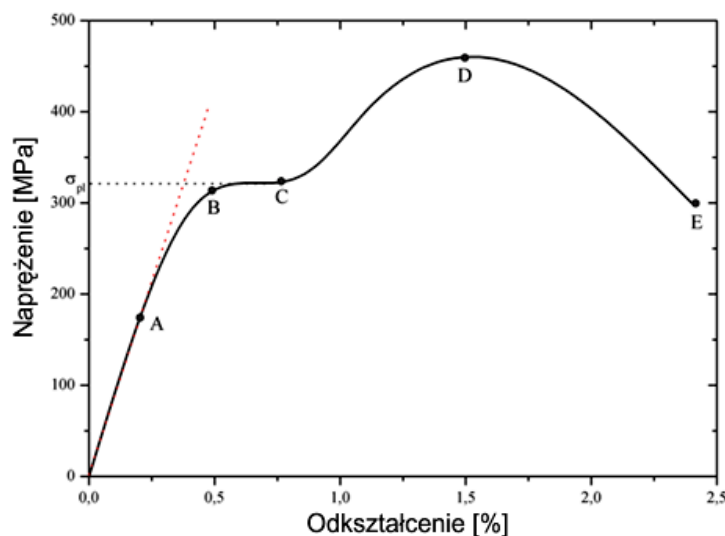
Korzystając z prawa Hooke'a, można zapisać że:

$$\sigma = \frac{F}{S} = E \frac{\Delta l}{l} \quad (6)$$

gdzie : σ oznacza naprężenie normalne ciała, F przyłożoną siłę powodującą odkształcenie, S powierzchnię, E moduł sprężystości (Younga), l - początkową długość ciała, Δl - zmianę długości pod wpływem siły.

Moduł Younga równy jest zatem takiemu naprężeniu, przy którym liniowy wymiar ciała ulega podwojeniu. Obszar sprężystości to obszar, w którym naprężenie ciała jest wprost proporcjonalne do przyłożonej siły, odkształcenia są sprężyste i znikają po ustaniu działania wywołujących je sił, a wymiary ciała powracają do wartości początkowych. Kolejną kategorią odkształceń są odkształcenia niesprężyste. Przy tych odkształceniach następuje nieodwracalna przebudowa struktury drewna, w wyniku czego obiekt nie wraca do swojego pierwotnego kształtu. Takie odkształcenia nazywamy plastycznymi.

Zależność naprężenia σ od odkształcenia $\frac{\Delta l}{l}$ dla rozciągania liniowego drewna wzdłuż włókien przedstawia rys. 7 [23]. Analizując ten wykres można zobaczyć, że po przekroczeniu granicy sprężystości (punkt A), dalsze zwiększanie naprężenia powoduje znaczny wzrost wydłużenia. Przy naprężeniu σ_{pl} , któremu odpowiada punkt B na diagramie rozciągania, względne wydłużenie ciała może dalej wzrastać bez zwiększania naprężenia (poziomy odcinek BC na wykresie). Naprężenie σ_{pl} nazywamy granicą płynięcia. Największe naprężenie odpowiadające punktowi D na wykresie, nazywamy wytrzymałością materiału. Punkt E na wykresie odpowiada rozerwaniu ciała.



Rys. 7. Zależność naprężenia normalnego od odkształcenia dla rozciągania liniowego [23].

Działanie na próbkę drewna osiową siłą rozciągającą powoduje również deformacje w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku działania naprężenia. Tak powstała deformacja jest proporcjonalna do deformacji w kierunku działającej siły rozciągającej, natomiast współczynnikiem proporcjonalności jest odpowiedni współczynnik Poissona. Pierwsza litera w indeksie np. ν_{lr} odnosi się właśnie do kierunku, w którym działa przyłożone naprężenie, a druga określa kierunek bocznej deformacji. Wartości współczynników Poissona zależą od gatunku drewna, które jest poddane deformacji. Moduły elastyczności i współczynniki Poissona powiązane są ze sobą równaniem:

$$\frac{\nu_{ij}}{E_i} = \frac{\nu_{ji}}{E_j} \quad (7)$$

gdzie : $i \neq j$, $j = \{l, r, t\}$

Moduły sztywności Kirchhoffa są często nazywane współczynnikami sprężystości poprzecznej lub postaciowej. Definiują one odporność badanego materiału na ugięcia spowodowane przez naprężenia ścinające. Na przykład moduł G_{lr} określa odkształcenie przy ścinaniu, które powstaje w płaszczyźnie LR, gdy pojawia się naprężenie w płaszczyznach prostopadłych LT i RT. Dla drewna moduły sztywności Kirchhoffa zależą podobnie jak współczynniki Poissona od gatunku drewna oraz od zawartości wody w badanym materiale.

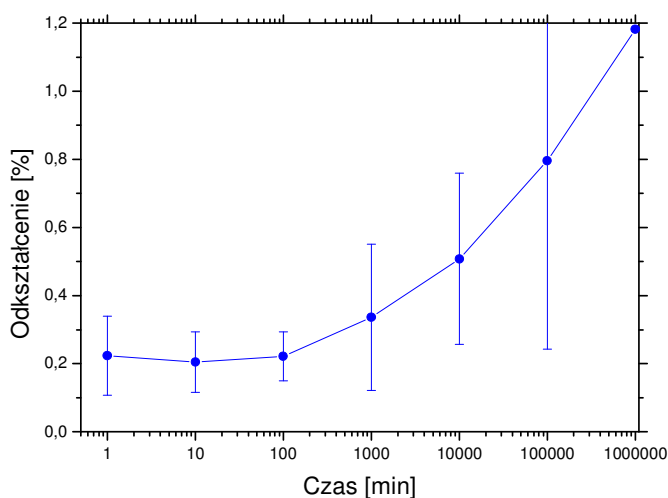
1.1.5. Relaksacja naprężeń w drewnie

Jak w każdym polimerze, naprężenia wywołują w drewnie dwa rodzaje odpowiedzi wymiarowej związane z różnymi mechanizmami molekularnymi: odpowiedź sprężystą – związaną ze zmianami długości wiązań chemicznych i kątów między nimi skutkującymi przemieszczeniami atomów w położenia o większej energii wewnętrznej, oraz „kautukopodobną” – związaną ze zmianami konformacyjnymi głównie zmniejszającymi entropię układu.

Przemieszczenia związane z odpowiedzią sprężystą zachodzą szybko, w czasach rzędu pikosekund. Szybkość przemian konformacyjnych jest zależna od ruchliwości struktury oraz temperatury. Tę ostatnią zależność można w przybliżeniu opisać członem równania Arrheniusa $e^{-\frac{E}{RT}}$, gdzie E jest energią aktywacyjną procesu, a R stałą gazową. Dla każdego materiału istnieje krytyczna temperatura zwana temperaturą przejścia szklistego lub zeszklenia rozdzielająca dwie opisane rodzaje odpowiedzi wymiarowej: znacznie poniżej tej temperatury materiał jest w stanie szklistym i może odpowiedzieć tylko przez zmianę energii wewnętrznej np. zmianę długości wiązań molekularnych, natomiast znacznie powyżej tej temperatury zmiana konformacyjna molekuł jest zasadniczo natychmiastowa i materiał jest w stanie kautukopodobnym, tj. odpowiada znacząco i całkowicie odwracalnie na pojawiające się naprężenie. W obszarze temperatur bliskich przejściu szklistemu odpowiedź materiałów jest mieszana – lepkosprężysta, tzn. odpowiedź materiału zmienia się z czasem po przyłożeniu

naprężenia. Najczęstszymi przejawami zachowania lepkosprężystego materiału jest pełzanie i relaksacja naprężeń. Pełzanie jest zmianą odkształcenia materiału w czasie, gdy przyłożone naprężenie jest stałe. Natomiast relaksacja naprężeń polega na zmianie naprężenia w materiale przy stałym odkształceniu.

W przypadku drewna temperatura przejścia szklanego wynosi kilkadziesiąt stopni Celsjusza, stąd w temperaturze pokojowej drewno jest materiałem lepkosprężystym. Konsekwencją tego jest zależność krytycznego odkształcenia drewna, przy którym następuje pęknięcie, od szybkości wzrostu naprężenia. Rys. 8 pokazuje zależność odkształcenia krytycznego wywołanego naprężeniem przyłożonym w kierunku prostopadłym do włókien drewna jodłowego od czasu, po którym liniowy wzrost naprężenia doprowadził do rozerwania materiału [24].



Rys. 8. Zależność odkształcenia krytycznego wywołanego naprężeniem przyłożonym w kierunku prostopadłym do włókien drewna jodłowego od czasu.

1.2. Zaprawa

Zaprawa malarska jest warstwą pośrednią pomiędzy powłoką malarską a podłożem drewnianym. Wyrównuje ona wszelkie nierówności podłoża oraz zapewnia dobrą adhezję użytych farb do podłoża.

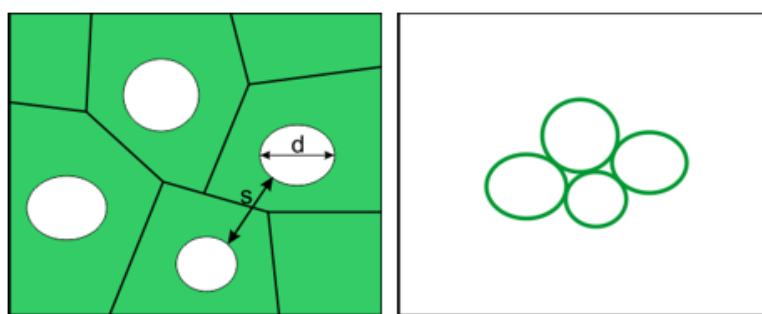
Zaprawa malarska jest zaprawą klejową: powstaje przez zmieszanie kleju zwierzęcego z wypełniaczem mineralnym. W malarstwie historycznym dobór składników zależał od regionu geograficznego i czasu powstania obrazu. Wypełniaczem

stosowanym powszechnie we Włoszech był diwodzian siarczanu wapnia – gips, podczas gdy w krajach Europy Północnej i Środkowej, w tym w Polsce, stosowano głównie węglan wapnia – kredę. Skład i sposób położenia zaprawy zależały od wyrazu estetycznego powierzchni, do którego dążył artysta - na przykład uzyskania kontrastujących powierzchni błyszczących i matowych. Również grubość podkładu zależała od regionu geograficznego: zwyczajem włoskim było nakładanie wielu kolejnych warstw zaprawy, podczas gdy na północy zazwyczaj poprzestawano na podkładach cienkich [25,26]. Czasem do zapraw dodawano biel cynkową oraz glinę. Obecnie często do receptury zaprawy wprowadza się żywicę akrylową.

Parametrem, który opisuje skład zaprawy malarskiej jest objętościowa zawartość wypełniacza (PVC - *pigment volume concentration*). Parametr ten określa się jako [27] :

$$PVC = \frac{P}{P + B} * 100\% \quad (8)$$

gdzie P oznacza objętość wypełniacza, a B – objętość użytego kleju. Współczynnik PVC wpływa silnie na odpowiedź wymiarową zaprawy i jej właściwości mechaniczne. Odpowiednie zależności można wyprowadzić w oparciu o mikroskopowy model zaprawy podany przez Michalskiego [27]. Model ten rozróżnia dwa stany zaprawy przedstawione schematycznie na rys. 9 – stan świeży z pełną zawartością wody i po wyschnięciu.



Rys. 9. Schemat świeżego stanu zaprawy z pełną zawartością wody (a) oraz po jej wyschnięciu (b).

Zaprawę przygotowuje się przez zmieszanie ciepłej wody, w której rozpuszczono odpowiednią ilość suchego kleju, z wypełniaczem. Po wystygnięciu klej gęstnieje do formy żelu, a w czasie schnięcia klej kurczy się do stanu suchego równomiernie

otaczając poszczególne ziarna wypełniacza. Przyjmując, że ziarna te mają formę w przybliżeniu kulistą, stosunek grubości s warstwy kleju łączącej dwa ziarna do średnicy ziarna d w następujący sposób zależy od względnej ilości kleju w wysuszonej zaprawie wyrażonej przez współczynnik PVC_{sucha} :

$$\frac{s_{sucha}}{d} = \left(\frac{1}{PVC_{sucha}} + 1 \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \quad (9)$$

Zależność tego samego stosunku s_{mokra}/d od ilości kleju w formie żelu w zaprawie mokrej (świeżo przygotowanej) wyrażonej przez współczynnik PVC_{mokra} , będzie nieco inna, gdyż żel nie tylko pokrywa „warstwą” kuliste ziarna wypełniacza, ale wypełnia także przestrzenie pomiędzy tak utworzonymi kulami. Ponieważ wypełnienie przestrzeni przez gęsto upakowane kule wynosi 0,74:

$$\frac{s_{mokra}}{d} = \left(0,74 \frac{1-PVC_{mokra}}{PVC_{mokra}} + 1 \right)^{1/3} - 1 \quad (10)$$

Dla typowych receptur współczynnik PVC_{mokra} wynosi około 27%, a odpowiadający mu PVC_{sucha} 90%. Wyliczone dla tych składów z przytoczonych wzorów odległości między cząstkami wypełniacza wynoszą odpowiednio około 0,45 średnicy cząstki dla zaprawy mokrej i 0,035 dla zaprawy suchej.

1.2.1. Zmiany wymiarowe zaprawy klejowej

Skurcz zaprawy związany ze schnięciem od stanu mokrego wynosi:

$$\varepsilon_0 = \frac{s_{mokra} - s_{sucha}}{s_{mokra} + d} \quad (11)$$

stąd dla rozpatrywanych typowych receptur skurcz ten wyniesie 29%. Należy oczywiście pamiętać, że skurcz warstwy zaprawy jest ograniczany przez podłoże, na które została nałożona. Ograniczenie skurczu powoduje wzrost naprężenia, które ulega niemal całkowitej relaksacji na drodze pełzania plastycznego mokrej zaprawy. Rzeczywisty „reszkowy” skurcz schnięcia obliczony ze zmierzonego reszkowego naprężenia w wyschniętej zaprawie o PVC 90% wyniósł zaledwie 0,11%.

Omówiony model zaprawy klejowej pozwala na podanie zależności wilgotnościowego współczynnika zmiany wymiarowej oraz parametrów mechanicznych zaprawy klejowej od składu wyrażonego współczynnikiem PVC. Wilgotnościowy współczynnik zmiany wymiarowej określający średnią względną zmianę wymiarową przy zmianie wilgotności względnej w otoczeniu materiału o 1% opisuje się symbolem α_{RH} (od ang. *relative humidity* – wilgotność względna), natomiast współczynnik określający średnią względną zmianę wymiarową przy zmianie równowagowej zawartości wody w materiale o 1% opisuje się symbolem α_{EMC} . Ponieważ zmiana wymiarowa zaprawy z wilgotnością względną zależy wyłącznie od zmiany wymiarowej „płytek” kleju między ziarnami wypełniacza, wilgotnościowy współczynnik $\alpha_{RH,zaprawa}$ wynosi:

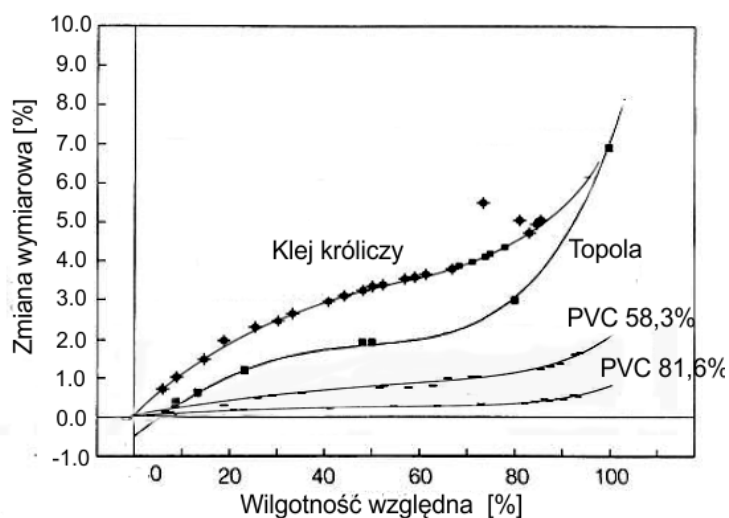
$$\alpha_{RH,zaprawa} = \alpha_{klej} \frac{s_{sucha}}{d + s_{sucha}} \quad (12)$$

W tabeli 1 podano wartości wilgotnościowego współczynnika zmiany wymiarowej obliczone dla zapraw klejowych o różnych wartościach PVC przy przyjęciu, że współczynnik zmiany wymiarowej kleju wynosi pomiędzy 3×10^{-4} a 4×10^{-4} /1% wilgotności względnej (oznaczona w dalszej części pracy jako 1%rh) [28,29]. Jest rzeczą charakterystyczną, że zaprawa klejowa o PVC=90% stosowana typowo do gruntowania desek ma bardzo mały wilgotnościowy współczynnik zmiany wymiarowej wynoszący zaledwie między $1,1 \times 10^{-5}$ do $1,4 \times 10^{-5}$ /1%rh. Wartości obliczone bardzo dobrze zgadzają się pomiarami Mecklenburga, których przykład ilustruje rys. 10 [30].

PVC [%]	$\alpha_{RH,zaprawa}$	ε_{kryt} [%]
58	6,64	0,4
82	2,56	0,15
90	1,38	0,08
96	0,84	0,03

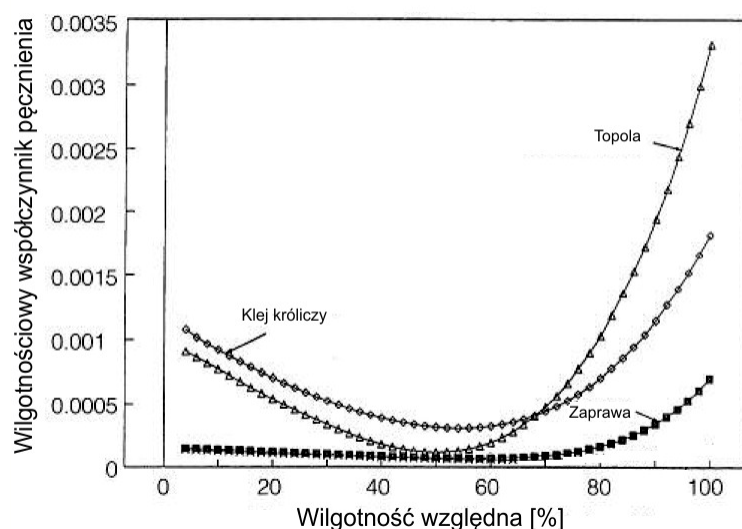
Tabela 1. Wilgotnościowy współczynnik zmiany wymiarowej obliczony dla zapraw klejowych o różnych wartościach PVC.

Rysunek ten przedstawia zmiany wymiarowe w funkcji wilgotności względnej dla czystego kleju króliczego oraz dwóch zapraw o PVC wynosząca 58% oraz 81,6%. Przedstawione wykresy pokazują, że liniowa zależność zmiany wymiarowej kleju od wilgotności względnej jest obserwowana dla wilgotności względnych poniżej około 70%, natomiast powyżej tej wartości odpowiedź wymiarowa kleju szybko rośnie. Dla zapraw, ta krytyczna wartość wilgotności względnej przesuwa się do około 80%. Dla porównania zamieszczono krzywą zmiany wymiarowej drewna topoli w kierunku stycznym.



Rys. 10. Zmiana wymiarowa drewna topoli w kierunku stycznym, kleju króliczego i zapraw o PVC = 58,3% oraz 81,6% w funkcji wilgotności względnej [10].

Zależność wilgotnościowych współczynników pęcznienia od wilgotności względnej przedstawiono dla analizowanych materiałów na rys. 11.



Rys. 11. Zależność wilgotnościowych współczynników zmiany wymiarowej od wilgotności względnej dla drewna topoli w kierunku stycznym, kleju króliczego oraz zaprawy klejowej o PVC = 58%.

Przedstawione wykresy pokazują wpływ składu zaprawy wyrażonego poprzez wielkość PVC na odpowiedź wymiarową w całym zakresie wilgotności względnej. Im mniejsza zawartość kleju, czyli im wyższy parametr PVC, tym mniejsza odpowiedź wymiarowa zaprawy. I tak zmiana wymiarowa samego kleju w przedziale od 10%rh do 90%rh wynosi 6%, podczas gdy zmiany wymiarowe zapraw dla tego samego przedziału wilgotności względnej wynoszą 1,1 i 0,3% odpowiednio dla wartości PVC 58,3 oraz 81,6%. Zaprawa malarska jest też materiałem, który słabo odpowiada w porównaniu z odpowiedzią podłoża drewnianego w poprzek włókien na bodźce związane ze zmianą wilgotności względnej.

Mecklenburg [29] stwierdził również, że skurcz kleju obserwowany podczas schnięcia nie osiąga wartości końcowej. Jeżeli materiał zostanie poddany kilku kolejnym cyklom wzrostu i spadku wilgotności względnej, skurcz osiągnie stałą wyższą wartość. Zjawisko to autor nazwał odprężaniem kleju lub zaprawy klejowej.

1.2.2. Właściwości mechaniczne zaprawy klejowej

Zastępując w równaniu 12 współczynnik α przez krytyczne odkształcenie materiału ε_{kryt} , przy której następuje jego pęknięcie, można obliczyć wartość tego parametru dla zaprawy klejowej, jeżeli znany jest on dla czystego kleju. Odkształcenie krytyczne kleju stosowanego w badaniach Mecklenburga przyjmuje wartości z zakresu 2,5 - 4% zależnie od szybkości zmiany odkształcenia w stosunku do czasu relaksacji materiału [29,30]. W tabeli 1 podano wartości odkształcenia krytycznego obliczone dla zapraw klejowych o różnych wartościach PVC. Obserwuje się dobrą zgodność z pomiarami tego samego autora dla zapraw o PVC wynoszącym 58 i 82%. Należy zaznaczyć, że przy wzroście współczynnika PVC do około 90% zaprawy stają się bardzo słabe i kruche, stąd trudno przygotować nieuszkodzone próbki do badań wytrzymałości na rozciąganie. Niemniej zaprawy ubogie w klej o PVC około 90% są typowo stosowane jako warstwy podkładowe w drewnie polichromowanym. Odkształcenie krytyczne wyliczone dla takiej zaprawy wynosi zaledwie między 0,09 – 0,14%. Z kolei wytrzymałość s zaprawy zależy od ułamka powierzchni przełomu jaki pokrywają „płytki” klejowe zespalające ziarna wypełniacza $\frac{A}{A_{max}}$ [27]:

$$S_{krytzaprawa} = S_{krytklej} \frac{A}{A_{max}} \quad (13)$$

a jej sztywność wyrażana przez moduł sprężystości podłużnej E zależy zarówno od tego ułamka jak i grubości „płytek” klejowych:

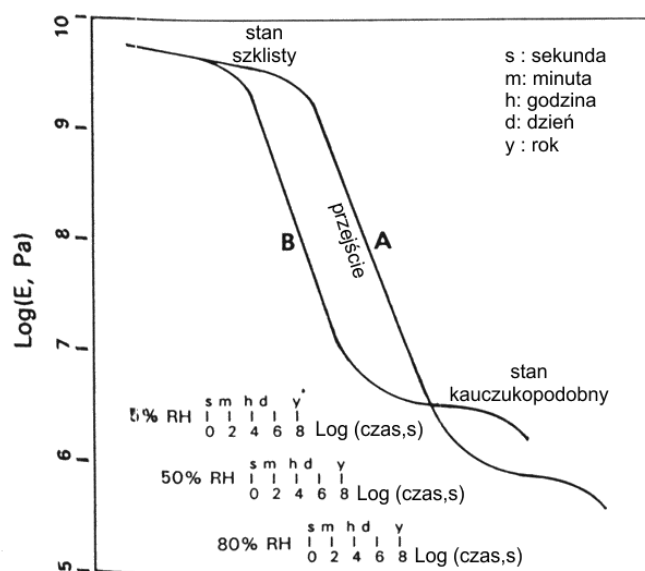
$$E_{zaprawa} = E_{klej} \frac{\left(1 + \frac{s}{d}\right)}{\frac{s}{d}} \frac{A}{A_{max}} \quad (14)$$

Zakładając, że przybliżymy ziarna wypełniacza poliedrami, których ściany tworzą kąty 60° w każdym kierunku, wówczas idealna wartość $\frac{A}{A_{max}}$ dla każdego ziarna wynosi około 0,25. Jeżeli jednak uwzględnimy, że nie wszystkie ziarna są idealnie ustawione względem siebie i przyjmujemy, że połowa z nich nie ulega sklejeniu, $\frac{A}{A_{max}}$ zmniejsza się do 0,12. Wartość tę potwierdziły eksperymentalne pomiary wytrzymałości i sztywności

zapraw w zależności od współczynnika PVC w zakresie poniżej około 85%. Przy wzroście współczynnika powyżej 85% (spadku zawartości kleju) powierzchnia sklejenia $\frac{A}{A_{max}}$ zmniejsza się osiągając 0 dla PVC wynoszącego 94%. Dla tego ostatniego składu ilość kleju wystarcza zaledwie do wytworzenia nanometrycznej, silnie przylegającej do ziaren wypełniacza warstwy, uniemożliwiającej wytworzenie „mostków” klejowych zespalaających ziarna.

Moduł sprężystości E nie jest wielkością stałą. Klej jest polimerem i tak jak opisano to dla drewna w części 1.1.4, wartość E ulega dramatycznemu obniżeniu przy przejściu ze stanu szklanego do stanu „kautzukopodobnego”.

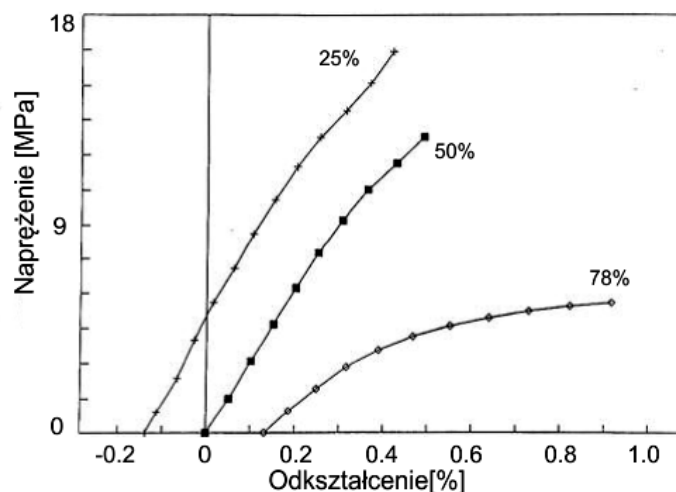
Zachowanie lepkosprężyste kleju ilustruje rys. 12 pokazujący zależność między modułem sprężystości podłużnej E, a czasem w jakim działa naprężenie, dla różnych zawartości wody w kleju, która odgrywa rolę plastyfikatora. Jeżeli czas, w którym narasta naprężenie jest krótki lub gdy wilgotność względna otoczenia, a stąd równowagowa zawartość wody w kleju, są niskie, materiał zachowuje się jak szklisty polimer o wysokim module sprężystości wynoszącym około 5 GPa. W takich warunkach, odkształcenie krytyczne wnosi zaledwie około 2% przy naprężeniu około 100 MPa.



Rys. 12. Zachowanie lepkosprężyste kleju w temperaturze 21 °C.

Kiedy jednak klej wchodzi w obszar przejściowy, jego odkształcenie krytyczne dramatycznie rośnie do 10-20%, osiągając w stanie „kautzukopodobnym” 200%!

Zachowanie lepko-sprężyste kleju przenosi się oczywiście na zaprawy klejowe i zmienia w istotny sposób odpowiedź wymiarową zapraw na naprężenia w zależności od wilgotności względnej otoczenia. Ilustruje to rys. 13, na którym przedstawiono zależność odkształcenia od naprężenia dla zaprawy o $PVC = 58,3\%$ dla trzech różnych wartości wilgotności względnej.



Rys. 13. Zależność odkształcenia od naprężenia dla zaprawy o $PVC = 58,3\%$ dla trzech różnych wartości wilgotności względnej 25, 50 i 78% [10].

Przy niskiej wartości wilgotności względnej zaprawa zachowuje się jak materiał szklisty: moduł E , obliczany z nachylenia początkowej liniowej części zależności osiąga wartość 4,5 GPa, a odkształcenie krytyczne dla którego następuje zniszczenie, wynosi 0,005. Dla tej samej zaprawy w równowadze z wilgotnością względną 78% moduł E wynosi 2,9 GPa, a odkształcenie krytyczne 0,009 przy znacznie niższym naprężeniu.

1.2.3. Adhezja do podłoża drewnianego

Adhezja do podłoża jest bardzo ważnym zjawiskiem, ponieważ określa czy warstwa malarska wraz z zaprawą będzie odpajać się od podłoża. Michalski [27] badał różne zaprawy o składach w zakresie od 90% do 99% PVC na podłożu szklanym, którego przyczepność zmieniano przez nanoszenie zmiennej ilości środka antyadhezyjnego. Zaprawy były nanoszone na podłoże i wysychały w 50% wilgotności

względnej. Następnie zmieniano wilgotność względną do 5%, a później do 90% i ponownie do 5% i obserwowano zaprawę.

Autor zaobserwował, że dla zapraw w granicach 94-99% PVC, czyli o niskim skurczu, na trzech podłożach o różnej adhezji nie występowały odspojenia. Dla próbek między 90 a 92% PVC na podkładzie o słabej adhezji następowało całkowite odspojenie, natomiast przy coraz lepszej adhezji odspojenia były coraz mniejsze. Zaobserwowano również, że pojawienie się spękań było zawsze poprzedzane odspojeniem zaprawy od podłoża. Szerokość spękań znacznie rosła w czasie spadku wilgotności względnej powodującego skurcz spoiwa klejowego. Przeprowadzone badania wskazują, że naprężenie pojawiające się w zaprawie w wyniku skurczu powodują szczególnie rozległe zniszczenia fizyczne zapraw o słabej przyczepności do podłoża, potwierdzając zasadność wielowiekowej praktyki zapewnienia dobrej adhezji podkładowej zaprawy malarskiej między innymi przez zagruntowanie podłoża warstwą czystego kleju.

2. Mechanizm powstawania uszkodzeń drewnianych obiektów polichromowanych pod wpływem zmian parametrów mikroklimatycznych otoczenia

2.1. Mechanizm powstawania uszkodzeń w drewnie

Konsekwencją zmian wymiarowych drewna wywoływanych przez sorpcję lub desorpcję pary wodnej są uszkodzenia fizyczne.

Jeżeli na pęcznienie drewna pod wpływem wzrastającej wilgotności względnej w otoczeniu zostaną nałożone więzy, materiał będzie ściskany, co może prowadzić do zmiażdżenia jego struktury lub deformacji. Z kolei, jeżeli na skurcz drewna będący wynikiem spadku wilgotności względnej w otoczeniu zostaną nałożone więzy, materiał będzie rozciągany, co może prowadzić do deformacji plastycznej lub pęknięcia.

Opisane zagrożenia nie mają miejsca, jeżeli zmiana wymiarowa jest swobodna, tzn. jeżeli na ruch drewna nie są nałożone żadne więzy. Jednak w rzeczywistych obiektach zabytkowych wykonanych z drewna więzy występują powszechnie. Więzy mogą mieć charakter zewnętrzny na przykład mogą być wynikiem sztywnej konstrukcji obiektu, ograniczającej ruch, lub połączenia w jednym obiekcie elementów drewnianych o różnej orientacji włókien i konsekwencji różnej odpowiedzi wymiarowej na zmianę wilgotności. Ważnym przypadkiem więzów nałożonych na zmiany wymiarowe obrazów na desce są parkietaże przymocowywane do ich odwroci, w celu zapobiegania deformacji obrazów. Przykład parkietażu usztywniającego obraz przedstawiono na rys. 14.

W założeniu listwy poziome mają ślizgać się w otworach wykonanych w listwach pionowych umożliwiając zmianę wymiarową w płaszczyźnie obrazu. Jeżeli ruch ten zostanie ograniczony, na przykład z powodu z nadmiernego tarcia listew ruchomych, zatrzymany ruch będzie prowadzić do naprężeń i uszkodzeń deski. Zagrożenie uszkodzeniami zwiększa ścienienie podobrazia, jakie często przeprowadzano przed naklejeniem parkietażu.

W drewnie mogą występować również więzy wewnętrzne. Ze względu na powolny przebieg dyfuzji pary wodnej przez strukturę drewna, zewnętrzna część

masywnych elementów drewnianych będzie wysychać szybciej niż wewnątrz przy spadku wilgotności względnej.

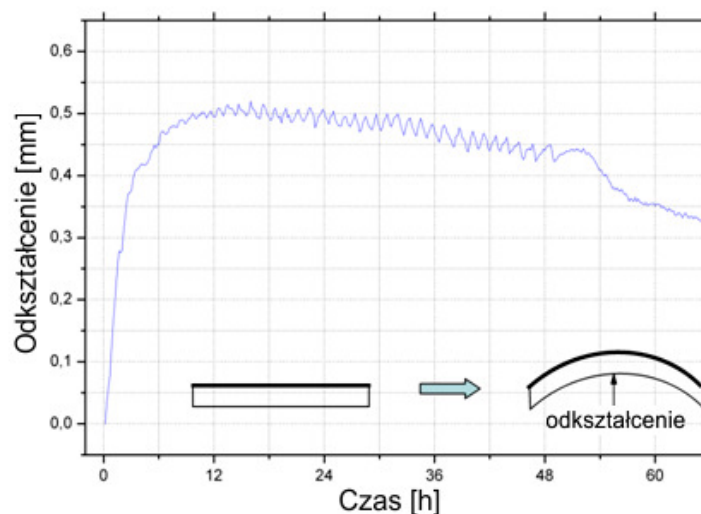


Rys. 14. Podobrazie usztywnione układem listew (parkietażem). Taki szkielet prowadzi do powstania naprężeń w drewnie i może spowodować jego uszkodzenia.

Skurcz zewnętrznej, suchej strefy drewna będzie zahamowany przez wilgotny rdzeń, co spowoduje naprężenie w elemencie: zewnętrzna strefa będzie rozciągana, a rdzeń ściskany. Dodatkowym składnikiem więzów wewnętrznych są więzy wynikające z cylindrycznej struktury drewna i anizotropii wilgotnościowej odpowiedzi wymiarowej: duża styczna zmiana wymiarowa nie jest akomodowana przez mniejszą zmianę promieniową. Powoduje to pojawienie się naprężenia nawet dla powolnych, quasi-statycznych zmian wilgotności względnych nie wywołujących gradientów zawartości wilgoci w drewnie. Dokładną analizę tego zjawiska dla cylindra drewnianego przeprowadził Jakieła i współpracownicy [31].

Istotnym źródłem więzów wewnętrznych w obrazach na desce jest niesymetryczny gradient zawartości wilgoci powstający w przekroju drewna przy zmianie wilgotności względnej w otoczeniu. Przyczyną powstawania gradientu jest swobodna dyfuzja pary wodnej z otoczenia do drewna jedynie przez płaszczyznę odwrocia, niepokrytą warstwą dekoracyjną. Warstwy zaprawy klejowej, farby i często werniksu pokrywające płaszczyznę wierzchnią ograniczają w różnym stopniu dyfuzję pary wodnej. Opór dyfuzyjny 16 różnych warstw dekoracyjnych, przygotowanych według receptur historycznych, określili doświadczalnie Allegretti i Raffaelli [32], mierząc kinetyki sorpcji pary wodnej próbek drewna pokrytych tymi warstwami

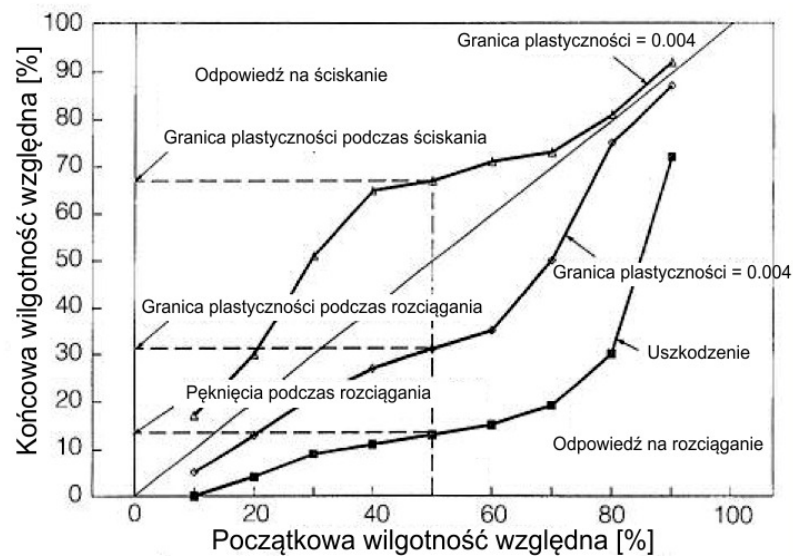
w warunkach niestacjonarnych. Rys. 15 przedstawia odpowiedź wymiarową deski pokrytej warstwą dekoracyjną w odpowiedzi na skokową zmianę wilgotności względnej (pomiar własny autora).



Rys. 15. Wygięcie deski pokrytej z jednej strony warstwą nieprzepuszczalną dla pary wodnej w odpowiedzi na skokową zmianę wilgotności względnej z 70 do 35%.

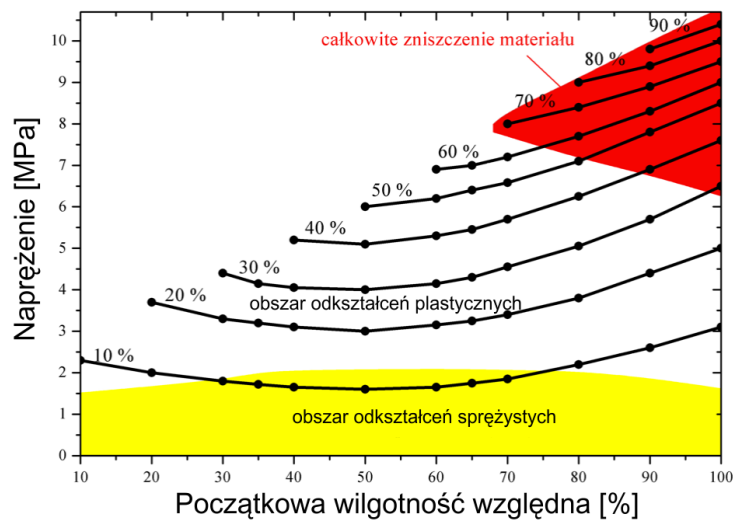
Niesymetryczny gradientu zawartości wody w przekroju deski wywołał różną zmianę wymiarową dwóch płaszczyzn, odzwierciedlającą się w narastającym wygięciu deski: przy największym gradientcie wygięcie jest największe, a następnie powoli zanika w miarę wyrównywania się zawartości wody w objętości drewna. Jeżeli wygięcie deski ograniczy się na przykład przez wprowadzenie parkietu, w obiekcie pojawi się naprężenie, mogące prowadzić do uszkodzenia.

Mecklenburg i współautorzy [30] zaproponowali, ażeby granicę sprężystego zachowania drewna, wynoszącą w przybliżeniu 0,4%, przyjąć za krytyczne odkształcenie, którego zatrzymanie może prowadzić do uszkodzenia. Posługując się izotermą pęcznienia lub skurczu autorzy wyznaczyli zmiany wilgotności względnej dające taką zmianę wymiarową. Ponieważ wilgotnościowa odpowiedź wymiarowa drewna w kierunku stycznym jest największa, dopuszczalne zmiany wilgotności względnej zostały ustalone na podstawie odpowiedzi 0,4% dla tego kierunku, jako przypadku najgorszego. Jako że współczynnik zmiany wymiarowej zależy silnie od wilgotności względnej, dopuszczalne zmiany wilgotności względnej zostały przedstawione w funkcji poziomu wilgotności względnej od której zmiana zachodzi. Otrzymane obszary dopuszczalnych zmian wilgotności względnej pokazano na rys. 16.



Rys. 16. Obszary zmian wilgotności względnej dopuszczalnych i powodujących zagrożenie drewna deformacją lub uszkodzeniem fizycznym [30].

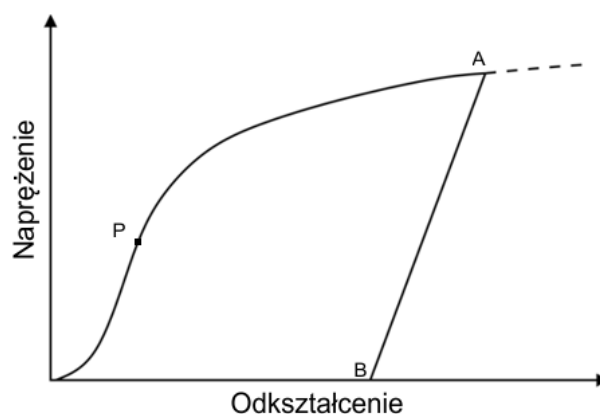
Podobne mapy dopuszczalnych zmian wilgotności względnej dla cylindra drewnianego, przedstawione na rys. 17, wyznaczyli Jakiela i współpracownicy [31].



Rys. 17. Maksymalne naprężenia pojawiające się w strukturze cylindrycznej drewna lipowego w zależności od zmian wilgotności względnej otoczenia. Na osi x znajduje się początkowa wartość wilgotności względnej, w której rozpatrywany materiał został wystabilizowany [31].

Nałożenie więzów na pęcznienie drewna przy wzroście wilgotności względnej prowadzi do trwałego odkształcenia po ściśnięciu, zjawiska ważnego dla zrozumienia

deformacji i wilgotnościowej odpowiedzi wymiarowej obiektów drewnianych. Rys. 18 ilustruje poglądowo zależności między naprężeniem a odkształceniem elementu drewnianego, na który zostały nałożone więzy.



Rys. 18. Poglądowa zależność między naprężeniem a odkształceniem elementu drewnianego, na który zostały nałożone więzy.

Dopóki odkształcenie drewna nie przekracza granicy sprężystości zaznaczonej jako punkt P, cykle wzrostu i spadku wilgotności względnej w otoczeniu będą powodowały odwracalne cykle naprężeń w drewnie. Jeżeli odkształcenie przekroczy tę granicę i dojdzie do punktu A, po powrocie wilgotności względnej do wartości początkowej wymiar próbki będzie mniejszy o trwałe odkształcenie dane odcinkiem B. Trwałe odkształcenie po ściśnięciu jest przyczyną charakterystycznego wygięcia wielu obrazów na desce. Jeżeli w przeszłości obraz na desce został umieszczony w ramie, która uniemożliwiła wygięcie deski podczas asymetrycznego pęcznienia jej odwrocia podczas wzrostu wilgotności względnej, ograniczenie pęcznienia doprowadzało do trwałego odkształcenia (skrócenia) odwrocia po ściśnięciu. Po spadku wilgotności względnej trwałe skrócenia odwrocia w stosunku do płaszczyzny wierzchniej prowadzi do trwałej wypukłej deformacji obrazu.

2.2. Mechanizm powstawania uszkodzeń w warstwie zaprawy

Fizyczne uszkodzenia warstwy zaprawy są powodowane różnicami między współczynnikami zmiany wymiarowej tego materiału i drewna, rozpatrywanymi oddzielnie dla jego różnych kierunków anatomicznych.

Odpowiedź wymiarowa drewna w kierunku wzdłużnym na zmiany wilgotności względnej otoczenia jest zanedbywalnie mała, stąd podłoże drewniane w tym kierunku nakłada więzy na wilgotnościową zmianę wymiarową zaprawy klejowej. Jak opisano to w części 1.2.1, w czasie schnięcia od stanu mokrego zaprawa klejowa znacznie kurczy się. Ograniczenie skurczu przez podłoże powoduje pojawienie się naprężenia rozciągającego, które jednak ulega w znacznym stopniu relaksacji na drodze pełzania plastycznego. Niemniej po wyschnięciu utrzymuje się pewien poziom „reszkowego” naprężenia. Jeżeli w otoczeniu układu nastąpi spadek wilgotności względnej, naprężenie rozciągające w zaprawie w kierunku wzdłuż włókien drewna będzie narastać na skutek ograniczenia przez podłoże wilgotnościowego skurczu zaprawy oraz ze względu na wzrastający moduł sprężystości związany z przechodzeniem kleju do stanu szklistego. Naprężenia takie prowadzą do pęknięć zaprawy prostopadłych od kierunku wzdłużnego podłoża, powszechnie obserwowanych na obrazach na desce (rys. 19).



Rys. 19. Siatka spękań prostopadłych do kierunku wzdłużnego podłoża drewnianego powstała na obrazie wskutek ograniczenia skurczu zaprawy w tym kierunku.

Inny mechanizm wywołuje pęknięcia pionowe, równoległe do kierunku włókien. Ponieważ skurcz drewna w kierunku prostopadłym do włókien jest znacznie większy niż skurcz zaprawy, przy spadku wilgotności względnej otoczenia zostanie ona poddana ścisłaniu, podczas gdy w przypadku wzrostu, pęcznienie drewna będzie większe niż pęcznienie zaprawy, która będzie rozciągana.



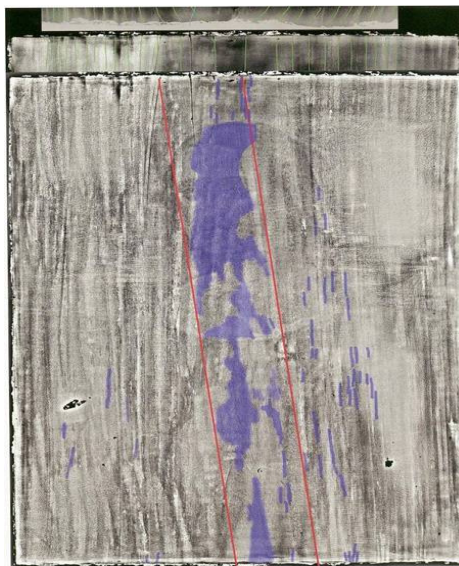
Rys. 20. Siatka spękań na obrazie *Mona Liza* Leonarda da Vinci.

Jeżeli rozbieżność zmiany wymiarowej przekroczy poziom krytyczny, zaprawa pęknie lub odspoi się od drewnianego podłoża. Rys. 20 pokazuje opisane pęknięcia pionowe w środkowej części *Mony Lisy* Leonarda da Vinci [33].

Badania radiograficzne przeprowadzone przez Centrum Badawcze Muzeów Francuskich pokazały, że strefa w której pojawiły się pionowe pęknięcia pokrywa się z przekrojem stycznym deski, na której namalowano obraz (rys. 21). Duża wilgotnościowa odpowiedź wymiarowa drewna w tym przekroju spowodowała nasilenie pionowych spękań zaprawy.

Mecklenburg i współpracownicy [30] przyjęli, że odkształcenie zaprawy wywołane odpowiedzią wymiarową drewna nie powinno przekroczyć 0,25% zarówno w ściskaniu jak i rozciąganiu i wyliczyli dopuszczalne zmiany wilgotności względnej takie odkształcenie wywołujące. Przyjęte odkształcenie krytyczne odpowiada granicy sprężystości zaprawy bogatej w spoiwo klejowe o parametrze $PVC = 58,3\%$, dla której zależność odkształcenia od naprężenia przedstawiono na rys. 13. Dla zapraw o małej zawartości kleju ($PVC > 80\%$) odkształcenie 0,25% jest wyższe od odkształceń, przy których zaprawy pękają (przykładowe wartości zawiera tabela 1). Odkształcenie 0,25% jest zatem pewnym syntetycznym kryterium wskazującym na zagrożenie zapraw deformacją lub pęknięciem. Nieuniknioną arbitralność takiego kryterium powoduje również znaczna zależność zachowania mechanicznego zapraw, a stąd ich podatności na uszkodzenia fizyczne, od jakości i parametrów mechanicznych kleju. Kleje zwierzące ulegają szybkiej degradacji przy niewłaściwym przechowywaniu, stąd nie można wykluczyć, że pewna część obiektów zabytkowych może zawierać polichromie

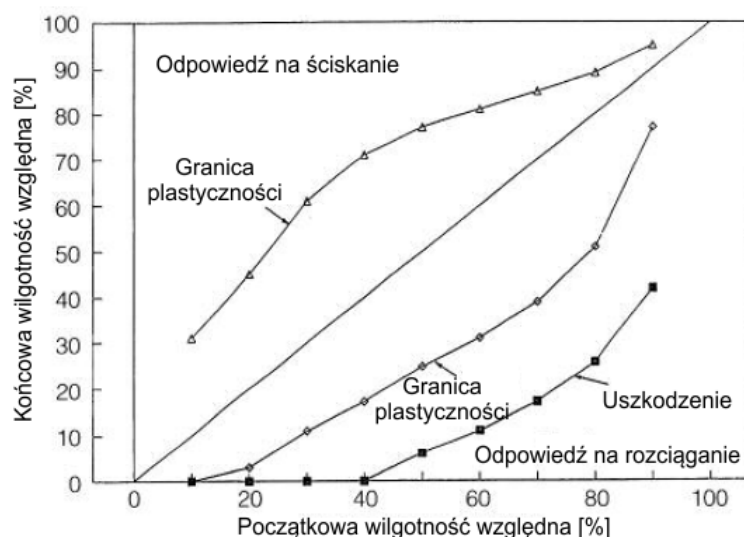
przygotowane mniej starannie lub gorszymi materiałami i stąd bardziej podatne na niszczenie.



Rys. 21. Zdjęcie rentgenowskie pokazujące korelację pionowych spękań w obrazie Leonarda da Vinci *Mona Liza* ze strukturą pierścieniową przedstawioną w górnej części ilustracji [33].

Ponieważ współczynnik zmiany wymiarowej zależy silnie od wilgotności względnej, autorzy przedstawili dopuszczalne zmiany wilgotności względnej w funkcji poziomu wilgotności względnej, od której zmiana zachodzi (rys. 22). Na przykład, dopuszczalny wzrost wilgotności względnej w otoczeniu warstwy zaprawy nałożonej na deskę topolową i będącej w stanie równowagi w 50% wilgotności względnej wynosi 12% a dopuszczalny spadek tego parametru jako 17%. Po przekroczeniu tych poziomów wilgotności względnej nastąpi odpowiednio deformacja rozciągająca lub ściskająca zaprawę.

Opisana analiza zjawiska wywołuje jednak kolejne pytania. Czy rzeczywiście odkształcenie 0,25% jest wartością krytyczną powyżej której następuje uszkodzenie zaprawy? Jak podkreślali to sami autorzy badań [30], założenie to jest bardzo ostrożne, i zbadanie doświadczalne czy odpowiada rzeczywistości jest jednym z pytań badawczych niniejszej rozprawy. Ponadto, właściwości mechaniczne zaprawy mierzono dotychczas w jednym cyklu pomiaru zależności odkształcenia od naprężenia. Tymczasem mniejsze odkształcenia wywoływane w trakcie dużej liczby cykli zmiany wilgotności względnej mogą prowadzić do uszkodzeń zmęczeniowych, ze względu na kumulację mikrouszkodzeń.



Rys. 22. Dopuszczalne zmiany wilgotności względnej w funkcji poziomu wilgotności względnej [30].

Konieczność korekty krytycznych odkształceń uwzględniającej zmęczenie była sygnalizowana przez Michalskiego [34], ale efekt ten nie był przedmiotem żadnych prac eksperymentalnych. Również tę lukę w badaniach stara się uzupełnić niniejsza rozprawa.

2.3. Określenie dopuszczalnych wahań parametrów mikroklimatu dla drewna polichromowanego na drodze analizy „mikroklimatu historycznego”

Opisaną powyżej metodę wyznaczania dopuszczalnych wahań parametrów mikroklimatu oparto na analizie szeroko pojętej „mechaniki obiektów”. Jednak jakkolwiek szczegółowe byłyby dalsze badania odpowiedzi wilgotnościowej i właściwości mechanicznych drewna polichromowanego jako układu fizycznego, nigdy w pełni nie doprowadzą do oceny zagrożenia konkretnego obiektu zabytkowego, ze względu na niepewności co do cech mechanicznych materiałów historycznych, ich uszkodzeń i oddziaływań pomiędzy warstwami.

Istnieje również powszechna zgodność co do tego, że obiekty „adaptują się”, czy „aklimatyzują się” w ciągu długiego okresu czasu do warunków mikroklimatycznych w jakich są przechowywane. Taka adaptacja może pociągnąć za sobą bliżej

nieokreślony poziom uszkodzeń, takich jak spękania warstwy zaprawy na większości obrazów zabytkowych, czy deformacja podłoża drewnianego, które zmieniają podatność obiektów zabytkowych na dalsze uszkodzenie w porównaniu z próbkami imitującymi technologie historyczne używanymi w badaniach laboratoryjnych.

Michalski [34] wprowadził pojęcie “dowiedzianej fluktuacji” zdefiniowanej jako największa fluktuacja wilgotności względnej, której obiekt doświadczył w przeszłości. Założył on, że zagrożenie dalszymi uszkodzeniami fizycznymi przez fluktuacje nie przekraczającego dowiedzianej fluktuacji jest znikomo małe. Z czasem Michalski rozszerzył opisaną definicję również na charakter fluktuacji, to jest jej czas trwania, częstotliwość z jaką się powtarza itd. Koncepcja dowiedzianej fluktuacji eliminuje konieczność jakiegokolwiek znajomości fizycznych cech obiektu i mechanizmu jego niszczenia i pozwala na ocenę zagrożenia jedynie na podstawie analizy mikroklimatu historycznego.

Oparte na kryterium aklimatyzacji zalecenia konserwatorskie wskazywały dawniej na konieczność zachowania podobnych warunków klimatycznych przy przenoszeniu obiektów zabytkowych do innych pomieszczeń, na przykład w związku z organizacją wystaw. Z powszechną dostępnością elektronicznych systemów monitorowania warunków klimatycznych, długookresowe pomiary tych warunków pozwalają na matematyczną analizę danych i podawanie ilościowego opisu klimatu historycznego w postaci średnich, oraz zmian długo- i krótkookresowych [35]. Opisy takie mogą stać się ilościowymi zaleceniami co do dopuszczalnych fluktuacji, których nie powinno się przekraczać przy przenoszeniu obiektów do innych pomieszczeń lub zmianie warunków w tych pomieszczeniach, na przykład w wyniku wprowadzenia ogrzewania.

Koncepcja „aklimatyzacji” jest podstawą norm dotyczących określania dopuszczalnych wahań warunków klimatu wspierających ochronę wrażliwych materiałów zabytkowych [36,37]. Należy w tym miejscu mocno podkreślić, że kluczowym założeniem koncepcji “aklimatyzacji” jest brak jakichkolwiek nowych uszkodzeń obiektu w warunkach istniejących w jego otoczeniu.

Ograniczenia obydwu powyższych sposobów wyznaczania dopuszczalnych fluktuacji parametrów klimatu dla konkretnego obiektu zabytkowego w jego specyficznym otoczeniu skłania badaczy do poszukiwania naukowych metod służących precyzyjnej ocenie stanu zachowania zabytkowego obiektu. Koncepcja ta opiera się

na dokładnych pomiarach *in situ* przy pomocy bezkontaktowych układów pomiarowych. Pomiary należy prowadzić w sposób ciągły lub podzielić na etapy, gdzie pierwszy pomiar określa stan wyjściowy obiektu, a kolejny pomiar lub pomiary przeprowadzone po pewnym czasie śledzą rozwój uszkodzeń badanego obiektu.

Jedną z dostępnych technik pomiarowych jest analiza emisji akustycznej badanego obiektu, jako że wszelkie pęknięcia powstałe w nim emitują fale dźwiękowe, które mogą zostać zarejestrowane przez aparaturę badawczą [38,39]. Innym sposobem obserwacji procesu powstawania uszkodzeń jest metoda bazująca na interferometrii plamkowej (DSPI, ESPI) czy też holografii, szczegółowe omówione w rozdziale 6. Metody optyczne są bezkontaktowe, co jest ich dużą zaletą jako że umieszczanie czujników bezpośrednio na badanym obiekcie może być problemem ze względu na wymogi konserwatorskie. Dodatkowo należy zaznaczyć, że metody te są bardzo szybkie i pozwalają bez większych problemów na monitorowanie powierzchni nawet dużych obrazów.

Analiza przydatności laserowych metod optycznych do precyzyjnego monitorowania stanu zachowania powierzchni polichromowanych w rzeczywistych warunkach muzeów i budowli zabytkowych stała się jednym z ważnych zadań badawczych niniejszej rozprawy.

3. Bezkontaktowe metody analizy powierzchni dzieł sztuki

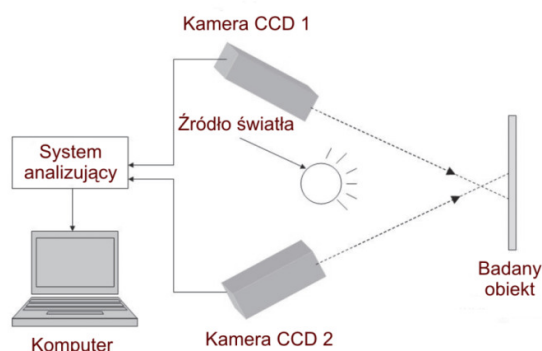
Metody optyczne, dzięki dużej dokładności i nieinwazyjności, znalazły szerokie zastosowanie w badaniach dzieł sztuki. Omawiane w tym rozdziale techniki pomiarowe można podzielić na dwie grupy. Pierwsza grupa zawiera metody pozwalające na precyzyjny opis stanu zachowania powierzchni obiektu, natomiast metody z drugiej grupy mogą być wykorzystywane do wykrywania niewidocznych gołym okiem defektów badanej powierzchni.

3.1. Analiza kształtu powierzchni

3.1.1. Techniki fotogrametryczne

Fotogrametria jest techniką, umożliwiającą odtwarzanie kształtu oraz wymiarów obiektu na podstawie serii zdjęć wykonanych z różnych względem niego pozycji. Fotogrametria jest powszechnie wykorzystywana w zastosowaniach inżynierskich, np. do monitorowania odkształceń konstrukcji budynków [40-41].

Schemat typowego układu fotogrametrycznego przedstawiono na rys. 23.



Rys. 23. Przykładowy układ do pomiarów fotogrametrycznych.

Pomiar polega na rejestracji dwóch serii zdjęć. Serie zdjęć różnią się względnym ustawieniem kamer i obiektu – podczas ich wykonywania możliwe jest zarówno przemieszczanie układu rejestrującego, jak i obiektu. Przed pomiarem definiuje się punkty na badanej powierzchni a analiza zarejestrowanych zdjęć polega na określeniu względnego przesunięcia tych punktów podczas zmiany geometrii układu. W wyniku

analizy zdjęć wykonanych podczas serii geometrycznych przekształceń układu kamera-obiekt można otrzymać trójwymiarową mapę badanej powierzchni. Użycie dwóch kamer pozwala na pomiar odkształceń prostopadłych oraz równoległych do obiektywów obu kamer. W wersji uproszczonej do pomiaru można użyć tylko jednej kamery, jednakże ogranicza to pomiar odkształcenia do kierunku prostopadłego względem obiektywu kamery. Warto wspomnieć także o tym, że do oświetlenia badanego obiektu może być używane światło białe. Dzięki temu zarejestrowane zdjęcia mają wysoki kontrast, co ułatwia ich analizę i poprawia dokładność uzyskiwanych wyników.

Główną zaletą metody fotogrametrycznej jest jej odporność na czynniki zewnętrzne. Jest ona znacznie mniej czuła na „szum środowiskowy” niż metody holograficzne i bez większych problemów można ją stosować do pomiarów *in situ*.

Fotogrametria oraz skanowanie laserowe [44] są szeroko stosowane do analizowania kształtów powierzchni dzieł sztuki [45-47]. Doskonałym przykładem zastosowania systemu z pojedynczą kamerą jest pomiar wykonany na obrazie *Pokłon Trzech Króli* pędzla Leonarda da Vinci [42]. Dzięki przeprowadzonym analizom odtworzono kształt powierzchni obrazu oraz zdefiniowano miejsca, w których geometryczne niejednorodności powierzchni są największe. Innym przykładem może być wykorzystanie tej metody do analizy wpływu procesu oczyszczania na zmiany powierzchni zabytkowego obiektu [43].

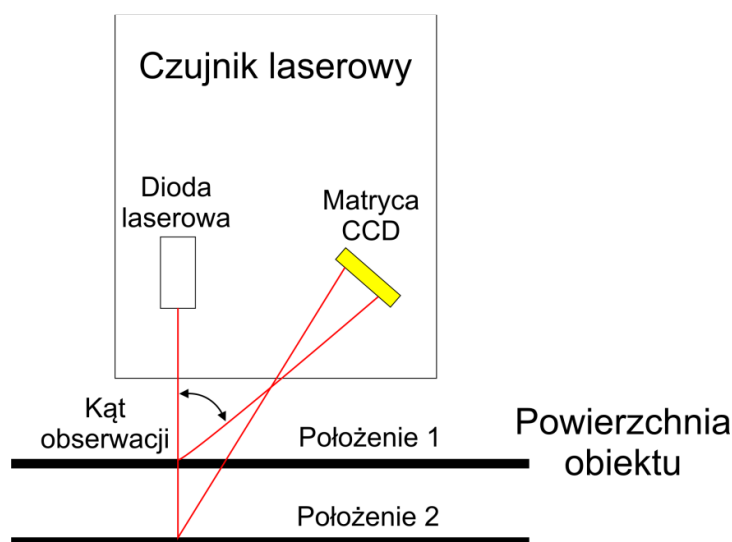
3.1.2. Trójwymiarowe laserowe skanowanie powierzchni

Laserowe skanowanie trójwymiarowe jest bezkontaktową metodą pomiaru kształtu. Dzięki tej metodzie można stworzyć bardzo dokładny cyfrowy model obiektu, który można następnie wykorzystać jako referencję do obrazowania odkształceń jakim on ulega.

Pierwszą czynnością podczas pomiaru jest zdefiniowanie dwuwymiarowej siatki punktów na badanej powierzchni. Następnie kolejne punkty siatki są oświetlane przy pomocy laserowego czujnika triangulacyjnego przesuwającego się nad powierzchnią. W efekcie otrzymujemy się względną wysokość każdego z badanych punktów. W ten sposób powstaje trójwymiarowa mapa powierzchni. Skaner laserowy umożliwia odwzorowanie powierzchni z submilimetrową dokładnością, jest więc idealnym narzędziem do wykonania dokumentacji stanu zachowania obiektu. Pomiary mogą być

prorowadzone z regulowaną dokładnością, dzięki czemu możliwe jest zarówno analizowanie kształtu obiektu, jak i rejestracja przestrzennego rozkładu warstw dekoracyjnych (ważnego w przypadku analiz dzieł sztuki).

Najważniejszą częścią układu pomiarowego jest laserowy czujnik triangulacyjny. Idea metody triangulacji polega na oświetleniu badanego punktu wiązką lasera, a następnie na rejestracji pozycji plamki laserowej na powierzchni obiektu przy pomocy układu optycznego. Schemat laserowego czujnika triangulacyjnego przedstawiono na rys. 24.

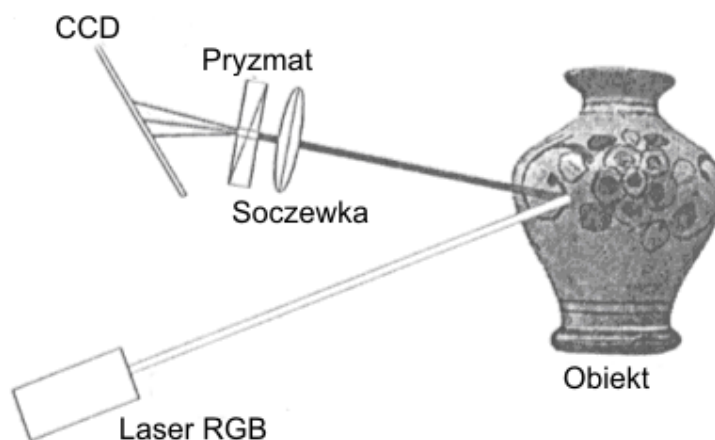


Rys. 24. Schemat laserowego czujnika triangulacyjnego.

W zależności od odległości plamki laserowej od czujnika zmienia się kąt obserwacji a co za tym idzie punkt matrycy CCD, na którym zobrazowana jest plamka lasera. Na podstawie zarejestrowanego położenia plamki na matrycy CCD obliczana jest odległość badanego punktu powierzchni od czujnika. Podczas pomiaru oświetlane są kolejne punkty wcześniej zdefiniowanej siatki dwuwymiarowej i w rezultacie powstaje trójwymiarowa mapa badanego obiektu.

Warto wspomnieć w tym miejscu o metodzie, dzięki której można rejestrować kolor badanej powierzchni. W wersji podstawowej metody triangulacyjnej, w wyniku jakiej otrzymujemy nie ma zawartej informacji o kolorze. Podczas pomiaru można jednak zamiast światła monochromatycznego użyć światła białego będącego mieszaniną trzech podstawowych kolorów: czerwonego, zielonego oraz niebieskiego. Jeżeli przed matrycą CCD umieszczony zostanie pryzmat, który rozszczepia odbite światło na trzy składowe,

to poza informacją dotyczącą położenia badanego punktu względem czujnika otrzymamy informację o natężeniu składowych podstawowych barw odbitych od badanej powierzchni. Opisany układ przedstawiono schematycznie na rys. 25.



Rys. 25. Schemat laserowego czujnika triangulacyjnego RGB.

Najpoważniejszą praktyczną wadą opisanych powyżej technik laserowego skanowania jest długość trwania skanu - pomiar wykonywany jest punkt po punkcie na całej powierzchni. Problem ten może być częściowo rozwiązany poprzez zastosowanie zwierciadeł, które zmieniają położenie plamki na badanym obiekcie bez konieczności poruszania czujnika z punktu do punktu. Obecnie używa się rozwiązań hybrydowych, które łączą te dwie techniki pomiaru.

Skanowanie trójwymiarowe zostało wielokrotnie użyte podczas badań dzieł sztuki. W ten sposób powstały numeryczne modele „Dawida” dłuta Michała Anioła czy też „Mony Lisy” pędzla Leonarda da Vinci [33].

Inną niż czujniki triangulacyjne kategorią mierników, których można użyć do skanowania kształtu powierzchni są czujniki laserowe bazujące na pomiarze czasu przelotu (*time of flight method*). Metoda czasu przelotu polega na pomiarze czasu, po jakim promień laserowy powraca do czujnika po odbiciu od badanej powierzchni. Drogę oblicza się korzystając z faktu, że prędkość światła w powietrzu jest stała i znana. W ten sposób otrzymuje się względną odległość czujnika od obiektu dla ustalonej siatki punktów na powierzchni, co prowadzi do powstania trójwymiarowego modelu obiektu. Zaletą zastosowania czujników czasu przelotu jest możliwość prowadzenia pomiarów na znacznych odległościach np. można w ten sposób stworzyć

model ściany budynku czy też wysokiej kolumny. Natomiast wadą jest jej mała dokładność. Zazwyczaj wynosi ona kilka milimetrów, co jednak w porównaniu z wymiarami badanych obiektów może być zadowalające.

3.1.3. Topografia mory

Topografia mory jest rodzajem techniki fotogrametrycznej. Prążki mory powstają na skutek nakładania się dwóch siatek linii obróconych o pewien kąt lub zniekształconych względem siebie [48,49]. Obraz uzyskuje się przez oświetlenie badanej powierzchni światłem przechodzącym przez periodyczną matrycę. Struktura jasnych i ciemnych pól może być liniowa, prostokątna, sinusoidalna lub jeszcze inna. Obraz badanej powierzchni pokrytej siatką jasnych i ciemnych obszarów rejestrowany jest przy pomocy kamery CCD, przed którą umieszczona jest kolejna periodyczna matryca. W wyniku nałożenia obu siatek powstają prążki mory [50]. Obraz prążków po zarejestrowaniu oraz przetworzeniu przez odpowiednie oprogramowanie pozwala na niezwykle precyzyjne określenie kształtu przedmiotu, na którym wyświetlono siatkę referencyjną. Istnieje wiele metod pomiarowych opartych o efekt mory takich jak np. analiza naprężeń [51], analiza wibracji [52], mapowanie konturowe [53], analiza medyczna [49].

Metoda Mory pozwala na szybkie i dokładne pomiary topograficzne powierzchni. Jednym z najbardziej znanych pomiarów wykorzystujących metodę prążków mory do badań dzieł sztuki była analiza powierzchni obrazu Leonarda da Vinci „Mona Lisa” [33].

Wadą tej techniki jest konieczność bardzo dokładnego wykonania siatki dyfrakcyjnej oraz jej stabilnego umieszczenia przed źródłem światła. Ten ostatni problem można rozwiązać używając projektorów cyfrowych, w których sygnał świetlny jest modulowany przestrzennie [54].

3.2. Analiza defektów powierzchni

3.2.1. Interferometria holograficzna

Interferometria holograficzna [55-57] jest techniką pomiarową opartą na rejestracji obrazów interferencyjnych. Jej głównym celem jest precyzyjna analiza zmian kształtu obiektu poddawanego różnorodnym wywołującym te zmiany procesom. Najczęściej stosowaną odmianą tej metody jest podwójna ekspozycja. Polega ona na rejestracji i późniejszym odtworzeniu dwóch zdjęć holograficznych: przed i po odkształceniu obiektu [58,59]. Podczas jednoczesnej rekonstrukcji obu hologramów wiązki obrazowe doprowadza się do interferencji otrzymując obraz złożony z prążków, których układ świadczy o rozkładzie odkształceń obiektu. Interferometria holograficzna umożliwia pomiary bardzo małych odkształceń powierzchni – rzędu długości fali użytego światła laserowego. Metoda jest bardzo szybka i stosowana zwłaszcza przy badaniach obciążeniowych konstrukcji (mostów, silników, kadłubów statków itp.) ale także w konserwacji zabytków gdzie niewielkie podgrzanie obiektu zmienia wielkość odspojenia pod warstwą malarską.

Odmianą interferometrii holograficznej pozwalającej na wykonywanie pomiarów w czasie rzeczywistym jest metoda pojedynczej ekspozycji. Polega ona na stworzeniu hologramu, a następnie odtworzeniu go na powierzchni badanego obiektu. Podczas zmian metrycznych obiektu na powierzchni powstają prążki interferencyjne, które pozwalają na zlokalizowanie i ilościową analizę odkształceń. Zaletą tej techniki jest to, że zmiany kształtu obiektu można śledzić na podstawie jednego hologramu. Jednak dokładność pomiaru mocno zależy od precyzji umieszczenia hologramu podczas odtwarzania w miejscu, gdzie był on zarejestrowany – wymagana jest dokładność rzędu długości fali użytego w pomiarach światła. Dodatkową trudnością praktyczną jest niski, w porównaniu z innymi technikami interferometrycznymi, kontrast powstających prążków.

Techniki interferometrii holograficznej są stosowane w badaniu zabytkowych obiektów już od lat siedemdziesiątych zeszłego wieku [58-63]. Niestety metody te ze względu na swą czułość na wszelkie zaburzenia warunków otoczenia wykonywane są w laboratoriach i nie mogą być stosowane do badań *in situ*. Pomiary holograficzne wiążą się więc z koniecznością przewożenia diagnozowanych obiektów zabytkowych do laboratoriów co często jest bardzo trudne bądź niemożliwe.

3.2.2. Interferometria plamkowa

Interferometria plamkowa (ESPI - *Electronic Speckle Pattern Interferometry*) jest odmianą interferometrii holograficznej opartej na analizie światła laserowego rozproszonego na optycznie chropowatej powierzchni. W procesie interferencji biorą udział dwie wiązki: pierwsza oświetla badaną powierzchnię, a odbite od niej światło interferuje z drugą tzw. wiązką odniesienia (może to być wiązka równoległa bądź wiązka rozproszona na chropowatej powierzchni). Wynik interferencji rejestrowany jest przy pomocy kamery. Analiza powstających prążków pozwala na określenie miejsc, w których występują defekty (nieregularności) powierzchni (takie jak np. odspojenia pod warstwą dekoracyjną czy mikropęknięcia). Technika ta została wykorzystana podczas badań będących przedmiotem niniejszej pracy. Szczegółowy opis układu eksperymentalnego oraz zastosowanych metod analizy obrazów znajduje się w rozdziale 6.2.

Pierwsze, praktyczne próby zastosowania interferometrii plamkowej do metrologii przypadają na lata siedemdziesiąte zeszłego wieku. Rozwój tej techniki napotkał jednak na poważne trudności ze względu na niską rozdzielczość dostępnych kamer oraz niedużą moc obliczeniową komputerów. Dopiero od początku lat dziewięćdziesiątych, dzięki zastosowaniu cyfrowych metod zapisu obrazu (zastąpieniu kamer wideo przez matryce CCD) technika ta zaczęła rozwijać się bardzo dynamicznie. Zyskała ona wtedy nową nazwę DSPI - *Digital Speckle Pattern Interferometry*, tak że obecnie obie nazwy stosowne są zamiennie.

Według autorów publikacji [64] interferometrii plamkowej po raz pierwszy użyto do pomiarów dzieł sztuki w roku 1993. Wykonano wtedy badania *in situ* stanu zachowania malowideł ściennych [65]. Natomiast jedno z pierwszych zastosowań ESPI do badań *in situ* zostało wykonane w roku 1997 i dotyczyło badania stanu zachowania mozaik [66]. W obu przypadkach wykrywanie defektów odbywało się poprzez analizę zmian metrycznych powierzchni wywołanych jej podgrzaniem.

3.2.3. Wibrometria laserowa

Wibrometria laserowa jest bezkontaktową metodą detekcji defektów powierzchni pokrytych warstwami dekoracyjnymi. Metoda polega na obserwacji wymuszonych drgań powierzchni badanego obiektu.

Pomiar, podobnie jak w przypadku skanowania laserowego (patrz rozdział 1.1.2), polega na rejestracji pozycji plamki laserowej przy pomocy czujnika triangulacyjnego w wybranych punktach na powierzchni obiektu. W trakcie tej czynności badana powierzchnia jest wzbudzana do drgania przez głośniki lub elementy piezoelektryczne (w tym drugim przypadku konieczny jest fizyczny kontakt między elementem piezoelektrycznym a powierzchnią). Podczas pomiaru głośnik emituje biały szum a częstotliwość drgania punktu na powierzchni obiektu wyznacza się przy pomocy transformacji Fouriera. Procedura powtarzana jest dla zdefiniowanej siatki punktów, co w efekcie prowadzi do powstania mapy drgania powierzchni. Gdy badana powierzchnia jest jednorodna to drgania wszystkich punktów płaszczyzny są takie same. Jeśli jednak znajdują się na niej defekty (np. odspojenia warstwy dekoracyjnej) to ich drgania w odpowiedzi na wymuszającą falę dźwiękową są inne niż obszarów mocno zespolonych z podłożem. Metoda pozwala więc na wytworzenie mapy defektów badanego obszaru.

Badania wibrometryczne można przeprowadzić również wykorzystując laserowy czujnik dopplerowski [67-69]. W tym przypadku najpierw rejestrowana jest zmiana częstotliwości światła odbitego od drgającej powierzchni a następnie na podstawie zarejestrowanych zmian częstotliwości określana jest częstość drgań poszczególnych punktów badanego obszaru. Procedura pomiarowa, tak jak w przypadku użycia czujnika triangulacyjnego, jest przeprowadzana punkt po punkcie na całej badanej powierzchni.

Zaletą wibrometrii laserowej jest możliwość selektywnego obrazowania różnych typów uszkodzeń. Ponieważ każdy defekt jest unikatowy (ma inną powierzchnię, masę itp.) to posiada również inną częstotliwość rezonansową drgań. Dzięki temu, używając w procesie wzbudzania zamiast białego szumu dźwięku o wąskim zakresie częstotliwości możliwe jest na przykład selektywne wykrywanie odspojenia o wybranym rozmiarze. Dodatkową zaletą wibrometrii laserowej jest łatwość użycia metody w trudnych warunkach pomiarowych.

Metodę tą wykorzystano wiele razy podczas badań dzieł sztuki [67-69].

3.2.4. Termografia

Termografia jest szybką, nieniszczącą i bezdotykową metodą pozwalającą na wykrywanie defektów i niejednorodności materiału znajdujących się pod powierzchnią warstwy malarskiej. Niewielkie podgrzanie obiektu powoduje wzrost temperatury badanej powierzchni a następnie dyssypację energii przez promieniowanie i przewodnictwo cieplne. Szybkość stygnięcia powierzchni zależy od przewodnictwa cieplnego, pojemności cieplnej materiału, oraz spoistości kolejnych warstw obrazu. Defekty i odspojenia w głębszych warstwach powodują powstanie bariery dla przepływu ciepła i w efekcie pojawiają się cieplejsze obszary na jego powierzchni. Detekcja uszkodzeń jest bardzo szybka (kilkusekundowa) a rejestrowanie sygnału w funkcji czasu pozwala na zlokalizowanie głębokości niewidocznych defektów materiału.

Podstawowymi aktywnymi technikami termograficznymi są termografia impulsowa (*pulsed thermography*) [70], termografia podgrzewania (*heating up thermography*) [71] oraz termografia lock-in (*lock-in thermography*) [72]. Różnią się one od siebie techniką ogrzewania badanego obiektu oraz metodą analizy danych pomiarowych.

Metoda impulsowa polega na wygenerowaniu przy pomocy lamp promieniowania podczerwonego krótkiego impulsu cieplnego i skierowaniu go na badany obiekt. Przy pomocy kamery termowizyjnej rejestrowany jest przebieg stygnięcia badanego obiektu. Najprostszą metodą analizy danych jest obserwacja różnic temperatury powierzchni na kolejnych klatkach zarejestrowanego filmu. Największą wadą tej metody jest duży stosunek szumu do sygnału. Poprawa jakości sygnału możliwa jest przez zwiększanie energii impulsu grzewczego. W praktyce prowadzi to często do podniesienia temperatury powierzchni o kilkadziesiąt stopni Celsjusza podczas kilkudziesięciu milisekund ogrzewania powierzchni.

Termografia podgrzewania polega na jednostajnym i jednorodnym ogrzewaniu badanego obiektu i równoczesnym rejestrowaniu tego procesu przez kamerę termowizyjną. Układ pomiarowy wykorzystujący tą technikę oraz proces analizy danych jest taki sam jak w przypadku metody impulsowej. Zaletą tej metody jest dużo niższy, w stosunku do techniki impulsowej, stosunek szumu do sygnału, jednak

warunkiem uzyskania poprawnych wyników jest jednorodne podniesienie temperatury na całej badanej powierzchni.

Ostatnią z najpopularniejszych metod termograficznych jest metoda lock-in polegająca na modulowaniu natężenia promieniowania podczerwonego podgrzewającego badany obiekt. Metoda ta wykorzystuje teorię fal termicznych, które otrzymuje się poprzez ogrzanie badanej powierzchni używając źródła ciepła o modulowanym natężeniu. Najczęściej stosuje się modulację sinusoidalną. Następnie używając kamery termowizyjnej rejestruje się oscylacje temperatury na badanej powierzchni. Dzięki temu można wyznaczyć przesunięcie fazowe między temperaturą powierzchni a emitowanymi falami ciepła. Przesunięcia fazowe przy zadanej częstotliwości są funkcją dyfuzyjności cieplnej, której wartość zależy od właściwości badanej powierzchni czyli pozwala na lokalizację jej odspojonych fragmentów. Minusem metody lock-in jest jej poziom skomplikowania. Wymaga ona modulacji źródła ciepła i synchronizacji czasowej kamery termowizyjnej z elementami podgrzewającymi. Jednakże wyniki otrzymane tą techniką są dużo dokładniejsze od wyników uzyskiwanych przy pomocy obu opisanych powyżej metod termograficznych.

W porównaniu do innych technik pomiarowych, termografia jest jedną z najszybszych i najmniej wrażliwych na czynniki zewnętrzne metod, co pozwala na szerokie zastosowanie jej *in situ* do badań dzieł sztuki [70,73].

4. Cel Pracy

Głównym celem pracy jest wyznaczenie na drodze eksperymentalnej krzywej zmęczenia warstwy dekoracyjnej na drewnie, czyli zależności krytycznej wartości odkształcenia rozciągającego, dla którego następuje uszkodzenie tej warstwy, od liczby powtarzających się cykli rozciągających. W ten sposób praca ma ambicję istotnego pogłębienia opisu odpowiedzi drewna polichromowanego jako obiektu fizycznego na zmiany parametrów mikroklimatu w otoczeniu w stosunku do opisu dotychczas istniejącego w literaturze przedmiotu. Jak podano to szczegółowo w rozdziale 2, opis ten oparty był na oddzielnych pomiarach zmian wymiarowych i właściwości mechanicznych poszczególnych warstw budujących polichromię na drewnie oraz arbitralne wyznaczenie odkształcenia krytycznego warstwy dekoracyjnej w jednym cyklu odkształcenia, tj. bez uwzględnienia zmęczenia.

Do rozwiązania postawionego zadania badawczego opracowano unikatową, nieznana literaturze przedmiotu metodykę polegającą na poddaniu próbek imitujących zabytkowe drewno polichromowane seriom cykli rozciągających, których amplituda naśladowała odpowiedź drewna na zmiany wilgotności względnej otoczenia. Liczba cykli dla każdej próbki wynosiła 36500 co dla bodźców powtarzających się codziennie odpowiada stu latom przechowywania obiektu.

Bardzo istotnym założeniem pracy jest uznanie za „uszkodzenie” każdej nieodwracalnej zmiany materiałowej, stąd istotnym celem stało się wykorzystanie różnych technik interferometrii plamkowej oraz procedur analizy obrazu do jak najdokładniejszej detekcji i ilościowego odwzorowania pęknięć i odspojień warstwy dekoracyjnej. W ten sposób przeprowadzone badania podają bardzo zachowawcze poziomy odkształceń krytycznych, odniesionych do pierwszych uszkodzeń warstwy dekoracyjnej na poziomie mikrometrycznym.

W miarę postępu pracy pojawiła się perspektywa zastosowania opracowanych technik ilościowego pomiaru mikrouszkodzeń do diagnozowania rzeczywistych polichromii na drewnie w muzeach i obiektach zabytkowych. Podjęto to wyzwanie opracowując przenośny interferometr plamkowy i metodykę pracy poza laboratorium, i udowadniając jej przydatność w badaniach zabytkowego ołtarza w kościele w Hedalen w Norwegii oraz obrazów na desce ze zbiorów Muzeum Narodowego w Krakowie.

Ostatnim zadaniem badawczym pracy było wyznaczenie dopuszczalnych amplitud wahań mikroklimatu, wywołujących odkształcenia polichromii poniżej poziomu krytycznego.

5. Badane materiały

5.1. Drewno lipy

Lipa (z łaciny *Tilia*) należy do gromady okrytozalążkowych, klasy drzew dwuliściennych, podklasy bezpłatkowych i wolnopłatkowych oraz tworzy rodzinę lipowatych. Obecnie znanych jest 20 gatunków tego drzewa.

W Polsce występują dwa gatunki lipy dziko rosnącej :

- Lipa drobnolistna - występuje w Polsce jako domieszka w niższych lasach liściastych. W zależności od warunków rozwojowych może występować w piętrze dolnym i górnym drzewostanu. W wieku pomiędzy 300 a 350 lat osiąga wysokość 42 m i średnicę pnia równą około 2 m. Ten rodzaj lipy zasięgiem obejmuje prawie całą Europę i sięga na północ do Szwecji i Norwegii oraz przez Finlandię aż po Ural. Nie występuje w północnej Skandynawii i w obszarze morza Śródziemnego.
- Lipa wielkolistna nazywana często szerokolistną. Swym zasięgiem obejmuje środkową i południową Europę. Występuje do 50 równoleżnika północnej szerokości geograficznej. Występuje w Hiszpanii i w południowych Włoszech. Na wschód sięga Morza Czarnego oraz zachodniej części Ukrainy i Mołdawii, ale nie występuje na Nizinie Węgierskiej.

Izotermie sorpcji pary wodnej oraz zmiany wymiarowej dla drewna lipowego przytoczono w rozdziałach 1.1.1 i 1.1.2.

Historycznie lipa była jednym z najbardziej poszukiwanych materiałów rzeźbiarskich, czego przykładem jest najsłynniejsze w Polsce arcydzieło rzeźby średniowiecznej ołtarz Wita Stwosza w kościele Mariackim w Krakowie. To szerokie zastosowanie drewna lipowego, przede wszystkim jako materiału artystycznego na przestrzeni wieków i obecnie, spowodowało, że gatunek ten został wybrany do badań opisanych w niniejszej rozprawie.

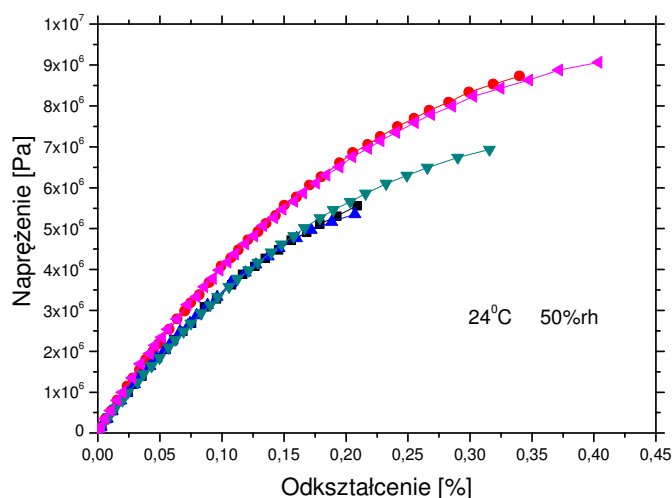
Wszystkie przygotowane próbki zostały wycięte z drewna, które wcześniej było sezonowane i przechowywane w naturalnych warunkach klimatycznych przez okres około 10 lat. Użycie takiego drewna wynika z długiej tradycji stosowania przez rzeźbiarzy materiału, odpowiednio wysezonowanego i wolnego od naprężeń. Materiał

używany do badań laboratoryjnych wycinano tak, by był jak najbliższy idealnemu, tzn. bez żadnych spękań, czy sęków.

5.2. Zaprawa

Zaprawa malarska użyta do wytwarzania imitacji próbek historycznych składała się z kredy szampańskiej oraz kleju zajęczego (oba składniki zostały uzyskane od firmy Kremer). Próbki imitujące strukturę zabytkowych polichromii na drewnie wykonał dyplomowany konserwator dzieł sztuki, stosując recepturę zaprawy optymalną z jego punktu widzenia, czyli taką jaką by zastosowano do rekonstrukcji ubytków zaprawy oryginalnej w pracach konserwatorskich. Objętościowa zawartość wypełniacza (parametr PVC) wyniosła 92%, co jest zgodne z typowymi recepturami malarskich zapraw gruntowych stosowanych historycznie. Zaprawę nakładano warstwami (zazwyczaj 6 warstw) na deski zagruntowane czystym klejem, odczekując około 1 dnia na wyschnięcie kolejnej warstwy, aż do osiągnięcia oczekiwanej grubości całkowitej wynoszącej około 1 mm.

Zależności odkształcenia od naprężenia rozciągającego dla zaprawy stosowanej w niniejszej pracy pokazano na rys. 26.



Rys. 26. Naprężenie w funkcji odkształcenia dla zaprawy stosowanej w niniejszej pracy.

Odczytana z nich granica sprężystości wynosi 0,1% a odkształcenie krytyczne powodujące pęknięcie zaprawy wynosi 0,2-0,4%. Rozbieżność spowodowana jest przez trudności związane z przygotowaniem identycznych próbek ponieważ były one bardzo

kruche oraz małe. Jednakże wyznaczone parametry znacznie wyższe od podanych w pracach Mecklenburga [30] parametrów zapraw o podobnym składzie, które omówiono w rozdziale 1.2.2. Różnice wynikają zapewne z lepszych parametrów mechanicznych kleju stosowanego w obecnych badaniach.

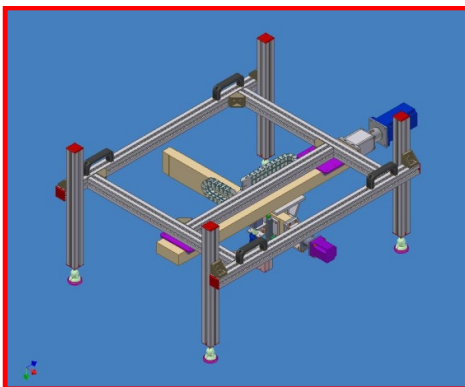
W oparciu o literaturę przedmiotu [74-75] podjęto próby poddania zaprawy klejowej przyspieszonemu starzeniu przez przetrzymywanie jej przez okres do 6 tygodni w warunkach podwyższonej temperatury i wilgotności względnej (70°C i 80%rh). Ponieważ nie stwierdzono zauważalnej zmiany odpowiedzi mechanicznej próbek w zależności od czasu starzenia, próbki warstwy zaprawy na deskach badane w pracy nie poddano w końcu żadnym zabiegom starzeniowym.

6. Zastosowane metody doświadczalne

6.1. Profilometr laserowy

Profilometr laserowy jest urządzeniem, dzięki któremu można tworzyć bardzo dokładne mapy cyfrowe interesujących nas obiektów.

Układ pomiarowy oparty jest na triangulacyjnym czujniku laserowym, który mierzy odległość sensora od powierzchni obiektu. Prowadząc promień lasera po tej powierzchni dostajemy w efekcie jej trójwymiarowe odwzorowanie. Schemat profilometru użytego do pomiarów przedstawiono na rys. 27.



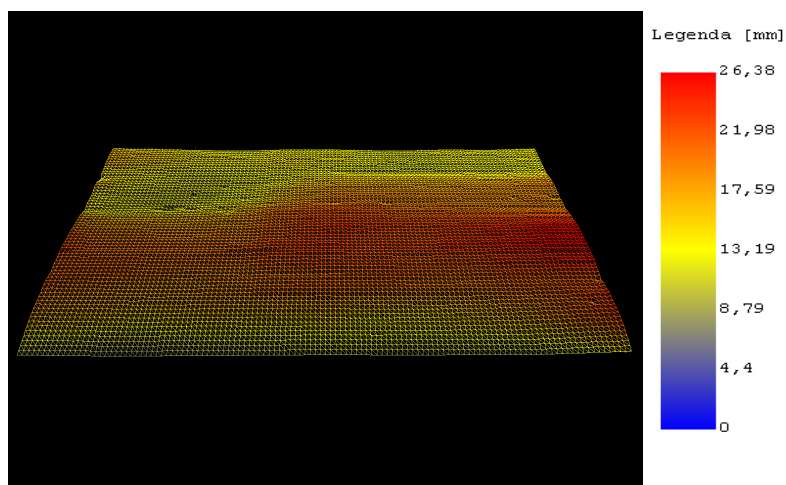
Rys 27. Schemat układu pomiarowego.

Sensor laserowy jest przesuwany ponad badanym obiektem wzdłuż prowadnic, które umożliwiają ruch po prostych w kierunkach poziomych. Ruch czujnika kontrolowany jest za pomocą silników krokowych. Czujnik laserowy jest zamocowany prostopadle do szyny prowadzącej przy pomocy śruby mikrometrycznej. Śruba ta umożliwia ruch w kierunku prostopadłym do badanego obiektu. Jej ruch jest sterowany za pomocą kolejnego silnika krokowego. Maksymalna rozdzielczość pozioma, jaką można uzyskać to $0,025 \times 0,025$ mm. Rozdzielczość pionowa zależy od użytego do danego pomiaru czujnika triangulacyjnego. W prowadzonych badaniach używano dwóch różnych czujników. Pierwszy miał zasięg pomiaru równy 10 cm oraz dokładność pomiaru 0,2 mm. Drugi z czujników miał zasięg pomiaru równy 2 mm i dokładność pomiaru 5 μ m. Wybór czujnika zależał od wymaganej dokładności pomiarów.



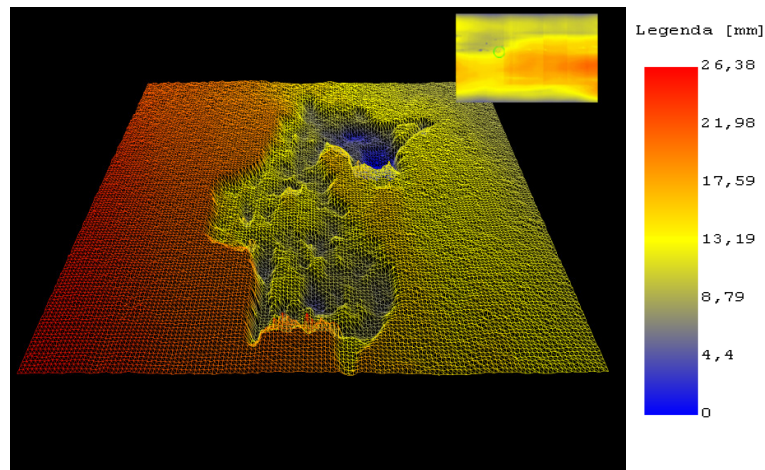
Rys. 28. Zdjęcie obrazu Lucasa Cranacha Starszego *Chrystus błogosławiący dzieci*.

Przykładem pomiaru jaki został przeprowadzony przy użyciu tego profilometru laserowego było stworzenie trójwymiarowej mapy obrazu Lucasa Cranacha Starszego *Chrystus błogosławiący dzieci* ze zbiorów Zamku Królewskiego na Wawelu (rys. 28). Mapa zawiera precyzyjne informacje dotyczące stanu zachowania tego obrazu, co w przyszłości, po zakończeniu procesu konserwacji pozwoli na porównanie jego stanu sprzed prac ze stanem po ich zakończeniu. Na rys. 29 przedstawiono trójwymiarową mapę obrazu.



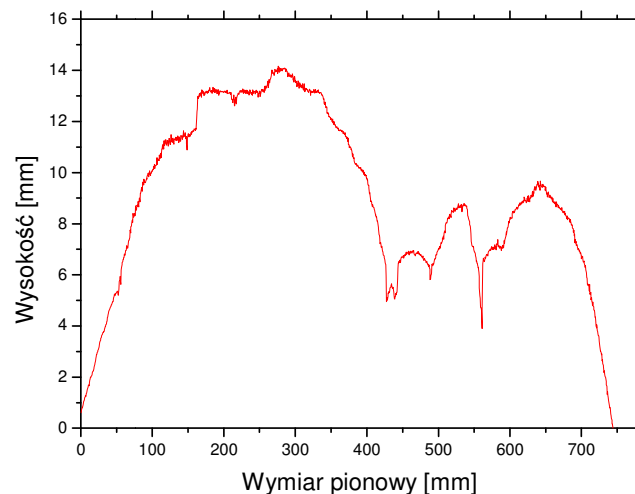
Rys. 29. Trójwymiarowe odwzorowanie powierzchni obrazu Lucasa Cranacha Starszego *Chrystus błogosławiący dzieci*.

Na rys. 30 przedstawiono odwzorowanie jednego z zarejestrowanych defektów.



Rys 30. Jeden z defektów obrazu Lucasa Cranacha Starszego *Chrystus błogosławiący dzieci*.

Opisane pomiary zostały przeprowadzone przy użyciu mniej dokładnego czujnika laserowego jako że głównym stawianym pytaniem był stan odkształcenia czterech desek na których obraz został namalowany. Na rys. 31 przedstawiono wykres ilustrujący jeden z przekrojów tego obrazu, który pokazuje jego odkształcenia, stanowiące najbardziej istotny problem konserwatorski.



Rys. 31. Przekrój zarejestrowany w połowie szerokości obrazu Lucasa Cranacha Starszego *Chrystus błogosławiący dzieci*.

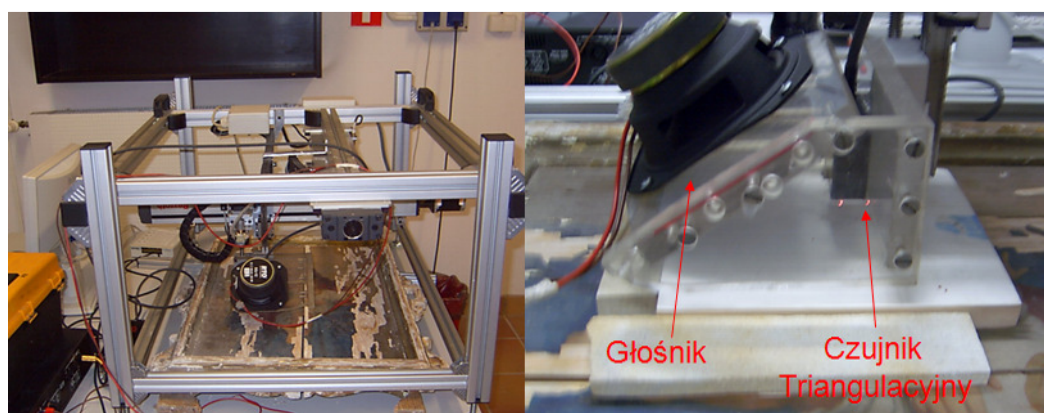
Poza badaniem stanu zachowania powierzchni malarskiej profilometr laserowy został wykorzystany do badań dotyczących wyznaczenia dopuszczalnych fluktuacji parametrów mikroklimatycznych dla drewna polichromowanego. Dzięki temu

urządzeniu udało się wyznaczyć przebieg czasowy odpowiedzi drewna na zmiany wilgotności względnej. Pomiar polegał na rejestrowaniu wybranego profilu deski w otoczeniu której zaszła skokowa zmiana tego parametru. Pomiar prowadzono aż do ustalenia się nowego stanu równowagi. Zgromadzone dane zostały później wykorzystane podczas modelowania komputerowego zachowania drewna w zmiennych warunkach mikroklimatycznych.

W tym miejscu warto zaznaczyć że profilometr może działać także jako wibrometr laserowy. W tym celu w okolicy czujnika laserowego można zamontować głośnik i przy jego pomocy wymuszać drgania badanych powierzchni.

6.2. Badania przy pomocy wibrometru laserowego

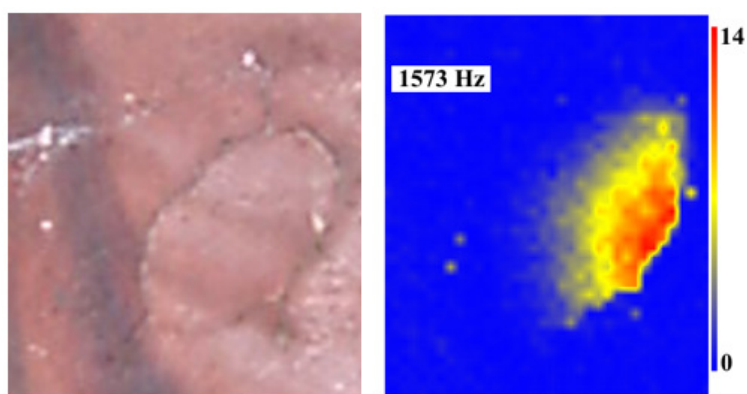
Na rys. 32 przedstawiono wykorzystany do badań układ pomiarowy.



Rys. 32. Wibrometr laserowy wykorzystany do pomiarów. Po prawej stronie znajduje się zbliżenie czujnika pomiarowego.

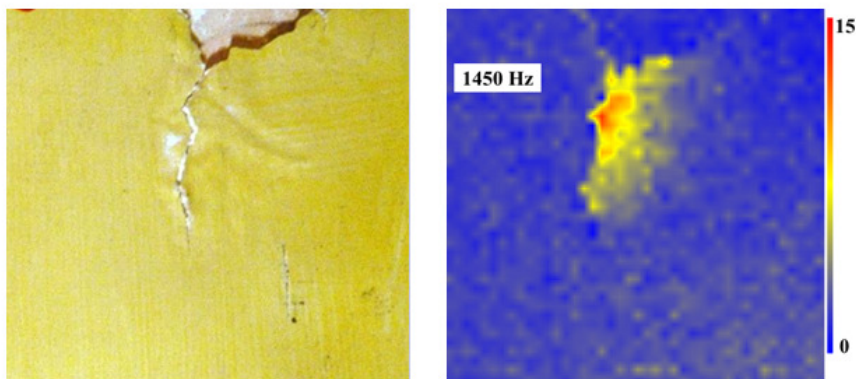
Brak adhezji pomiędzy warstwą malarską a podłożem drewnianym umożliwia wzbudzenie odspojonego fragmentu do drgań harmoniczych, których częstotliwość zależy od charakterystyki danego odspojenia. Drgania takie mogą być wymuszone przy pomocy głośnika. W zbudowanym układzie pomiarowym zastosowano wzbudzanie drgań przy pomocy sygnału imitującego biały szum, co jest równoważne pobudzaniu wszystkimi częstotliwościami w zakresie możliwości wykorzystanego głośnika. Drgania badanej powierzchni rejestrowano przy pomocy laserowego czujnika triangulacyjnego. Dla zarejestrowanego sygnału robiono transformację Fouriera, dzięki

czemu można było wyznaczyć częstotliwość charakterystyczną dla drgania danego punktu powierzchni. Tę procedurę powtarzano dla każdego punktu na wcześniej zdefiniowanej siatce pomiarowej obejmującej badaną powierzchnię. Dzięki wykorzystaniu tej metody pomiarowej udało się zlokalizować odspojenia warstwy malarskiej. Przykładowe wyniki pomiarów przedstawiono na rys. 33 oraz 34.



Rys. 33. Po prawej stronie mapa przedstawiająca zarejestrowane drganie badanej powierzchni zabytkowej polichromii przy częstotliwości 1573 Hz. Amplituda drgania została oznaczona kolorem, którego skala przedstawiona jest po prawej stronie (wyrażona w mikrometrach). Po lewej stronie znajduje się zdjęcie badanej powierzchni.

Znaczącym ograniczeniem stosowanej metody jest częstość próbkowania czujnika triangulacyjnego, która wynosiła maksymalnie 10 kHz. Zgodnie z twierdzeniem Nyquista przy tej częstotliwości próbkowania można wyznaczyć jedynie drgania o częstotliwości nie większej aniżeli 5 kHz. W tym miejscu należy też wspomnieć, że ze wzrostem częstotliwości próbkowania rejestrowany sygnał był coraz gorszej jakości, co mogło prowadzić do przeoczenia drgań o niedużych amplitudach rzędu kilku mikrometrów. Drugą znaczącą niedogodnością był czas trwania pomiaru, który na przykład dla powierzchni rzędu kilkunastu centymetrów kwadratowych i odległością punktów pomiarowych 0,5 mm trwał około 2h.



Rys. 34. Po prawej stronie mapa przedstawiająca zarejestrowane drganie badanej powierzchni imitacji zabytkowej polichromii przy częstotliwości 1450 Hz. Amplituda drgania została oznaczona kolorem którego skala przedstawiona jest po prawej stronie (wyrażona w mikrometrach). Po lewej stronie znajduje się zdjęcie badanej powierzchni.

Dlatego też zrezygnowano z tej metody monitorowania rozwoju uszkodzeń warstwy dekoracyjnej i w zasadniczym programie pomiarowym stosowano do tego zadania interferometrię plamkową.

6.3. Interferometr plamkowy

Światło laserowe rozproszone na optycznie chropowatej powierzchni tworzy ziarnisty (składający się z jasnych i ciemnych plamek - spekli) obraz, powstający w wyniku interferencji pomiędzy wieloma, przesuniętymi w fazie wiązkami światła. Ponieważ światło laserowe zachowuje spójność w obszarze pojedynczej spekli, losowe pole plamkowe może brać udział w procesie interferencji. Interferometria plamkowa jest, zarówno z punktu widzenia opisu teoretycznego jak i metody wykonywania pomiarów, techniką bardzo podobną do holografii. Jednak, mimo iż obie metody mają porównywalną czułość i dokładność, pomiary holograficzne są znacznie trudniejsze do przeprowadzenia. Największą praktyczną trudnością podczas rejestracji hologramu jest konieczność mechanicznej stabilizacji układu pomiarowego w celu ograniczenia jego drgań i wibracji. Urządzenia pomiarowe wykorzystujące interferometrię plamkową są dużo mniej wrażliwe na szum środowiskowy, dzięki czemu mogą być efektywnie wykorzystywane do pomiarów poza laboratorium.

W holografii spekle były na początku uważane za szum, pogarszający jakość rejestrowanych i odtwarzanych obrazów. Szybko jednak zdano sobie sprawę, że ten niechciany szum niesie w sobie informację na temat kształtu oświetlanej powierzchni [76].

Proces tworzenia obrazu interferencyjnego można opisać za pomocą dobrze znanej formuły interferencyjnej dwu wiązek świetlnych:

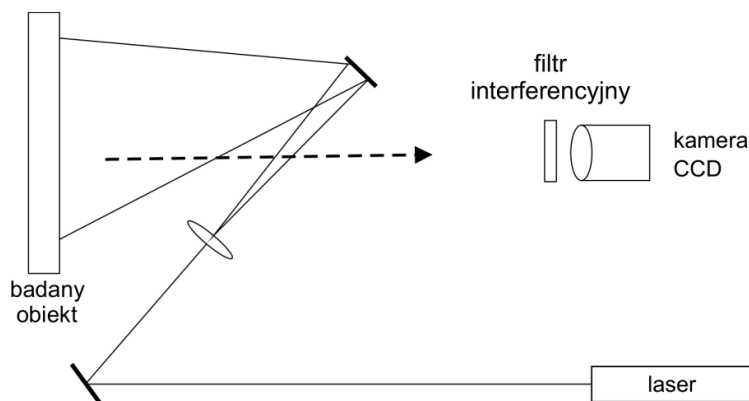
$$I = I_1 + I_2 + 2I_1I_2 \cos \phi \quad (15)$$

gdzie I_1 oraz I_2 oznaczają natężenia dwu interferujących wiązek natomiast ϕ określa różnicę faz pomiędzy tymi wiązkami. W ogólności, wielkość różnicy faz może być wyznaczona w oparciu o pomiar natężenia światła I . W przypadku obrazu plamkowego jest to skomplikowane, gdyż podczas deformacji obiektu natężenie światła w każdym punkcie powierzchni zmienia się w sposób nieprzewidywalny. Pomimo losowego charakteru pola plamkowego powstało wiele efektywnych algorytmów statystycznych umożliwiających prowadzenie ilościowych pomiarów metrycznych w oparciu o analizę obrazów plamkowych. Główną motywacją do opracowywania takich algorytmów jest wysoka precyzja i łatwość zastosowania interferometrów plamkowych w sytuacjach, w których inne metody pomiarowe nie zdają egzaminu.

6.3.1. Pomiar metodą Cyfrowej Korelacji Obrazu (DIC)

Cyfrowa korelacja obrazu (DIC ang. *Digital Image Correlation*) jest jedną z najprostszych metod opartych na analizie obrazu plamkowego, którą można zastosować do pomiarów uszkodzeń powierzchni [77-80]. Schemat zbudowanego przez autora pracy układu doświadczalnego przedstawiono na rys. 35. Badana powierzchnia jest oświetlana przez ciągłą wiązkę światła pompowanego diodą jednodomowego lasera Nd:Yag (Powertechnology LDCU58437) o mocy 100 mW i długości fali 532 nm (druga harmoniczna). Rozproszone światło jest rejestrowane przez kamerę CCD (BCi4-6600 CCD – matryca CCD 12 bitowa o pojemności 6,6 MPikseli i wymiarach jednego piksela 3,5 x 3,5 μm). Przed matrycą kamery umieszczony jest filtr interferencyjny, który przepuszcza jedynie światło lasera (o długości fali 532 ± 1 nm). Pozwala on na

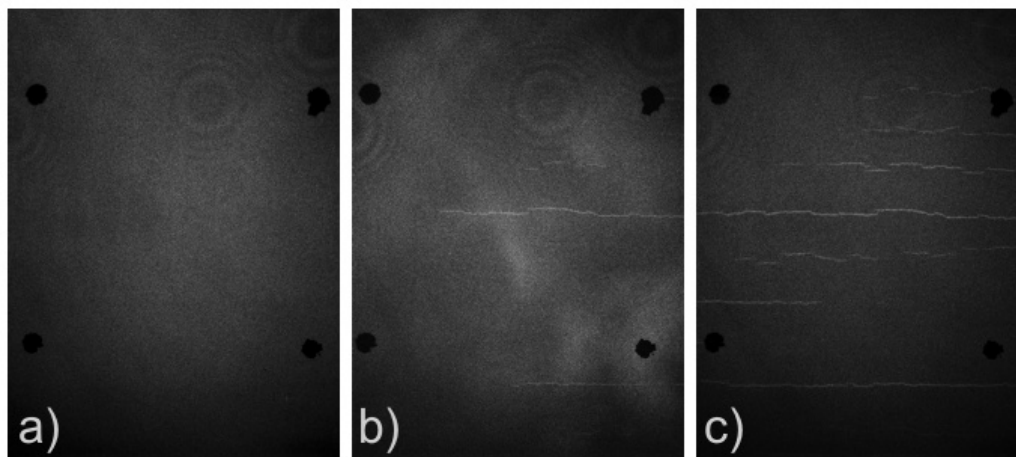
usunięcie zakłóceń pochodzących od znajdujących się w pobliżu układu pomiarowego źródeł światła.



Rys. 35. Schemat układu doświadczalnego dla pomiarów metodą DIC.

Podczas pomiaru kamera rejestruje obraz plamkowy powstający w wyniku rozproszenia światła laserowego na badanej powierzchni. W trakcie pomiarów DIC wykorzystywano wzbudzenie termiczne. Powierzchnię obiektu podgrzewano (wykorzystując strumień ciepłego powietrza lub światło lampy halogenowej), a następnie rejestrowano obraz plamkowy podczas procesu jej stygnięcia. Wszelkie niejednorodności powierzchni wpływają na tempo jej chłodzenia i w efekcie powodują powstanie przestrzennego rozkładu temperatury, który odpowiedzialny jest za deformacje powierzchni. Deformacja porównywalna z długością fali światła laserowego powoduje zmiany w rozmieszczeniu spekli na badanej powierzchni. Wizualizacja takich zmian jest możliwa poprzez odjęcie od siebie dwóch zarejestrowanych przez kamerę CCD interferogramów (przed i po deformacji).

Cyfrowa korelacja obrazu okazała się bardzo skuteczną metodą obrazowania rozwoju pęknięć warstwy malarskiej. Na rys. 36 można zaobserwować kolejne etapy rozwoju spękań warstwy malarskiej. Przedstawione interferogramy zostały zarejestrowane po ogrzaniu badanej powierzchni o 2-3 stopnie Celsjusza. Tak niewielka zmiana temperatury powierzchni nie prowadzi do jej uszkodzenia, a zarazem jest wystarczająca do uzyskania bardzo dobrego kontrastu interferogramów.

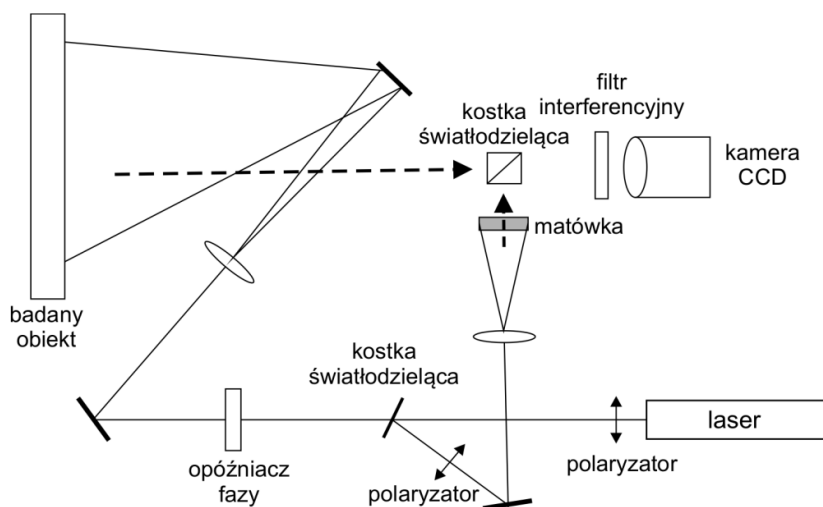


Rys. 36. Badana próbka warstwy zaprawy malarskiej w trakcie doświadczenia polegającego na cyklicznym rozciąganiu próbki z amplitudą 0,25 %. Obrazy zostały zarejestrowane metodą DIC. (a) stan próbki przed doświadczeniem. (b) po 15000 cykli rozciągających. (c) po 36000 cykli rozciągających. Należy podkreślić, że pokazane na interferogramach pęknięcia są niewidoczne gołym okiem.

DIC jest łatwą do zastosowania metodą doświadczalną. Interpretacja otrzymanych wyników jest, w przypadku analizy rozwoju pęknięć na powierzchni badanego obiektu, prosta i jednoznaczna. Jednakże metoda ta jest mało przydatna do analizy przestrzennych niejednorodności, takich jak odspojenia od podłoża czy rozwarstwienia warstw dekoracyjnych. W celu analizowania tego typu uszkodzeń metoda pomiarowa została zmodyfikowana poprzez dodanie dodatkowej wiązki odniesienia interferującej z rozproszonym na badanym obiekcie światłem.

6.3.2. Opis układu doświadczalnego DSPI

Na rys. 37 przedstawiono schemat zbudowanego przez autora pracy układu optycznego, który został wykorzystany do pomiarów rozwoju uszkodzeń warstw dekoracyjnych na podłożu drewnianym przy użyciu metody DSPI.



Rys. 37. Schemat układu pomiarowego.

Wiązka laserowa pochodząca z lasera Nd:Yag została podzielona na dwie wiązki przy pomocy płytki szklanej. Pierwsza z nich jest nazywana wiązką obiektową, natomiast druga wiązką referencyjną. Wiązka obiektowa oświetla badaną powierzchnię, a odbite od niej światło przechodzi, w drodze do kamery, przez kostkę światłodzielną. Wiązka referencyjna po przejściu przez matówkę również pada na kostkę światłodzielną, gdzie interferuje ze światłem odbitym od obiektu. Wynik interferencji rejestrowany jest przy pomocy kamery CCD.

Interferencja światła jest możliwa tylko wtedy, kiedy różnica dróg optycznych pomiędzy wiązką referencyjną a obiektową jest mniejsza od długość spójności światła laserowego. W tym przypadku długość ta wynosi około 30 m, co w zupełności wystarcza do otrzymania interferogramów dobrej jakości nawet w przypadku obiektów znajdujących się w sporej odległości od interferometru. Jest to istotne podczas pomiarów w obiektach zabytkowych, gdzie możliwości swobodnej instalacji aparatury badawczej są ograniczone.

Użycie matówki na drodze wiązki referencyjnej powoduje, że rejestrowany interferogram powstaje w wyniku nałożenia dwóch obrazów plamkowych. Ma on bardziej skomplikowaną strukturę niż obraz, który powstałby przy użyciu jednorodnej wiązki odniesienia, jednak taka budowa układu eksperymentalnego pozwala na znaczne jego uproszczenie kosztem niewielkiej tylko redukcji jakości rejestrowanego obrazu [79]. Co więcej eliminuje się w ten sposób konieczność justowania wiązki referencyjnej przy każdorazowej zmianie odległości między układem pomiarowym a badaną

powierzchnią. Polaryzatory liniowe użyte w układzie pomiarowym służą do dobierania stosunku natężeń wiązek obiektywnej i referencyjnej. Zastosowanie polaryzatorów może ograniczać zdolność interferencji wiązek jednak korzyści z możliwości płynnego dostrajania układu (co jest niemożliwe przy użyciu filtrów) z nawiązką rekompensują możliwe straty w kontraście obrazu.

Analiza interferogramu możliwa jest tylko wtedy, gdy piksel matrycy kamery jest mniejszy od rozmiaru spekli. Rozmiar plamek zależy od parametrów układu obrazującego i w płaszczyźnie obrazowej wynosi :

$$\sigma = 1.22(1 + m) \frac{\lambda f}{D} \quad (16)$$

gdzie f to ogniskowa układu obrazującego, D jego apertura, m powiększenie układu obrazującego, $m=(b-f)/f$, gdzie b jest odległością między układem obrazującym a ekranem. Zgodnie z powyższym wzorem średnica spekli odwzorowanych na matrycy kamery wynosiła 4,1 μm natomiast bok każdego kwadratowego piksela matrycy ma długość 3,5 μm .

Dodatkowym elementem umieszczonym w wiązce obiektywnej jest ciekłokrystaliczny opóźniacz fazy (ARCOptix phase shifter). Jest on używany podczas pomiarów, w których deformacja powierzchni obiektu jest wymuszana falą dźwiękową. Użycie opóźniacza fazy ma kluczowe znaczenie, ponieważ algorytmy wykorzystane do analizy obrazu wymagają rejestracji interferogramów, w których różnica faz pomiędzy wiązką obiektywą, a referencyjną jest zmieniana w sposób kontrolowany. Podczas pomiarów z wykorzystaniem wzbudzenia termicznego opóźniacz fazy był albo wyłączony albo odłączony od układu pomiarowego.

Podobnie jak w układzie do pomiaru cyfrowej korelacji obrazu przed matrycą kamery umieszczony jest wąskopasmowy filtr interferencyjny przepuszczający drugą harmoniczną lasera Nd:YAG.

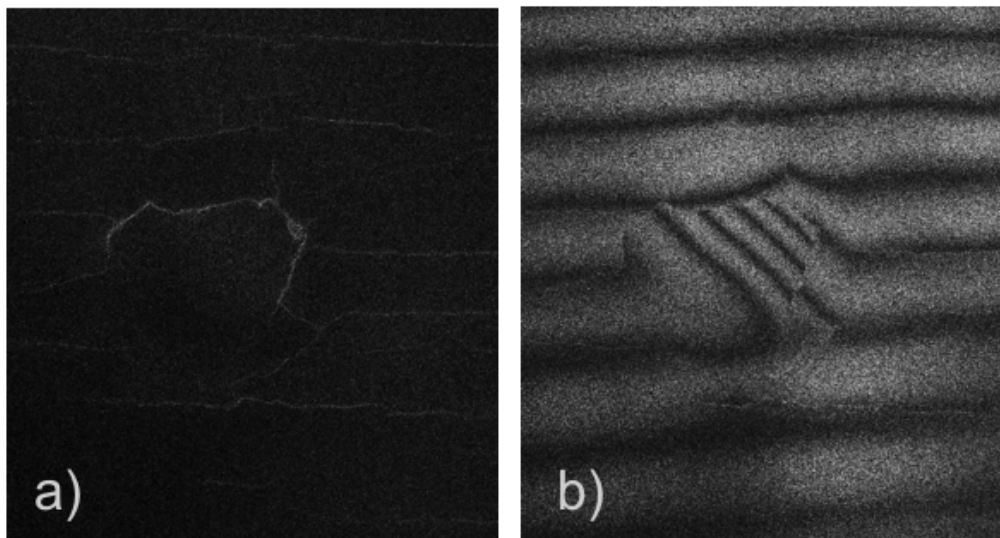
Warto zauważyć, że pokazany na rys. 37 układ pomiarowy może być również używany do rejestracji interferogramów metodą DIC (wystarczy nie używać podczas pomiaru wiązki referencyjnej).

6.3.3. Pomiar DSPI przy użyciu wzbudzenia termicznego

Podobnie jak w przypadku metody DIC, wykonując pomiary DSPI wykorzystać można wzbudzenie termiczne badanej powierzchni. Pierwszy interferogram rejestrowany jest natychmiast po zakończeniu nagrzewania i traktowany jako obraz referencyjny, od którego odejmuje się kolejne rejestrowane podczas chłodzenia powierzchni interferogramy. W wyniku zastosowania tej procedury proces chłodzenia powierzchni zobrazowany jest przez strukturę prążków interferencyjnych. Odległość między prążkami odzwierciedla rozkład względnych, prostopadłych do powierzchni, przemieszczeń punktów związanych z stygnięciem powierzchni. W miejscach, gdzie znajdują się niejednorodności powierzchni (rozwarstwienia, odspojenia, nawarstwienia materiału o innym przewodnictwie cieplnym) pojawiają się dodatkowe skupiska prążków interferencyjnych (matematyczny opis powstawania obrazu interferencyjnego podczas deformacji w kierunku normalnym do powierzchni opisany jest w rozdziale 6.3.4).

Na rys. 38 przedstawiono przykładowy interferogram, będący wynikiem zastosowania opisywanej procedury pomiarowej. Na zdjęciu 38b można rozróżnić dwa rodzaje prążków interferencyjnych. Pierwsza grupa to szerokie, poziome prążki, które odzwierciedlają proces chłodzenia jednorodnej powierzchni. W środku interferogramu wyraźnie widoczne są ukośne prążki o innej charakterystyce. Związane są one z występującą w tym miejscu lokalną niejednorodnością materiału. Przy pomocy metody wzbudzenia termicznego nie sposób jednoznacznie ocenić czy w miejscu tym znajduje się odspojenie warstwy dekoracyjnej czy może przemalowanie grubszą warstwą farby, która ma inne właściwości termiczne niż reszta badanego obszaru.

Reasumując, pomiar DSPI ze wzbudzeniem termicznym pozwala na zdobycie informacji dotyczącej lokalizacji miejsc gdzie mogą znajdować się defekty warstwy malarskiej. Jednakże pomiar ten nie pozwala na określenie charakteru wykrytych niejednorodności. Aby odróżnić odspojenia warstwy dekoracyjnej od innych cech badanej powierzchni opracowano metodę wzbudzenia dźwiękowego. Została ona opisana w następnym rozdziale.



Rys. 38. Interferogram DIC (a) oraz DSPI po wzbudzeniu termicznym (b) dla tego samego obiektu (drewno lipy pokryte warstwą zaprawy gruntowej). Na zdjęciu (a) widoczna jest siatka spękań powstała na powierzchni obiektu. Na zdjęciu (b) widoczne są prążki interferencyjne, które wskazują na istnienie defektu.

6.3.4. Pomiar DSPI ze wzbudzeniem powierzchni falą dźwiękową

Metoda ta polega na rejestracji interferogramów obiektów, których drgania zostały wymuszone falą dźwiękową. W bezpośrednim sąsiedztwie badanej powierzchni umieszczono głośnik (Monacor MPT 177), który emitował fale w przedziale 3,5-15 kHz. Sygnał dźwiękowy generowany jest przez komputer kontrolujący pomiar (poprzez kartę laboratoryjną National Instruments NI-6221), a następnie wzmacniany przez wzmacniacz (Monacor Stage Line STA-301). Ten sam komputer kontroluje opóźniacz fazy.

Natężenie światła w płaszczyźnie matrycy CCD można przedstawić jako:

$$I(x, y) = I_r + I_o + 2\sqrt{I_r I_o} \cos(\theta_o - \theta_r) \quad (17)$$

gdzie :

I_r - natężenie światła w punkcie (x,y) pochodzące od wiązki referencyjnej

I_o - natężenie światła w punkcie (x,y) pochodzące od wiązki obiektowej

θ_o - faza wiązki obiektowej

θ_r - faza wiązki referencyjnej

Jeżeli obserwowany punkt drga harmonicznie to do równania 17 wchodzi dodatkowy czynnik fazowy [81]:

$$\Delta = \frac{4\pi}{\lambda} \text{Acos}(\varpi t + \varphi) \quad (18)$$

gdzie :

λ - długość fali lasera

ϖ - częstotliwość drgania

φ - faza drgania

A – amplituda drgania

Po podstawieniu 18 do 17 otrzymujemy wyrażenie określające natężenie światła w punkcie (x,y) jako :

$$I(x, y, t) = I_r + I_o + 2\sqrt{I_r I_o} \cos(\theta_o - \theta_r + \Delta) \quad (19)$$

Jeżeli czas rejestracji obrazu jest dużo większy niż częstotliwość drgania obserwowanego punktu to możemy uśrednić natężenie światła w punkcie (x,y) w następujący sposób [82]:

$$I_{sr}(x, y) = \frac{1}{T} \int_0^T I(x, y, t) dt \quad (20)$$

gdzie T oznacza czas rejestracji sygnału. Po podstawieniu równania 20 do 19 otrzymujemy :

$$\begin{aligned} I_{sr}(x, y) &= \frac{1}{T} \int_0^T \left(I_r + I_o + 2\sqrt{I_r I_o} \cos\left(\theta_o - \theta_r + \frac{4\pi}{\lambda} \text{Acos}(\varpi t + \varphi)\right) \right) dt \\ &= I_r + I_o + 2\sqrt{I_r I_o} \cos(\theta_o - \theta_r) J_0\left(\frac{4\pi}{\lambda} A\right) \end{aligned} \quad (21)$$

gdzie J_0 oznacza funkcję Bessela pierwszego rodzaju zerowego rzędu natomiast A oznacza amplitudę drgania. Dzięki użyciu opóźniacza fazy możemy dodawać do

czynnika $(\theta_o - \theta_r)$ dowolna fazę. Jeżeli ta dodatkowa faza będzie wynosić π to różnica między natężeniem światła zmierzonym z dodatkowy przesunięciem fazowym i bez niego wyniesie:

$$I_1 - I_2 = 4\sqrt{I_r I_o} \sin\left(\frac{2(\theta_o - \theta_r) + \pi}{2}\right) \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) J_0\left(\frac{4\pi}{\lambda} A\right) = K J_0\left(\frac{4\pi}{\lambda} A\right) \quad (22)$$

gdzie :

$$K = 4\sqrt{I_r I_o} \sin\left(\frac{2(\theta_o - \theta_r) + \pi}{2}\right) \quad (23)$$

Czynnik K oznacza nieznaną stałą zależną od wzajemnej fazy wiązek obiektowej i odniesienia. Równanie 22 opisuje różnicę interferogramów dla drgającej powierzchni. Analogiczny pomiar dla nieruchomego obiektu prowadzi do wyrażenia:

$$I'_1 - I'_2 = 4\sqrt{I_r I_o} \sin\left(\frac{2(\theta_o - \theta_r) + \pi}{2}\right) \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) J_0\left(\frac{4\pi}{\lambda} A\right) = K \quad (24)$$

Wydzielenie różnicy interferogramów dla drgającego obiektu 23 przez różnicę interferogramów dla obiektu nieruchomego 24 w każdym punkcie obrazu uwalnia nas od nieznanej stałej K :

$$\frac{I_1 - I_2}{I'_1 - I'_2} = J_0\left(\frac{4\pi}{\lambda} A\right) \quad (25)$$

Równanie 25 zawiera informację na temat przestrzennego rozkładu amplitudy drgania. Metoda odwikłania tej informacji została przedstawiona w rozdziale 6.3.5.

Z zaprezentowanej analizy wynika, że kontrola przesunięcia fazowego pomiędzy wiązkami obiektową i odniesienia jest kluczowa dla możliwości przeprowadzenia ilościowej interpretacji uzyskanych wyników. Dokładność procedury obliczeniowej, zależy od właściwej kalibracji opóźniacza fazy dzięki której czynnik fazowy kolejnych rejestrowanych interferogramów różni się dokładnie o czynnik π .

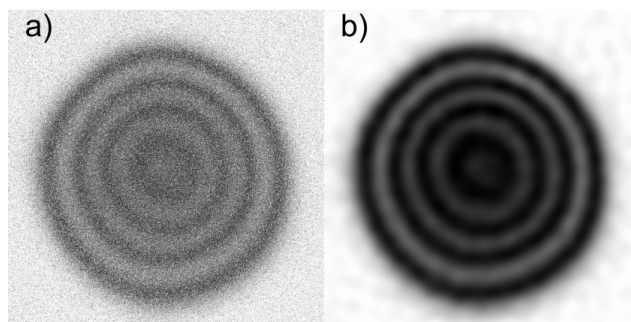
Aby uniknąć konieczności częstego kalibrowania (czy też kontrolowania kalibracji) opóźniacza fazy zastosowano metodę pomiaru „maksimum-minimum”

zaproponowaną przez Vikhagen [83]. Polega ona na rejestracji serii kolejnych interferogramów, dla których opóźnienie fazowe jest zmieniane za każdym razem o stałą wartość. Wielkość tej zmiany dobierana jest tak, aby całkowite opóźnienie fazowe o wartości 2π obejmowało co najmniej 9 interferogramów. Podział na taką ilość kroków fazowych daje w przypadku analizy wibrującej powierzchni estymację odtworzenia opóźnienia fazy 0 oraz π na poziomie 95% [83]. Po rejestracji serii interferogramów należy dla każdego punktu powierzchni wybrać największą i najmniejszą wartość zarejestrowanego natężenia światła. Różnica pomiędzy nimi odpowiada właśnie szukanej różnicy natężeń źródła dla względnej różnicy faz 2π (równania 22 oraz 24) dla danego punktu [83]. Taki sposób analizy pozwala na wybór procedury pomiarowej, która jest dokładna ale czasochłonna (rejestracja dużej ilości interferogramów) lub szybka ale obarczona dużym błędem (rejestracja małej, ale praktycznie nie mniejszej od dziewięciu liczby interferogramów). Zastosowane rozwiązanie zwiększa więc różnorodność sposobów zastosowania zbudowanego interferometru.

6.3.5. Analiza wyników

Opracowany przez autora pracy algorytm analizy zarejestrowanych wyników przebiega w trzech etapach.

Pierwszy etap polega na odsumieniu interferogramów. Z powodu ziarnistej struktury rejestrowanego pola plamkowego odsumienie obrazu jest niezbędne do przeprowadzenia analizy zawartej w interferogramach informacji. Na rys. 39 przedstawiono przykładowe porównanie interferogramów przed i po procesie numerycznego odsumienia.



Rys. 39. Zarejestrowane interferogramy podczas pomiaru DSPI ze wzbudzeniem falą dźwiękową. (a) nieodsumiony interferogram, (b) interferogram odsumiony przy użyciu 2DFFT oraz normalizacji.

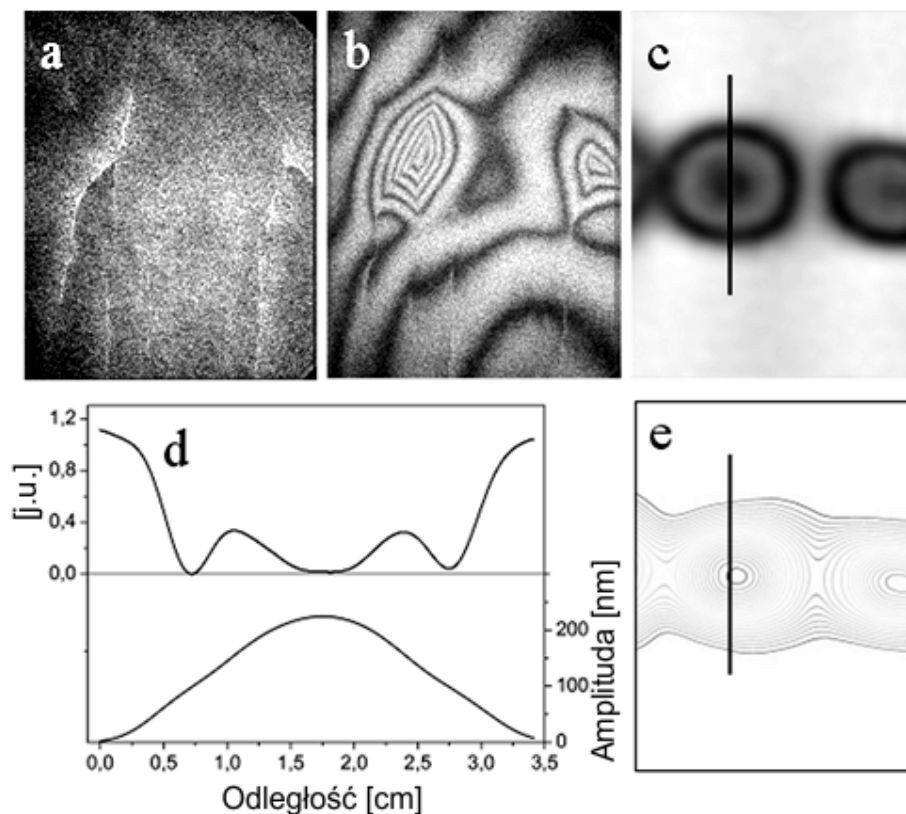
Aby odszumić zarejestrowane interferogramy używano dwuwymiarowej transformaty Fouriera (2DFFT) oraz mediany. Obie te metody są efektywne i komplementarne. W analizie defektów powierzchni nie zawierających ostrych krawędzi transformację obrazu wykonywano przy użyciu 2DFFT (rys. 39). W przypadku analizy pęknięć i odspojień na granicy pęknięć warstwy malarskiej transformata Fouriera powodowała rozmycie krawędzi uniemożliwiające powiązanie punktów obrazu z kolejnymi prążkami interferencyjnymi. W tym przypadku zastosowanie mediany dawało dużo lepsze rezultaty.

Cały proces przygotowania zarejestrowanego interferogramu do analizy numerycznej wykonywany jest w trzech krokach. Pierwszy to odszumienie interferogramu z zarejestrowanym drganiem przy pomocy 2DFFT lub mediany. Drugi polega na odszumieniu interferogramu stanowiącego referencję dla pomiaru (obiekt nieruchomy) przy dokładnie takich samych ustawieniach 2DFFT bądź mediany jak w przypadku odszumienia interferogramu zarejestrowanego dla drgającej powierzchni. Trzeci krok polega na podzieleniu obu interferogramów przez siebie i znormalizowaniu ich. Wszystkie operacje wykonywane są w 12 bitowej rozdzielczości (4096 możliwych wartości dla każdego piksela) co zapobiega redukcji jakości obrazu która mogłaby prowadzić do strat zawartej w nim informacji.

Kolejny, drugi etap analizy polega na dokładnym zlokalizowaniu minimów i maksimów w obrazie interferencyjnym. Jest to czynność kluczowa, ponieważ od niej w głównej mierze zależy prawidłowa interpretacja interferogramu.

Procedura jest semi-automatyczna i rozpoczyna się od „ręcznego” zaznaczenia pozycji prążków interferencyjnych. Pozycje te, traktowane są jako warunki początkowe dla automatycznej procedury wyszukiwania położenia prążków dla całego interferogramu. W zależności od tego czy poszukiwane jest maksimum czy minimum natężenia, program komputerowy rozpoczynając od wstępnie zaznaczonych pozycji wyszukuje punkty o ekstremalnych wartościach natężenia i jako wynik podaje pozycję znalezionego lokalnego (na przestrzeni 8 pikseli) ekstremum. W przypadku rejestracji uśrednionych w czasie drgań obiektu, natężenie zarejestrowanego sygnału ma postać modułu funkcji Bessela zerowego rzędu. Minima przedstawione na interferogramie odpowiadają miejscom zerowym funkcji Bessela natomiast rzeczywiste minima są

odbijane i na interferogramie przedstawione jako maksima (przykładowe wyniki analizy przedstawiono na rys. 40).

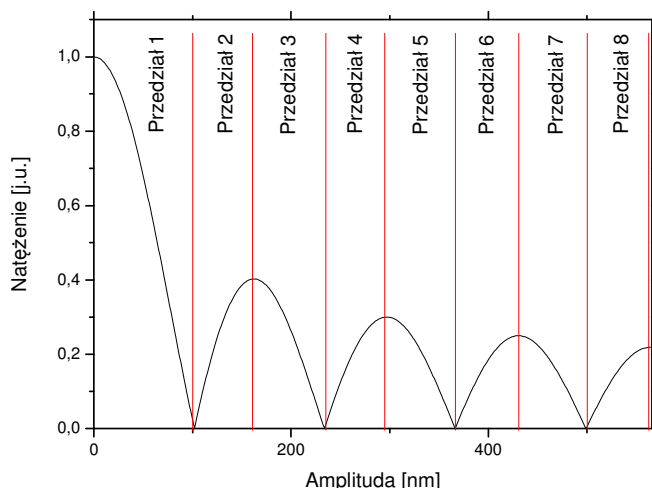


Rys. 40. Przykładowa analiza odspojenia warstwy zaprawy gruntowej od drewnianego podłoża. Interferogram (a) został otrzymany metodą DIC. Wyraźnie widoczne są na nim pęknięcia znajdujące się na badanej powierzchni. Interferogram (b) to wynik uzyskany metodą DSPI ze wzbudzeniem termicznym. Wyraźnie widoczne są miejsca, w których znajdują się defekty. Interferogram (c) to wynik uzyskany metodą DSPI ze wzbudzeniem dźwiękiem. Zaznaczono na nim przekrój, który następnie został przedstawiony na wykresie (d). W górnej jego części przedstawiono rozkład natężenia prążków interferencyjnych natomiast dolny wykres przedstawia obliczoną amplitudę drgania dla tego przekroju. Na ilustracji (e) przedstawiono mapę poziomicy dla tego drgania (izolinie co 30 nm).

Szczególnym przypadkiem utrudniającym analizę jest sytuacja, gdy prążki interferencyjne nie są krzywymi zamkniętymi. Zdarza się to wtedy, gdy na powierzchni znajdują się pęknięcia warstwy dekoracyjnej rozdzielające obszar odspojony od nieodspojonego. Podobny efekt powstaje, gdy na zarejestrowanym interferogramie znajduje się jedynie fragment drgającego obszaru. Ze względu na takie przypadki wprowadzono do algorytmu możliwość zdefiniowania prostych, na których dopuszczona jest nieciągłość prążków interferencyjnych. W praktyce algorytm działa tak, że lokalne minima i maksima natężenia są znajdowane w sposób opisany powyżej

a zdefiniowana prosta jest granicą obszaru, na którym prowadzone są obliczenia i natężenia po obu jej stronach nie są porównywane.

Ostatnim, trzecim etapem analizy jest obliczenie amplitudy drgania w każdym punkcie obrazu. Metoda ta bazuje na porównaniu wartości natężenia światła zarejestrowanego w poszczególnych pikselach obrazu z wartościami przebiegu modułu funkcji Bessela. Dzięki poprzedniemu krokowi procedury każdy punkt obrazu jest zlokalizowany pomiędzy dwoma prążkami interferencyjnymi lub w przypadku miejsc gdzie drganie jest maksymalne, jest otoczony przez ostatni prążek interferencyjny. W ten sposób każdy piksel zostaje przyporządkowany do konkretnego przedziału modułu funkcji Bessela.



Rys. 41. Moduł funkcji Bessela zerowego rzędu (równanie 27). Na rysunku zaznaczono schemat podziału tej funkcji na przedziały, które wykorzystywane są podczas obliczania rozkładu amplitudy drgania badanej powierzchni.

Ponieważ funkcja Bessela nie jest iniekcją w całej dziedzinie, analiza przeprowadzona jest w przedziałach. Każdy z tych przedziałów zaczyna się na ekstremum lokalnym i kończy także na kolejnym ekstremum lokalnym – jest więc tożsamy z wyznaczonym wcześniej obszarem między kolejnymi prążkami modułu funkcji Bessela. Podział ten przedstawiono na rys. 41. Przedział pierwszy rozpoczyna się w maksimum funkcji i kończy w pierwszym minimum. Następny przedział zaczyna w pierwszym minimum a kończy w drugim maksimum itd.

Po przeprowadzeniu opisanej analizy obrazu natężenie sygnału w każdym punkcie dane jest wzorem (por. równanie 25, w którym nie występuje moduł):

$$I(x, y) = \left| J_0 \left[\frac{4\pi}{\lambda} A(x, y) \right] \right| \quad (26)$$

gdzie :

x, y – pozycja piksela

J_0 - funkcja Bessela zerowego rzędu

$A(x, y)$ - amplituda drgania piksela w pozycji x, y

λ - długość fali lasera.

Aby wyznaczyć szukaną amplitudę drgania $A(x, y)$ korzystamy z wyznaczonych przedziałów. Natężenie każdego piksela obrazu porównujemy z natężeniem modułu funkcji Bessela obliczanej dla kolejnych amplitud drgania wewnątrz określonego poprzednio przedziału. Procedura jest przerywana, gdy odnaleziona zostanie wartość amplitudy, dla której moduł funkcji Bessela pokryje się z wyznaczonym natężeniem sygnału w punkcie z dokładnością do 0,5 nm.

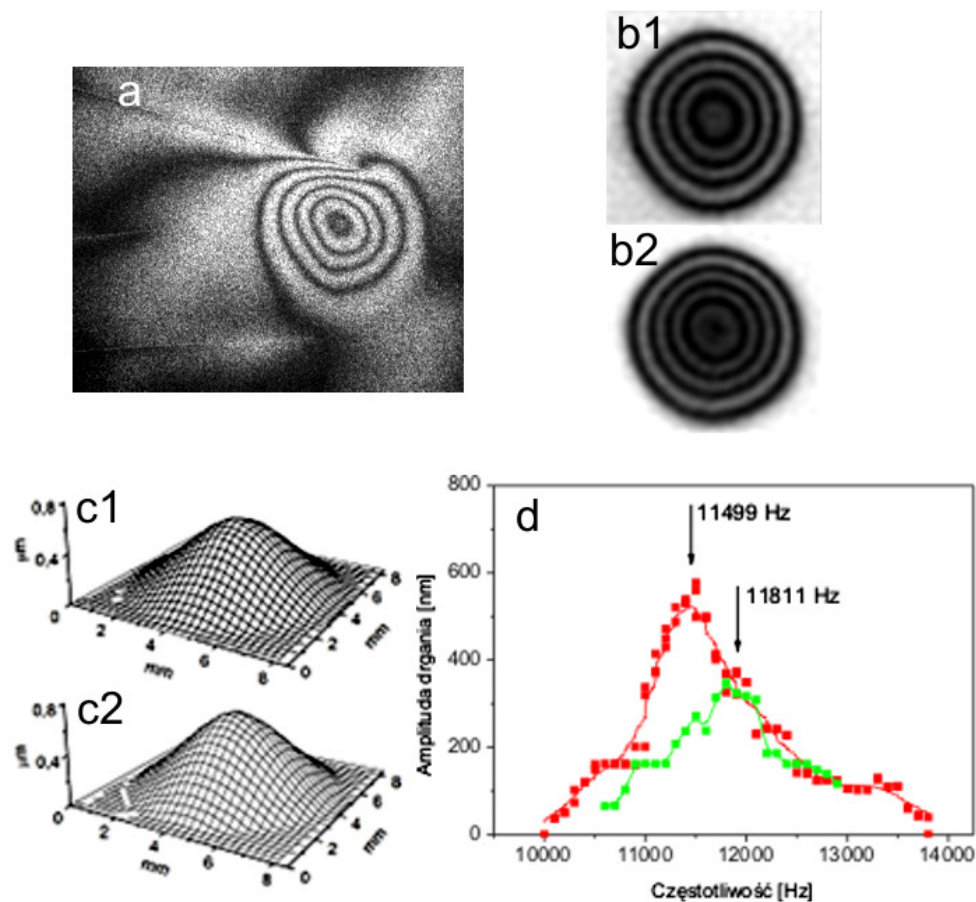
Dodatkowa trudność w przeprowadzeniu tej procedury polega na istnieniu na zarejestrowanych interferogramach szumu pochodzącego od prądu ciemnego matrycy CCD oraz światła laserowego niebiorącego udziału w procesie interferencji. To dodatkowe, rozłożone niejednorodnie na powierzchni obiektu natężenie światła, jest w czasie pomiaru dodawane do sygnału interferencyjnego. W efekcie amplitudy zmierzonych natężeń światła nie odpowiadają ściśle modułowi funkcji Bessela. Szczególnie wyraźnie widoczne jest to w przypadku minimów, w których natężenie sygnału powinno być równe zeru a w praktyce waha się pomiędzy zerem a 4% maksymalnej wartości. Efekt ten jest mierzalny, ale na tyle mały, że aby móc przeprowadzić obliczenia postanowiono przeskalować wartość wyznaczonego natężenia światła dla pikseli wewnątrz każdego przedziału tak, aby minimalna wyznaczona wartość była równa zeru, a maksymalna odpowiadała wartości maksimum modułu funkcji Bessela z odpowiedniego przedziału. Wpływ tej procedury na zwiększenie błędu wyznaczenia amplitudy drgania zależy od jakości wykonanego pomiaru i wynosi od około 1% do 3,5%.

W przypadku pikseli z przedziału w którym amplituda drgania jest największa (rys. 41) przeskalowanie nie jest możliwe – maksymalna wartość modułu funkcji

Bessela może nie być (i z reguły nie jest) w tym przedziale osiągnięta. Aby uzyskać poprawny wynik do modułu funkcji Bessela dodawany jest stały czynnik zapewniający gładkie przejście pomiędzy ostatnim a przedostatnim przedziałem, w którym prowadzone są obliczenia.

Poniżej przedstawiono wyniki jednego z pierwszych pomiarów, którego celem była obserwacja rozwoju defektu na powierzchni polichromowanego drewna. Śledzono zmiany częstości rezonansowej podczas poddawania próbki niszczącym cyklom rozciągającym w maszynie testującej. Przed przeprowadzeniem cykli niszczących wykonano pomiar DSPI, dzięki któremu scharakteryzowano przygotowane przez konserwatora odspojenie warstwy gruntu malarskiego. Wyznaczono częstość rezonansową defektu oraz jego powierzchnię. Następnie próbkę poddano serii cykli rozciągających, których amplituda była zwiększana do czasu, kiedy zaobserwowano powstanie pęknięć warstwy zaprawy malarskiej. Pęknięcia te zostały zarejestrowane dzięki metodzie DIC. Po zakończeniu serii cykli deski wykonano drugi pomiar. Na rys. 42 przedstawiono porównanie wyników obu pomiarów.

Pierwszy interferogram DSPI oznaczony jako 42a został wykonany przy użyciu termicznego wzbudzenia próbki po zakończeniu serii cykli. Oprócz odspojonego obszaru widać na nim trzy pęknięcia, które zaczynają się na lewej krawędzi interferogramu i kończą w jego centrum. Następne dwa interferogramy DSPI 42b1, 42b2 zostały wykonane przy użyciu wzbudzenia dźwiękowego. Pierwszy z nich 42b1 odpowiada częstości rezonansowej 11500 Hz i został zarejestrowany przed poddaniem próbki cyklom rozciągającym. Drugi, zarejestrowany po zakończeniu procedury niszczącej 42b2 wykonano używając do wzbudzenia dźwięku o częstości 11800 Hz. Na zdjęciach 42c1, 42c2 przedstawiono obliczoną na podstawie interferogramów 42b1, 42b2 powierzchniową mapę vibracji defektu. Porównanie interferogramów pokazało, że po przeprowadzeniu cykli powierzchnia drgania zwiększyła się o 6%, natomiast częstość rezonansowa defektu przesunęła się o 300 Hz – widać to na wykresie 42d, na którym porównano amplitudy drgań w funkcji częstości dla obu pomiarów.



Rys. 42. Dwa pomiary DSPI ze wzbudzeniem dźwiękiem i ich porównanie. Opis znajduje się w tekście paragrafu.

Linia czerwoną oznaczono pomiar referencyjny natomiast zieloną pomiar przeprowadzony po poddaniu próbki cyklo rozciągającym. Przeprowadzona analiza rozwoju uszkodzenia pokazała, że zarówno pomiar wielkości odspojonego obszaru jak i pomiar przestrzennego rozkład amplitudy wibracji mogą służyć do śledzenia rozwoju defektów powierzchni. Najbardziej czuła na zmiany charakterystyki mechanicznej odspojenia jest jednak wartość częstości rezonansowej odspojonego obszaru, która dodatkowo nie zależy od natężenia dźwięku, ustawienia głośnika względem badanej powierzchni czy nawet długości fali użytego lasera. Jest to więc najbardziej czuły z parametrów, które mogą być użyte do śledzenia rozwoju mikrouszkodzeń.

Przedstawiona metoda analizy wyników jest autorska, jednak przy jej opracowywaniu wzięto pod uwagę bogatą literaturę przedmiotu opisującą inne podejścia do problemu ilościowej analizy interferogramów plamkowych.

Podstawową metodą stosowaną od samego początku w interferometrii plamkowej do odsumienia obrazów było zwykle ich uśrednianie [84]. Analizowano dalej interferogramy dopiero po takiej wstępnej obróbce. Obecnie używa się do tego celu albo 2DFFT jak w niniejszej pracy lub transformaty falkowej [85-87]. Dodatkowo stosuje się kombinacje uśrednienia lub mediany w wyżej wymienionych transformatami [84-86]. Innym podejściem do analizy samego interferogramu jest zastosowanie transformaty Hilberta [82]. Kolejnym możliwym podejściem jest zastosowanie algorytmów 4 bądź 5 klatkowych [80]. Polegają one na rejestracji 4 lub 5 interferogramów z określonym przesunięciem fazowym za pomocą precyzyjnie wykalibrowanego opóźniacza fazy.

Zaprezentowana metoda analizy interferogramów zapewnia dokładną i szybką obróbkę zarejestrowanych zdjęć przy wykorzystaniu kombinacji omówionych metod.

7. Wyniki i dyskusja

Opis uzyskanych wyników został podzielony na dwie części. Pierwsza z nich, zawarta w rozdziale 7.1, dotyczy wyznaczenia na drodze eksperymentalnej krzywej zmęczeniowej warstwy dekoracyjnej na drewnie, czyli zależności krytycznej wartości odkształcenia rozciągającego, dla którego następuje uszkodzenie tej warstwy, od liczby powtarzających się cykli rozciągających. Badania wykonano poddając próbki imitujące zabytkowe drewno polichromowane seriom cykli rozciągających, których amplituda naśladowała odpowiedź drewna na zmiany wilgotności względnej otoczenia. Pojawienie się uszkodzeń warstwy tj. spękań i odspojień, monitorowano przy użyciu interferometrii plamkowej, opisanej w rozdziałach 3 oraz 6. Rozdział ten kończy wyznaczenie dopuszczalnych amplitud wahań mikroklimatu, wywołujących odkształcenia polichromii poniżej poziomu krytycznego.

Druga część wyników, opisana w rozdziale 7.2, dotyczy zastosowania interferometrii plamkowej do badań rzeczywistych zabytkowych polichromii na drewnie, najpierw w warunkach laboratoryjnych, potem *in situ* w muzeach i budowlach zabytkowych.

7.1. Wyznaczenie krzywej zmęczeniowej warstwy dekoracyjnej na drewnie

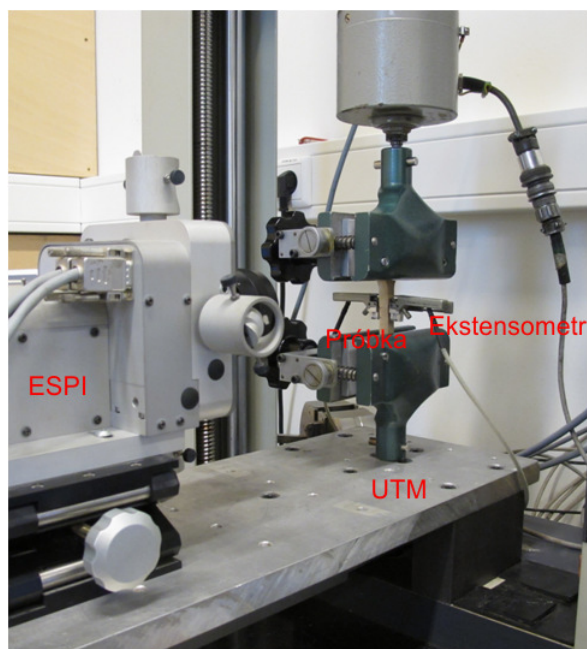
Pierwszym zadaniem badawczym pracy było opracowanie metody cyklicznego odkształcania próbek imitujących drewno polichromowane o zadaną amplitudę. W rzeczywistych warunkach odkształcenia te, prowadzące w końcu do uszkodzeń warstwy polichromii, są wywoływane przez wahania wilgotności względnej w otoczeniu obiektu, według mechanizmu dokładnie analizowanego w rozdziale 2. Nie można było jednak brać pod uwagę poddawania próbek cyklom zmiany wilgotności względnej w komorze klimatycznej ze względu na bardzo długi czas odpowiedzi obiektów takich jak obrazy na drewnie na zmiany wilgotności względnej w ich otoczeniu.

Jako rozwiązanie problemu możliwie szybkiego wywoływania cyklicznych odkształceń podłoża drewnianego przyjęto mechaniczne rozciąganie próbek przy

pomocy uniwersalnej maszyny testującej (UTM), imitujące zmiany wymiarowe drewna jakie występują podczas odpowiedzi drewna na zmiany wilgotności względnej. Układ pomiarowy wykorzystany do śledzenia mikrouszkodzeń na powierzchni próbek opisano dokładnie w rozdziale 6.2 natomiast wyniki przeprowadzonych pomiarów opisano w rozdziale 7.1.2. Porównanie odpowiedzi wymiarowej drewna mechanicznej oraz wilgotnościowej, czyli wywołanej zmianą wilgotności względnej opisano w rozdziale 7.1.1.

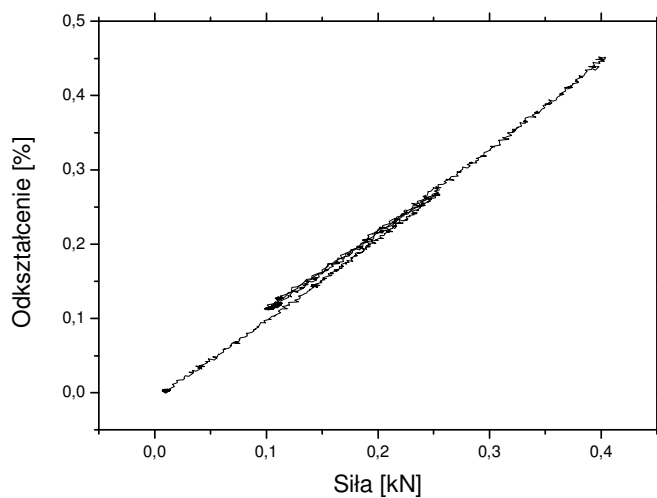
7.1.1. Sprawdzenie poprawności przyjętej metodyki imitacji odpowiedzi wilgotnościowej drewna przez rozciąganie mechaniczne

Jak napisano w rozdziale 1 drewno jest materiałem anizotropowym, którego strukturę określają pierścienie rocznych przyrostów, same będące aglomeracjami komórek o różnej strukturze w zależności od pory ich wzrostu. Stąd średnie zmiany wymiarowe mierzone w drewnie pod wpływem naprężeń lub zmian zawartości wody w materiale są w rzeczywistości sumą zmian lokalnych, których wielkość zależy od miejsca w pierścieniu przyrostu rocznego. Uszkodzenia warstwy polichromii będą powstawały w miejscach o największych odkształceniach lokalnych. Powstaje zatem pytanie, czy lokalne wartości odkształceń wywołanych zmianami wilgotnościowymi są takie same jak odkształcenia wywoływane przez rozciąganie mechaniczne. Tylko wtedy zasadne jest przyjęcie zaproponowanej metodyki imitacji odpowiedzi wilgotnościowej drewna poprzez rozciąganie próbek w maszynie UTM. Dlatego zbadano lokalne pola odkształceń w próbkach podczas ich odpowiedzi na zmianę wilgotności względnej w otoczeniu oraz w próbkach poddawanych odkształceniom mechanicznym. Pomiary lokalnego pola odkształceń przeprowadzono przy użyciu interferometru plamkowego przystosowanego do pomiaru odkształceń prostopadłych do kierunku obserwacji (*in plane* ESPI). Dzięki niemu można śledzić proces odkształcenia, do którego dochodzi w płaszczyźnie w której badana próbka zmienia swój wymiar poprzez rozciąganie bądź pęcznienie. Badania te przeprowadzono na Politechnice w Eindhoven w grupie badawczej prof. Henka Schellena. Na rys. 43 przedstawiono zdjęcie układu pomiarowego.



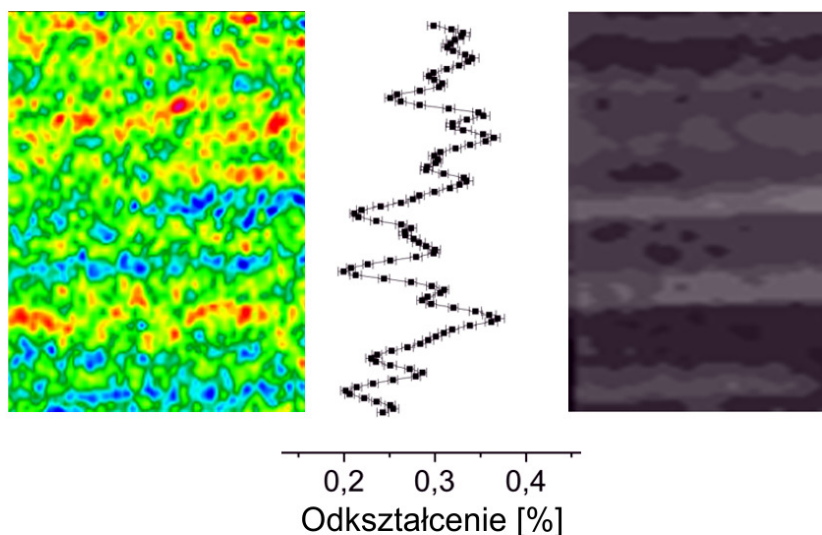
Rys. 43. Układ pomiarowy wykorzystany podczas badań *in plane* ESPI. Przekrój próbki miał powierzchnię 1 cm^2 a zmianę wymiarową obserwowano w kierunku radialnym.

Badania przeprowadzono dwukrotnie na tej samej próbce wyciętej z drewna lipowego. Pierwszy pomiar dotyczył obserwacji próbki podczas rozciągania w uniwersalnej maszynie testującej. Na rys. 44 przedstawiono zależność odkształcenia od siły. Wielkość odkształcenia była kontrolowana przez ekstensometr. Czas jednokrotnego rozciągnięcia próbki wynosił 2 s.



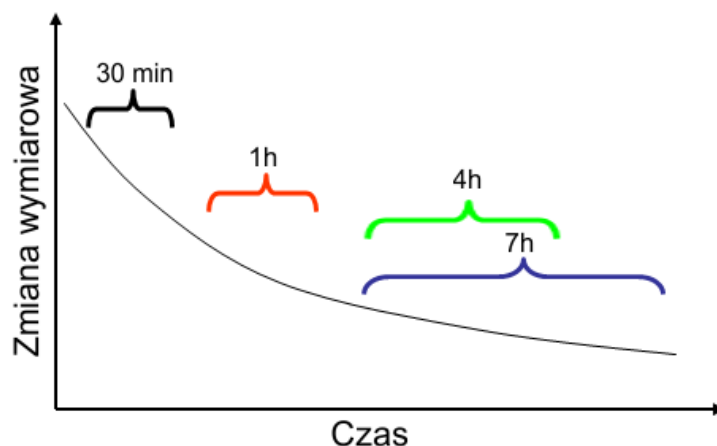
Rys. 44. Wykres przedstawiający zależność odkształcenia od siły dla próbki drewna lipy.

Na rys. 45 przedstawiono pole odkształceń podczas rozciągania próbki. Na dwuwymiarowej mapie można zobaczyć lokalny rozkład odkształcenia; z kolei krzywa przedstawia odkształcenie uśrednione dla każdej poziomej linii. Po prawej stronie przedstawiono zdjęcie RTG badanego obszaru pokazujące rozmieszczenie pierścieni przyrostów rocznych w badanej próbce drewna, które powodują powstawanie lokalnych gradientów odkształceń.



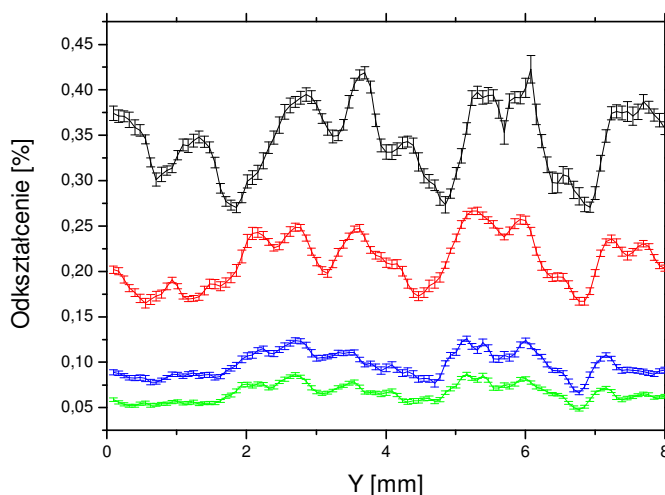
Rys. 45. Dwuwymiarowa mapa przedstawiająca rozkład odkształcenia w kierunku pionowym (w jakim rozciągano próbkę). Kolor czerwony oznacza miejsca w których odkształcenie jest największe, natomiast niebieski miejsca w których jest najmniejsze. W środku przedstawiono średnie odkształcenie dla każdej poziomej linii. Po prawej stronie przedstawiono zdjęcie RTG badanego obszaru pokazujące rozmieszczenie pierścieni przyrostów rocznych w badanej próbce drewna, które powodują powstawanie lokalnych gradientów odkształceń.

Następnie przeprowadzono pomiary dla tej samej próbki podczas skokowej zmiany wilgotności względnej z 80% do 20%. Przed pomiarem próbka była stabilizowana w komorze w wilgotności względnej 80% przez 24 godziny. Rys. 46 przedstawia schemat czasowy przeprowadzonego pomiaru. Całkowita zmiana wymiarowa próbki była oczywiście największa na początku procesu schnięcia i skurczu, malejąc w miarę dochodzenia próbki do nowej równowagi wilgotnościowej.



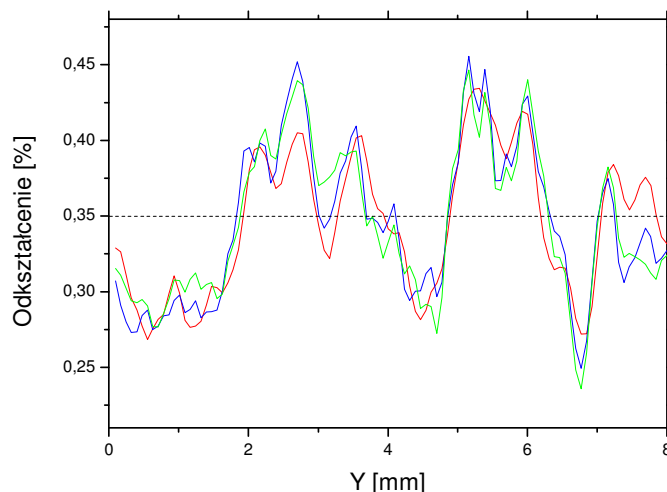
Rys. 46. Schemat czasowy przedstawiający kolejność eksperymentów podczas pomiaru odpowiedzi drewna na zmianę wilgotności względnej. Kolory odpowiadają kolorom krzywych przedstawionych na rys. 47. Przedstawiona krzywa zmiany wymiarowej jest poglądowa.

Na rys. 47 przedstawiono rozkłady odkształcenia prostopadłe do kierunku radialnego dla następujących po sobie pomiarów. Każdy z pomiarów został zrobiony w tym samym miejscu, w którym przeprowadzono pomiar podczas mechanicznego rozciągania próbki w maszynie UTM.



Rys. 47. Zestawienie lokalnych odkształceń w funkcji położenia Y (odległości od dolnego końca obszaru pomiarowego) dla kolejnych pomiarów przeprowadzonych podczas zmiany wilgotności względnej z naniesionym błędem pochodzącym od uśrednienia.

Na rys. 48 przedstawiono te same krzywe po znormalizowaniu ich do krzywej, która miała największe średnie odkształcenie globalne. Można zauważyć, że pokrywają się one ze sobą w dużej mierze co świadczy o tym, że względny rozkład odkształcenia był taki sam podczas całego pomiaru trwającego 15 godzin, stąd stosunki odpowiedzi wymiarowej drewna późnego i wczesnego są takie same dla całego zakresu wilgotności względnej.



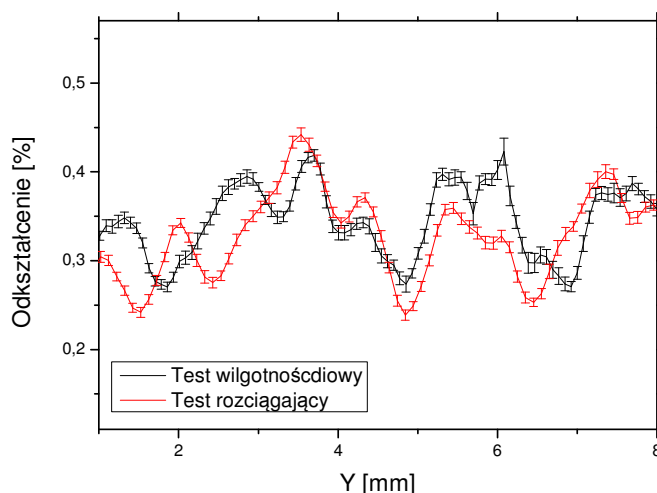
Rys. 48. Zestawienie przeskalowanych odkształceń w funkcji położenia Y (odległości od dolnego końca obszaru pomiarowego) dla pomiarów przeprowadzonych podczas zmiany wilgotności względnej.

Na rys. 49 zestawiono krzywe rozkładu odkształcenia wywołanego mechanicznie (test rozciągający) oraz przez zmianę wilgotności względnej (test wilgotnościowy). Krzywa odpowiadająca testowi rozciągającemu została przeskalowana tak, że średnie odkształcenia w obu testach są równe i wynoszą 0,35 %. Zestawienie to wskazuje, że niezależnie od sposobu wywołania odkształcenia globalnego, maksymalne odkształcenie lokalne jest takie samo w granicach błędu.

Przeprowadzone doświadczenia pozwalają na sformułowanie szeregu istotnych wniosków:

- Suma odkształceń lokalnych w obu pomiarach jest równa odkształceniu globalnemu próbki.
- Stwierdzono znakomitą korelację pomiędzy rozkładem odkształcenia, a pierścieniową strukturą drewna.

- Maksymalne i minimalne odkształcenia lokalne są identyczne w granicach błędu w testach rozciągającym i wilgotnościowym dla drewna lipowego.



Rys. 49. Zestawione odkształcenie w funkcji położenia Y (odległości od dolnego końca obszaru pomiarowego) dla pomiaru przeprowadzonego podczas zmiany wilgotności z pomiarem przeprowadzonym podczas rozciągania próbki.

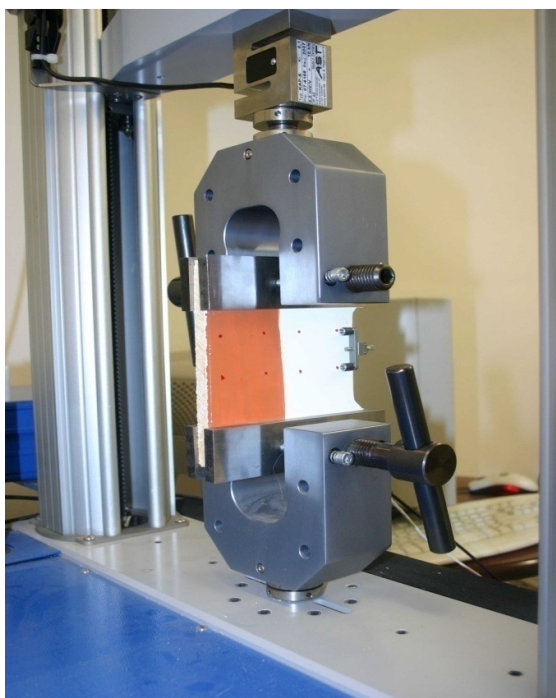
7.1.2. Cykliczne odkształcenia próbek imitujących zabytkowe polichromie

Próbki imitujące drewno polichromowane przygotowane przez konserwatora zgodnie z opisem zawartym w rozdziale 5.2 poddano serii cykli rozciągających, których amplituda naśladowała odpowiedź drewna na zmiany wilgotności względnej otoczenia. Na rys. 50 przedstawiono układ doświadczalny.

Podczas pomiarów próbki były rozciągane o 0,15%, 0,25%, 0,3%, 0,4% i 0,5% całkowitej długości. Zgodnie z tym co przedstawiono w rozdziale 1 oraz 2, wartość 0,25% przyjęto w literaturze za krytyczne odkształcenie zapraw na drewnie, powyżej którego pojawia się zagrożenie deformacją lub pęknięciem. Celem eksperymentów było ustalenie krytycznych odkształceń stwarzających zagrożenia dla warstwy polichromii w funkcji ich amplitudy i liczby. Maksymalna liczba cykli rozciągających wynosiła 36500. Liczba ta, dla bodźców powtarzających się codziennie, odpowiada stu latom

przechowywania obiektu. Wielkość rozciągnięcia była kontrolowana poprzez ekstensometr (MPA2 H&P) na długości 5 cm.

Wykorzystane w trakcie pomiarów próbki drewna polichromowanego wcześniej stabilizowano w komorze mikroklimatycznej w 50% wilgotności względnej i 20 °C. Otoczenie próbki podczas pomiarów także stabilizowano przez osuszanie i nawilżanie powietrza w laboratorium. Dzięki temu badane próbki były utrzymywane w stałych warunkach wilgotności podczas całego pomiaru.

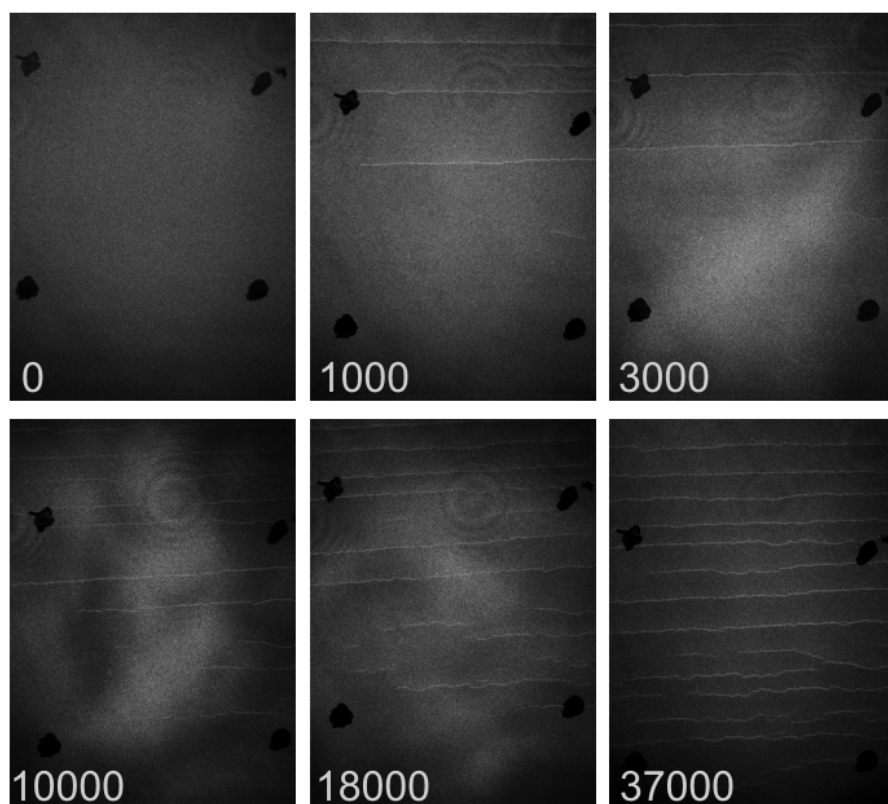


Rys. 50. Układ doświadczalny do cyklicznego odkształcania próbek. Próbką imitującą drewno polichromowane umieszczono w maszynie rozciągającej. Po prawej stronie próbki przymocowano ekstensometr, którego zadaniem jest kontrola wielkości odkształcenia podczas pomiarów. Biała część próbki zawiera naniesioną warstwę podkładu malarskiego natomiast pomarańczowa pokazuje miejsce gdzie dodatkowo naniesiono warstwę farby alkidowej.

Podczas mechanicznej deformacji próbki następowały mikropęknięcia warstwy malarskiej zaprawy gruntowej, które obserwowano przy użyciu interferometru plamkowego. Podstawową metodą śledzenia rozwoju pęknięć była cyfrowa korelacja obrazu (DIC). Dodatkowo przeprowadzono także pomiary DSPI używając wzbudzenia termicznego w celu lokalizacji miejsca, w których mogły pojawić się odspojenia zaprawy malarskiej. Na rys. 51 można zaobserwować rozwój pęknięć zarejestrowanych na powierzchni próbki pokrytej warstwą podkładu malarskiego. W każdym przypadku

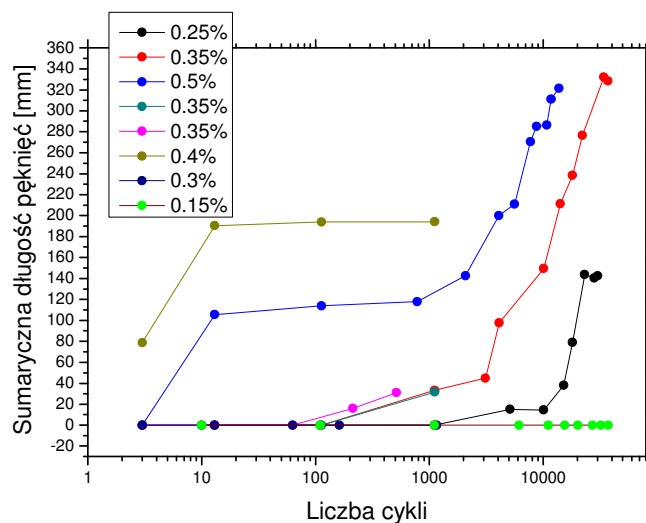
monitorowano fragment deski oznaczony na zdjęciach czarnymi kropkami. Odległość pomiędzy kropkami stanowiącymi wierzchołki kwadratu wynosi 3,5 cm. Jednocześnie prowadzono pomiary postępu procesu mikrozniszczenia na części próbki pokrytej farbą alkidową – naśladowującą warstwę historycznej farby olejnej. W 50% wilgotności względnej farba alkidowa jest bardziej elastyczna od warstwy gruntu malarskiego co powoduje że podczas mechanicznego rozciągania próbki grunt malarki pęka wcześniej od warstwy pokrywającej go farby. Zgodnie z przewidywaniami, podczas cykli zmęczeniowych, na części próbki pokrytej farbą widać mniej mikropęknięć niż na części pokrytej samą warstwą zaprawy. W przyszłości planowane są pomiary mechaniczne na próbkach pokrytych farbą alkilową w wysokich wilgotnościach - powyżej 80%. W takich warunkach grunt malarski traci sztywność i ulega deformacji plastycznej a podczas spadku wilgotności może prowadzić do daszkowania pokrywającej go warstwy farby.

Na rys. 52 przedstawiono wyniki dla wszystkich pomiarów uszkodzeń warstwy zaprawy malarskiej w funkcji ilości cykli odkształcających. Uszkodzenia wyrażono jako całkowitą długość pęknięć. Można zaobserwować, że dla odkształcenia 0,15% nie pojawiły się żadne uszkodzenia nawet po wykonaniu maksymalnej ilości cykli. Z kolei dla odkształcenia 0,25% pierwsze pęknięcie pojawiło się dopiero po 5000 cykli. Wyniki te wskazują, że krytyczna wartość odkształcenia, powyżej której pojawiają się uszkodzenia, sytuuje się w pobliżu wartości 0,2%. Odkształcenia 0,4 – 0,5% wywoływały pękanie zaprawy już po kilku cyklach. Rys. 53 pokazuje zależność wytrzymałości zmęczeniowej zaprawy od liczby cykli, gdzie wytrzymałość zmęczeniowa jest rozumiana jako wartość odkształcenia prowadząca do pierwszego pęknięcia zaprawy po zająciu danej liczby cykli.



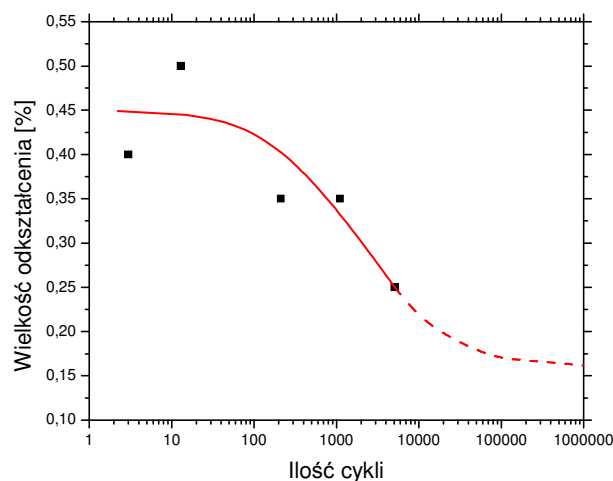
Rys. 51. Interferogramy dla próbki rozciąganej o 0.35% długości. Liczba w lewym dolnym rogu każdego z nich informuje o liczbie cykli rozciągających jakim poddano próbkę. Interferogramy otrzymane po wzbudzeniu termicznym próbki nie pokazały jakichkolwiek odspojień warstwy zaprawy.

Zależność ta ma kształt sigmoidalny. Początkowe wartości odkształceń odpowiadają pojedynczemu cyklowi lub niewielkiej liczbie cykli, po czym wytrzymałość zmęczeniowa obniża się do nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej (granicy zmęczenia). Odkształcenie 0,2 % wyznaczone dla 36500 cykli można przyjąć za tę wartość graniczną w kategoriach praktycznej oceny zagrożeń drewna polichromowanego. Tak więc nieograniczona wytrzymałość zmęczeniowa stanowi 1/3 odkształcenia powodującego uszkodzenie zaprawy w jednym cyklu.



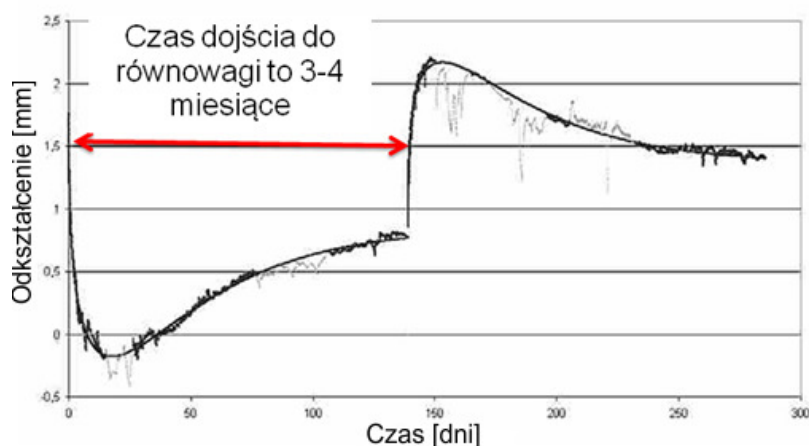
Rys. 52. Zbiorne dane dla wszystkich pomiarów. Krzywe oznaczono wartością rozciągania. Poszczególne krzywe pokazują całkowitą długość pęknięć w obszarze 3,5 cm x 3,5 cm w funkcji liczby cykli.

Otrzymane wyniki są zgodne z założeniami dotychczasowego opisu mechaniki obrazów na desce przyjmującego, że odkształcenie 0,25% jest wartością krytyczną powyżej której pojawia się uszkodzenie. Wyniki te wskazały również, że założenie to jest bardzo ostrożne; potrzeba było wiele tysięcy cykli odkształcenia, aby zaobserwować pierwsze objawy uszkodzenia.



Rys. 53. Zależność wytrzymałości zmęczeniowej od liczby cykli. Krzywa przerywana oznacza ekstrapolację do wartości odkształcenia 0,15% ponieważ dla niego nie zaobserwowano żadnych uszkodzeń powierzchni po 36500 cyklach.

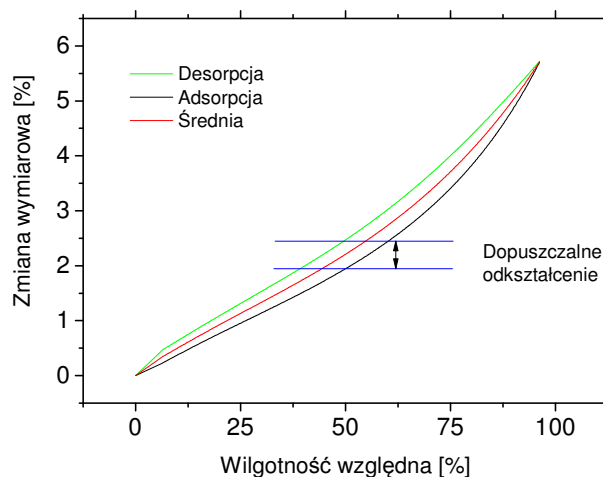
Jak opisano to w rozdziale 1.1.3, czas potrzebny na wywołanie określonego odkształcenia obiektu przez zmianę wilgotności względnej zależy od szybkości transportu pary wodnej i będzie znacząco zależał od wielkości obiektu. Ilustrują to dwa przykłady odpowiedzi wymiarowej. Na rys. 54 przedstawiono wykres, który pokazuje czas dojścia do równowagi deski drewnianej o grubości 4 cm przy zmianie wilgotności względnej o 20% [88]. W doświadczeniu pokryto jedną płaszczyznę deski nieprzepuszczalną warstwą żywicy silikonowej, co umożliwiło dyfuzję pary wodnej tylko przez jedną płaszczyznę. Powstały stąd niesymetryczny gradient zawartości wody w przekroju deski wywołał różną zmianę wymiarową dwóch płaszczyzn, odzwierciedlającą się w narastającym wygięciu deski: przy największym gradiencie wygięcie jest największe, a następnie powoli zanika w miarę wyrównywania się zawartości wody w objętości drewna. Zanik deformacji można więc uznać za dojście obiektu do nowego stanu równowagi wilgotnościowej. Czas potrzebny na osiągnięcie równowagi wyniósł około 140 dni. Wynik takiego samego eksperymentu przeprowadzonego przez autora dla deski z drewna lipowego o grubości 1 cm został przedstawiony wcześniej w rozdziale 2.1 na rys. 15. Zmniejszenie grubości deski spowodowało skrócenie czasu dochodzenia do nowej równowagi wilgotnościowej przez podłoże drewniane do 2 dni. Stąd w ciągu roku 182 cykle wilgotnościowe doprowadzą do odpowiadającego tej równowadze odkształcenia, a krytyczna liczba 5000 cykli odpowiada okresowi 27 lat.



Rys. 54. Odkształcenie w funkcji czasu dla pomiaru, podczas którego zmieniano wilgotność względną z 63% do 45 % a następnie na 65% [88]. Grubość badanej deski wynosiła 4 cm.

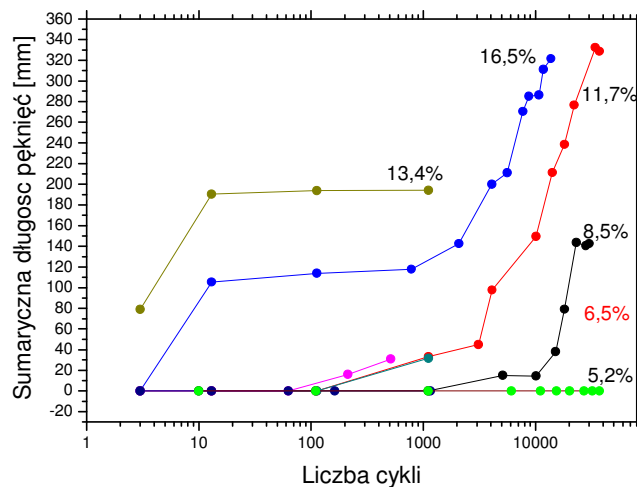
7.1.3. Przeliczanie krytycznych wartości odkształceń na dopuszczalne zmiany wilgotności względnej

Problem przeliczenia krytycznych odkształceń wyznaczonych w testach opisanych w rozdziale 7.1.2.2 na dopuszczalne zmiany wilgotności względnej w otoczeniu polichromowanego drewna jest złożonym zagadnieniem o krytycznym znaczeniu dla nauki o ochronie dziedzictwa kulturowego. Najprostszym oszacowaniem jest posłużenie się średnią zależnością zmiany wymiarowej drewna od wilgotności względnej. Zależność taką przedstawiono na rys. 55 dla drewna lipowego, którego wilgotnościowe współczynniki zmiany wymiarowej są typowe dla wszystkich gatunków drewna w środkowym zakresie wilgotności względnych.



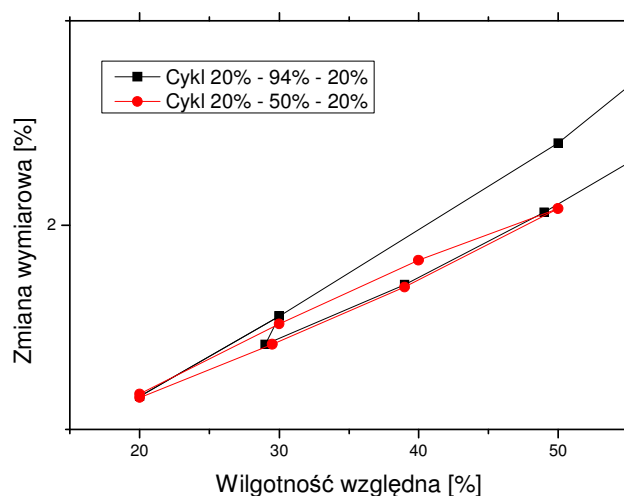
Rys. 55. Doświadczalna krzywa zmiany wymiarowej dla drewna lipy pod wpływem adsorpcji i desorpcji pary wodnej.

Na tym samym rysunku dokonano opisanego oszacowania dopuszczalnej zmiany wilgotności względnej od poziomu 50 %rh. Odkształceniu krytycznemu 0,2% odpowiada zmiana wilgotności ± 5 %rh. Uwzględnienie niewielkiej odpowiedzi wymiarowej warstwy zaprawy, której wilgotnościowy współczynnik rozszerzalności został przyjęty na poziomie 0,015 % 1/%rh [30], rozszerzyło zakres dopuszczalnych zmian do przedziału $\pm 6,5$ %rh. Na rys. 56 ponownie przedstawiono zbiorcze wyniki z rozdziału 7.1.2 i przy czym odkształcenia rozciągające przeliczono na zmiany wilgotności względnej, od średniego poziomu 50 %rh takie odkształcenie wywołujące.



Rys. 56. Zbiór danych dla wszystkich desek. Krzywe oznaczono wartością zmiany wilgotności względnej od średniego poziomu 50 %rh wywołującej wywołane w pomiarach odkształcenia.

Kolejnym etapem oszacowania jest uwzględnienie efektu histerezy sorpcji dla drewna. Na rys. 57 przedstawiono doświadczalną krzywą zmiany dla badanej próbki drewna lipowego otrzymaną dla następującego szeregu zmian wilgotności względnej : 20% - 94% - 20% oraz 20% - 50% - 20%.



Rys. 57. Doświadczalnie otrzymane krzywe histerezy dla drewna lipy z naniesioną granicą bezpiecznej fluktuacji centrowanej na 50% wilgotności względnej.

Jak można zauważyć na rys. 57 nachylenie krzywej adsorpcji przy zejściu z 50% do 20%rh dla mniejszego cyklu jest mniejsze aniżeli dla cyklu większego w tym samym przedziale. Uwzględnienie tego zjawiska pozwala na wprowadzenie poprawki która powoduje wzrost dopuszczalnego zakresu zmian wilgotności z $\pm 6,5\%rh$ obliczonego dla średniej histerezy do $\pm 8,5\%rh$.

Dotychczasowe rozważania ograniczały się do przeliczenia określonego odkształcenia warstwy dekoracyjnej na zmiany wilgotności względnej takie odkształcenie wywołujące. Nie brały one pod uwagę czasu potrzebnego na zajście zmiany zawartości wody w obiekcie prowadzące do odkształcenia. Tymczasem wyznaczone krzywe zmęczeniowe pokazują, że rzeczywistym czynnikiem zagrożenia jest liczba odkształceń, a więc liczba zmian wilgotności względnej je wywołujących, jakim poddany zostanie obiekt w określonym czasie, na przykład w ciągu 100 lat. Jak pokazano to w poprzednim rozdziale, czas odpowiedzi wilgotnościowej zależy od rozmiarów obiektów i parametrów dyfuzji pary wodnej przez materiały je budujące. Zależności te i parametry są przedmiotem pomiarów i modelowania numerycznego prowadzonych w grupie badawczej, w której autor wykonał niniejszą pracę, ale wychodzą poza jej zakres tematyczny.

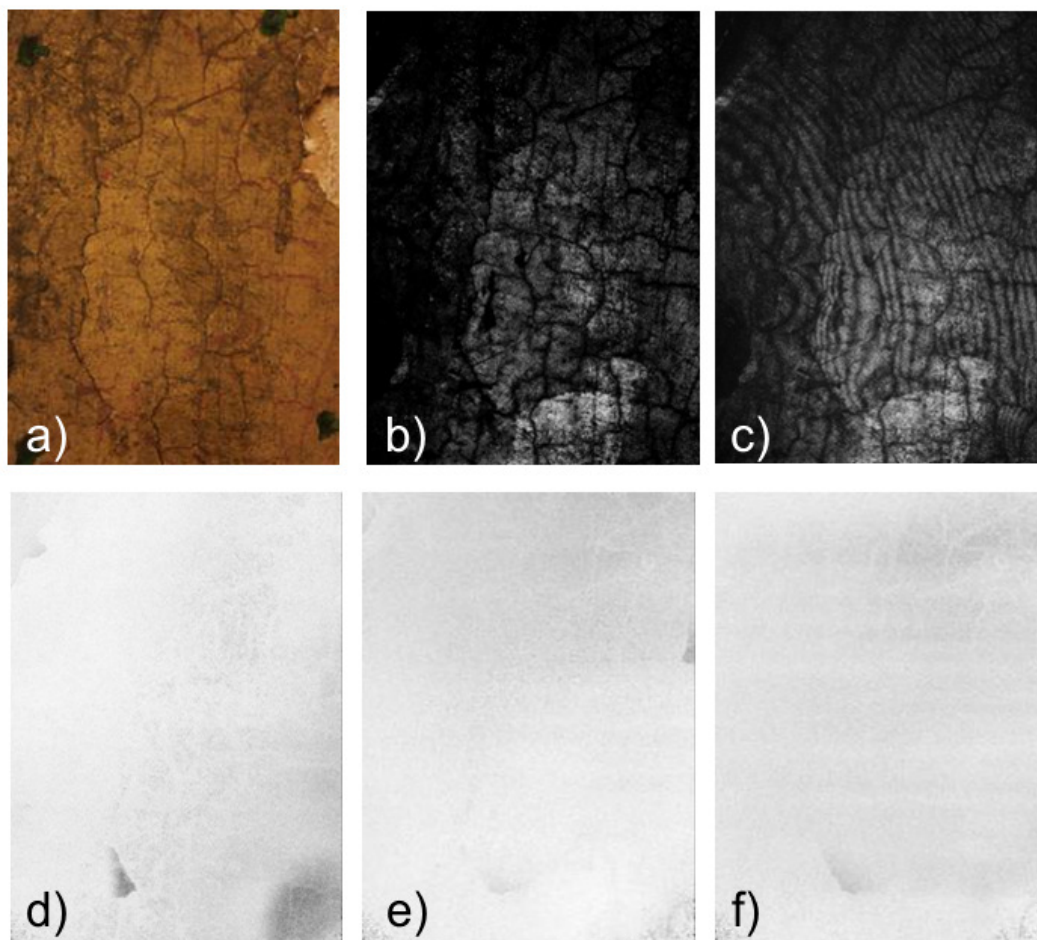
7.2. Pomiary uszkodzeń zabytkowych obiektów

7.2.1. Badania laboratoryjne

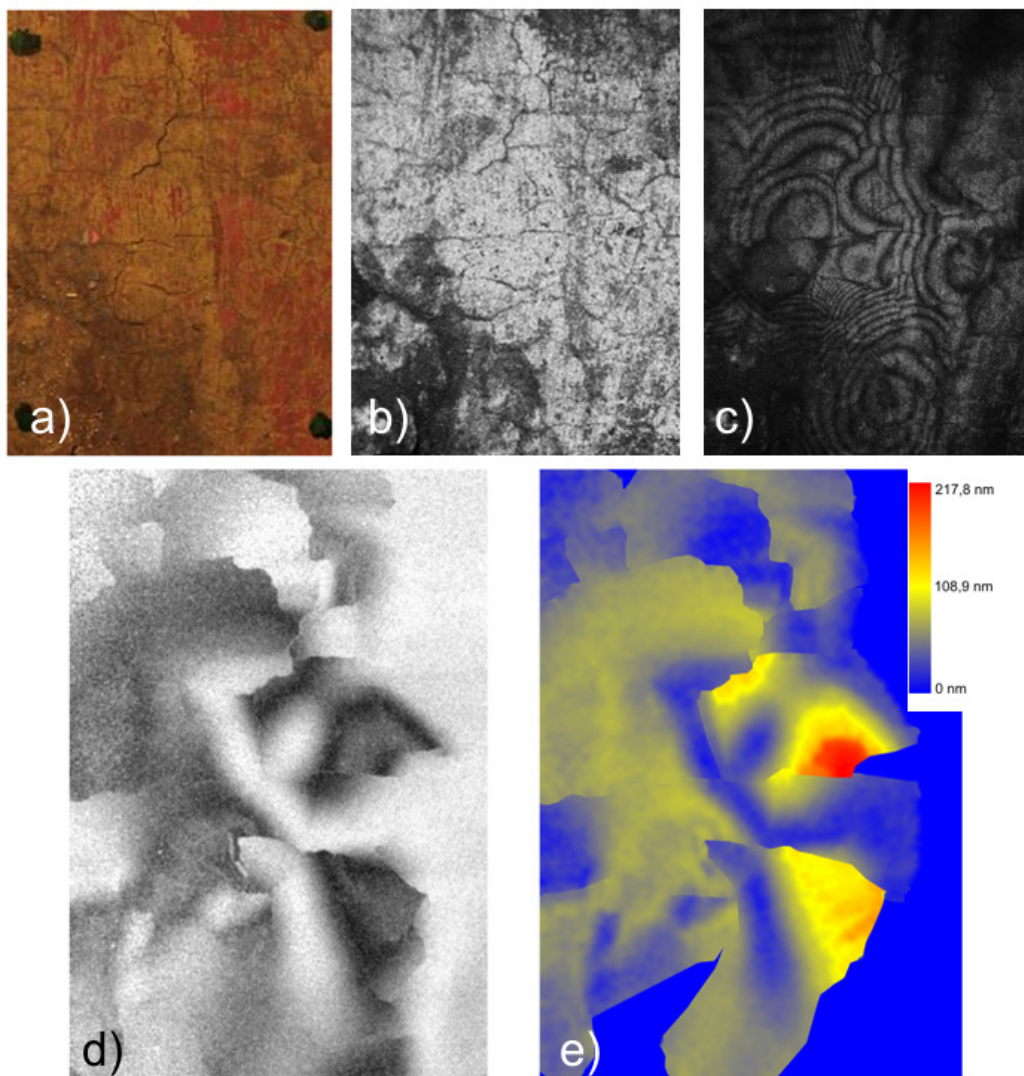
Kolejnym etapem badań były pomiary na zabytkowych próbkach drewna polichromowanego. Miały one na celu ocenę przydatności opracowanej metodyki do badania stanu zachowania rzeczywistych obiektów zabytkowych. Ważnym aspektem tej oceny było pytanie czy przy użyciu tak zbudowanego interferometru uda się zbadać powierzchnie o wyraźnie niejednorodnym współczynniku absorpcji światła, wynikającym z wielobarwnej kompozycji obrazu. Należy przypomnieć, że badane wcześniej imitacje drewna polichromowanego były jednobarwne. Badania przeprowadzono na fragmentach polichromowanego drewna otrzymanych z Muzeum Narodowego w Krakowie. Badane obiekty były elementami polichromowanego ołtarza z XVII wieku. Dla próbek przeprowadzono pomiary metodami DIC, DSPI

ze wzbudzeniem termicznym oraz DSPI ze wzbudzeniem dźwiękiem. Na rys. 58 oraz 59 przedstawiono zbiorcze wyniki pomiarów dla dwóch obiektów.

Choć obie próbki pochodziły z tego samego zabytkowego obiektu i w wizualnej ocenie ich stan zachowania był zbliżony, to przeprowadzone pomiary wykazały znaczne różnice w adhezji warstw dekoracyjnych na obu próbkach. W przypadku pierwszej, mimo skomplikowanej struktury prążków interferencyjnych zarejestrowanych przy pomocy wzbudzenia termicznego (rys. 58) wykryto zaledwie nieznaczne odspojenia warstwy malarskiej. Widoczne są one głównie przy wzbudzeniu falą dźwiękową o niskiej częstotliwości (rys 58 d). Pomiary dla drugiej próbki pokazały natomiast rozległe odspojenia warstwy dekoracyjnej. Poniżej omówiono ten wynik szczegółowo.



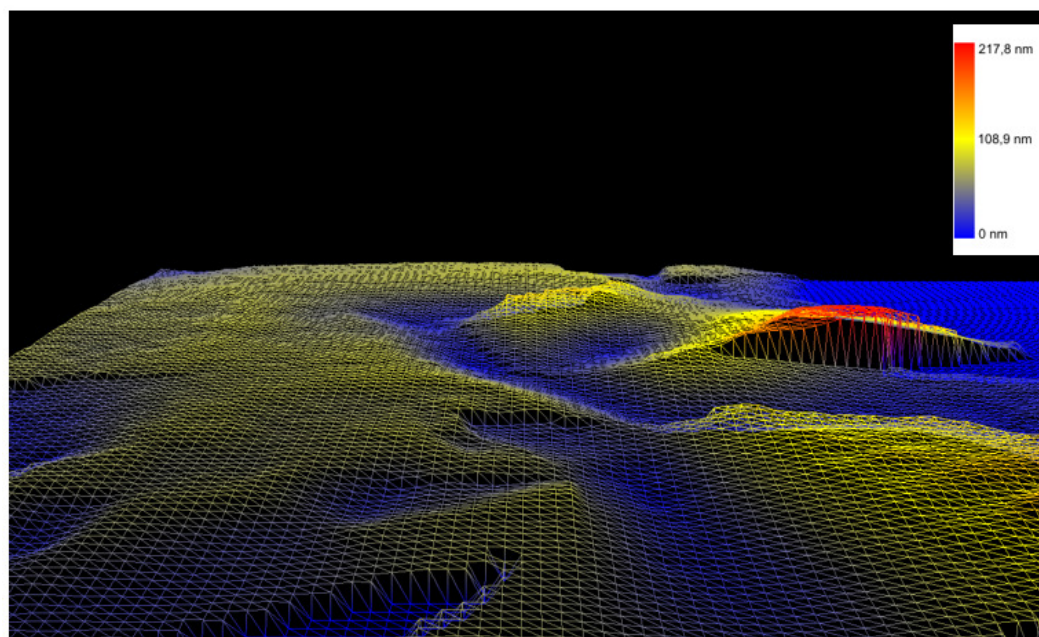
Rys. 58. Zbiorcze wyniki pomiarów dla pierwszej próbki z obiektu zabytkowego: (a) Zdjęcie badanego obszaru, (b) Interferogram DIC badanego obszaru, (c) Interferogram DSPI ze wzbudzeniem termicznym badanego obszaru, (d) Interferogram DSPI ze wzbudzeniem dźwiękiem dla częstotliwości 4500 Hz., (e) Interferogram DSPI ze wzbudzeniem dźwiękiem dla częstotliwości 8800 Hz, (f) Interferogram DSPI ze wzbudzeniem dźwiękiem dla częstotliwości 10400 Hz.



Rys. 59. Zbiorcze wyniki pomiarów dla drugiej próbki z obiektu zabytkowego. Opis znajduje się w tekście.

Na rys. 59a przedstawiono zdjęcie badanego obszaru. Interferogram DIC został przedstawiony na rysunku 59b. Interferogram 59c przedstawia wynik pomiaru DSPI ze wzbudzeniem termicznym. Można zauważyć na nim wiele różnych rodzajów prążków interferencyjnych. Pokazują one niejednorodności oraz potencjalne miejsca w których znajdują się odspojenia warstwy malarskiej od deski. Różnorodność tej warstwy powoduje powstanie skomplikowanej struktury prążków interferencyjnych, które niekoniecznie odzwierciedlają istniejące odkształcenia. Powodem tego jest niejednorodna struktura podkładu drewnianego oraz warstwy malarskiej prowadząca do różnej szybkości oddawania zgromadzonego ciepła. Dlatego pomiar ze

wzbudzeniem termicznym może być jedynie pomiarem wstępnym mającym wskazać miejsca, gdzie warto przeprowadzić pomiar ze wzbudzeniem dźwiękiem. Na rys. 59d przedstawiono interferogram powstały dla takiego pomiaru. Miejsca, które są jasne, nie drgają w ogóle. Miejsca ciemne na przemian z jaśniejszymi symbolizują minima modułu funkcji Bessela. Pomiar ten przeprowadzono dla częstotliwości 4600 Hz. Na rys. 59e przedstawiono dwuwymiarową mapę odspojień, a na rys. 60 trójwymiarowe odwzorowanie fragmentu tej mapy. Poszczególne kolory symbolizują wartość amplitudy drgania zgodnie z legendą.



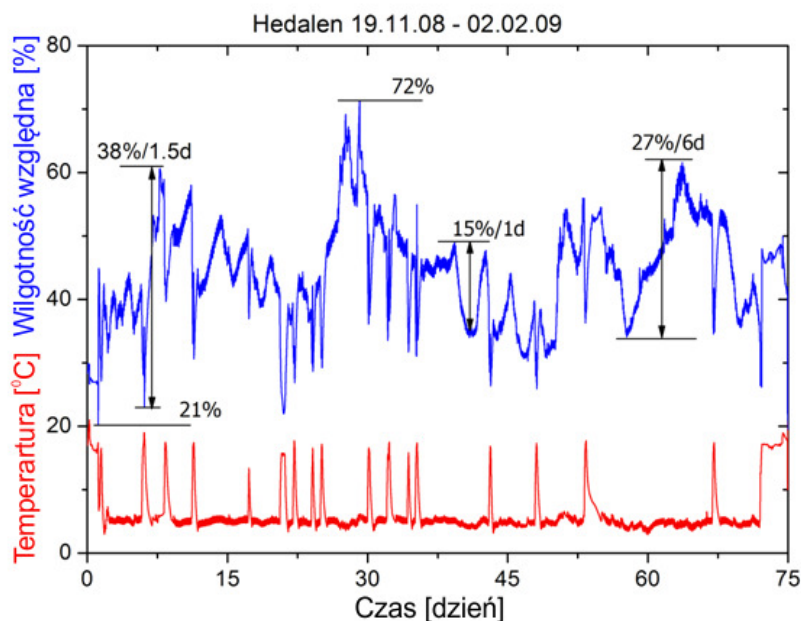
Rys. 60. Trójwymiarowe odwzorowanie części mapy z rys. 59d.

7.2.2. Badania *in situ*

Pomiary próbek z obiektów zabytkowych opisane w rozdziale 7.2.1 były wstępem do pomiarów *in situ*. Przedmiotem pomiaru był średniowieczny ołtarz w kościele w Hedalen w Norwegii przemalowany w XVIII wieku (tej powierzchni malarskiej dotyczyły przeprowadzone badania). Ołtarz poddano konserwacji w 2007 roku.

Potrzeba analizy stanu warstwy malarskiej niedługo po konserwacji była podyktowana między innymi obawami, że zaburzenia warunków klimatycznych

w kościele na skutek działającego w zimie ogrzewania mogą prowadzić do uszkodzeń polichromowanego drewna. W kościele działa ogrzewanie ciągle utrzymujące stałą minimalną temperaturę 7 °C . Ponadto na czas nabożeństw kościół jest ogrzewany do temperatury 18 °C. Okresowe ogrzewanie kościoła do relatywnie wysokiej temperatury powoduje fluktuacje wilgotności względnej pokazane dla znacznej części okresu zimowego na rys. 61. Maksymalna fluktuacja wilgotności zarejestrowana w tym okresie w koście wyniosła 38% w okresie 36 godzin.



Rys. 61. Ogrzewanie kościoła w Hedalen w okresie zimowym.

Badanie stanu zachowania warstwy malarskiej ołtarza przy użyciu interferometrii plamkowej przeprowadzono dwukrotnie w listopadzie 2008 oraz w kwietniu 2009 tj. przed i po okresie zimowym, w którym działało ogrzewanie.



Rys. 62. Zdjęcie ołtarza z zaznaczoną powierzchnią, która była badana. Na mniejszej ilustracji znajduje się interferogram zrobiony przy użyciu DSPI ze wzbudzeniem termicznym.

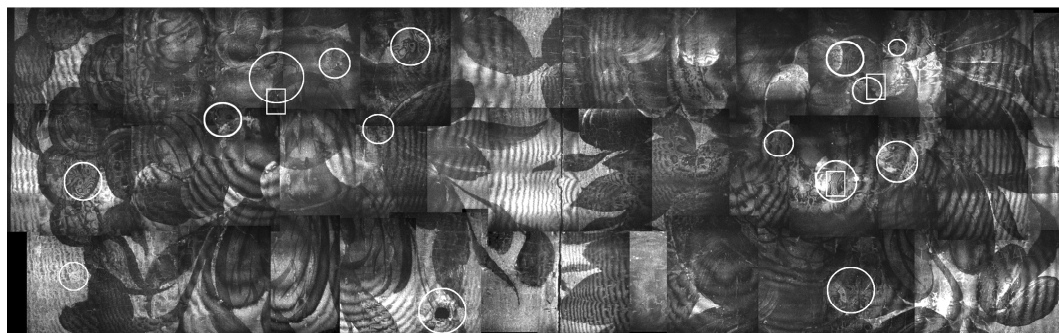
Do badań wybrano dolną kwartę prawego skrzydła ołtarza zaznaczoną na rys. 62. Obszar ten podzielono na 44 pola o rozmiarze 25 x 30 mm, które poddano kolejno badaniom interferometrycznym. Rys. 63 pokazuje pole oświetlone wiązką lasera w czasie pomiaru.



Rys. 63. Interferometr umieszczony w pobliżu ołtarza kościoła w Hedalen w Norwegii.

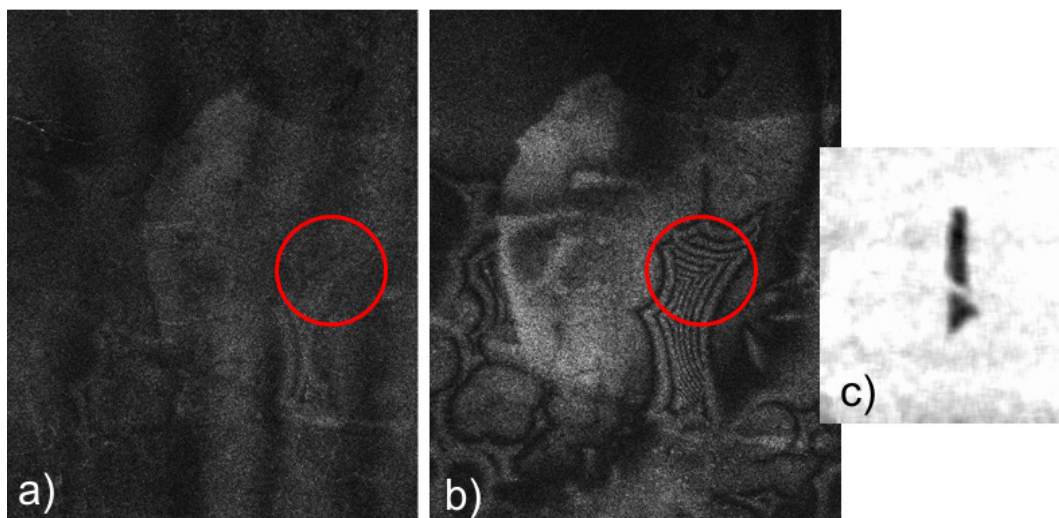
Relatywnie niewielki rozmiar pól pomiarowych zapewniał wysoką jakość obrazów i dawał układy prążków interferencyjnych o wysokiej rozdzielczości rzędu milimetrów.

Następnie interferogramy zestawiono w mapę badanego obszaru, co umożliwiało porównanie z jego zdjęciem fotograficznym.



Rys. 64. Interferogram pochodzący od wzbudzenia termicznego z zaznaczonymi miejscami, w których podejrzewano powstanie defektów. Kwadratami oznaczono miejsca, w których konserwatorzy wskazali defekty wykrywalne przez ogląd lub delikatne opukanie powierzchni, natomiast okręgami miejsca, które wskazał pomiar DSPI.

Wyniki analizy powierzchni malarskiej przy zastosowaniu interferometrii plamkowej są przedstawione na rys. 64. Metoda ujawniła 14 miejsc, w których pojawiały się anomalie w układzie prążków interferencyjnych. Badania tej samej powierzchni przez konserwatorów potwierdziły uszkodzenia tylko w 3 miejscach, wobec czego uznano, że pozostałe anomalie były spowodowane większą grubością farby, nieciągłością pomiędzy warstwą pierwotną a retuszami wykonanymi przez konserwatorów, lub nieregularnościami powierzchni wynikającymi z wgłębień w warstwie malarskiej. Interferometria plamkowa ujawniła jedno odspojenie warstwy malarskiej w stadium początkowym, które nie było widoczne podczas oglądu obiektu przez konserwatora. Kontur odspojonego fragmentu warstwy malarskiej o rozmiarach 5 x 2 mm uwidaczniają skupiska prążków interferometrycznych, uzyskane po wzbudzeniu termicznym powierzchni (rys. 65a i b).



Rys. 65. Zestawienie interferogramów dla miejsca z defektem: (a) Interferogram DSPI ze wzbudzeniem termicznym który został zrobiony podczas pierwszej wizyty w Hedalen, (b) Interferogram DSPI ze wzbudzeniem termicznym, który został zrobiony podczas drugiej wizyty w Hedalen, (c) Interferogram DSPI ze wzbudzeniem dźwiękiem, dzięki któremu udało się zidentyfikować odspojenie. Na interferogramach ze wzbudzeniem termicznym zaznaczono czerwonym okręgiem miejsce, w którym znajduje się defekt.

Dla miejsca tego uzyskano również interferogram przy użyciu wzbudzenia powierzchni dźwiękiem, co pokazano na tym samym rysunku (rys. 65c). Jednakże podczas pierwszego pomiaru nie udało się zarejestrować wibracji powierzchni podczas wzbudzenia dźwiękiem. Świadczy to o tym, że badany fragment powierzchni nie był jeszcze dostatecznie odspojony, aby pobudzić go do drgań i w trakcie kilku miesięcy pomiędzy pomiarami nastąpiło odspojenie. Konserwatorzy opiekujący się zabytkiem uznali ujawnione nowe uszkodzenie warstwy malarskiej za niewielkie i niekwalifikujące się do naprawy. Uznali stąd, że zaburzenia wilgotności względnej wywołane przez ogrzewanie w jednym okresie grzewczym nie spowodowało niepokojących uszkodzeń polichromii. Diagnoza taka miała dla nich oraz wspólnoty parafialnej duże znaczenie praktycznie, ponieważ ułatwiła decyzję o pozostawieniu ogrzewania kościoła w niezmienionej postaci oraz systematycznego diagnozowania ewentualnego rozwoju uszkodzeń polichromii w przyszłości.

Interesującym naukowym wynikiem przeprowadzonych badań jest obserwacja, że rzeczywisty obiekt zabytkowy przetrwał bez uszkodzeń wahania wilgotności względnej wielokrotnie większe od przedziału $\pm 8,5\%$ wyznaczonego w tej pracy. Jedną z ważnych przyczyn jest zapewne znaczne spękanie badanej warstwy dekoracyjnej, jej

„aklimatyzacja”, zagadnienie analizowane dokładnie w rozdziale 2.3. Badania rzeczywistych obiektów zabytkowych zwracają uwagę na konieczność ustalenia zależności krytycznego odkształcenia warstwy polichromii od już osiągniętego stopnia spękania tej warstwy. W ten sposób jakościowa koncepcja ‘aklimatyzacji’ polichromii na drewnie do wahań parametrów klimatu poprzez spękanie znajdzie ilościowy opis, a dopuszczalne wahania wilgotności względnych odniosą się do układów fizycznych bliskich obiektom zabytkowym, takim jak badany ołtarz w kościele w Hedalen.

Należy podkreślić w tym miejscu, że opisana informacja została uzyskana przez urządzenie DSPI położone na górnej powierzchni ołtarza, bez możliwości wyizolowania wibracji pochodzących z otoczenia. Brak stabilizacji urządzenia i obiektu badań, oraz gradienty temperatury nieuniknione w budowlach zabytkowych ograniczyły zdolność techniki pomiarowej do rejestrowania bardzo niewielkich nieregularności powierzchni. W przypadku powtarzania pomiarów tej samej płaszczyzny malarskiej trzeba to uznać paradoksalnie za okoliczność korzystną, gdyż pozwala ona na uśrednienie anomalii prążkowych pochodzących od znacznej ilości niewielkich lokalnych nieregularności powierzchni i obserwowanie na interferogramach jedynie zmian znaczących.

Kolejne badania *in situ* polegały na analizie stanu zachowania warstwy malarskiej na obrazach tablicowych wzmocnionych parkietą. Znaczna część będących w zbiorach Muzeum Narodowe w Krakowie obrazów na podłożu drewnianym posiada różnego typu wzmocnienia konstrukcyjne, w tym parkietaż. Długofalowym celem pomiarów jest określenie wpływu parkietażu na stan zachowania obiektu i ustalenie na tej podstawie optymalnej strategii jego ochrony. Przykładem obiektu badanego w Pracowni Konserwacji Malarstwa i Rzeźby w Pałacu bpa Erazma Ciołka jest obraz ŚŚ. *Bonawentura, Bernard, Augustyn i Benedykt*. Obraz o wymiarach 78 x 56 cm jest wykonany w technice temperowej. Powstał około 1500 roku, a drewniany parkietaż wzmacniający podobrazie pochodzi z 1977 roku. Na rys. 66 zaprezentowano zdjęcie badanego obiektu z zaznaczonymi obszarami, na których przeprowadzono pomiary stanu zachowania powierzchni wykorzystując DSPI.



Rys. 66. ŚŚ Bonawentura, Bernard z Clairvaux, Benedykt z Nursii i Augustyn, koniec XV wieku, wymiary: 78cm x 56cm, tempera na desce, deska ścieniona, parkietowana. Kolorem zielonym oraz czerwonym zaznaczono obszary, na których przeprowadzono pomiary wykorzystując DSPI.

Pierwsza seria pomiarów polegała na wzbudzeniu termicznym badanej powierzchni i rejestracji interferogramów. Metoda ta pozwoliła na wykrycie obszarów, w których występują nawarstwienia farby, przemalowania i retusze. Na rys. 67 oraz 68 przedstawiono zestawienie tych interferogramów ze zdjęciami fotograficznymi badanej powierzchni.



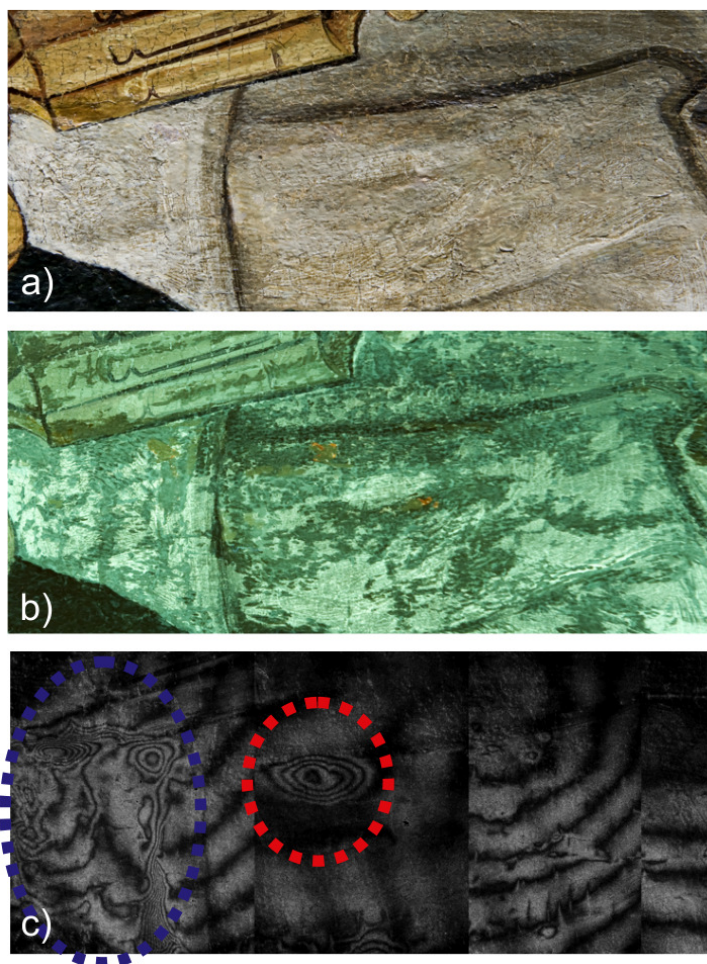
Rys. 67. Zestawienie interferogramu DSPI po wzbudzeniu termicznym (c) ze zdjęciem fotograficznym badanej powierzchni z nałożonym parkietażem (b) oraz samym zdjęciem fotograficznym badanej powierzchni (a).



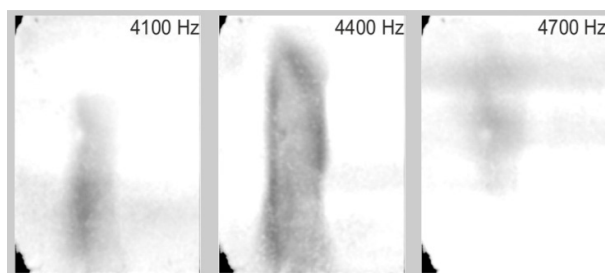
Rys. 68. Zestawienie interferogramu DSPI po wzbudzeniu termicznym (b) ze zdjęciem fotograficznym badanej powierzchni (a). Na rysunku (b) zaznaczono kolorem miejsca, w których był przeprowadzony pomiar z użyciem wzbudzenia akustycznego.

Następnie, dla wybranych na podstawie pomiarów ze wzbudzeniem termicznym obszarów, użyto wzbudzenia akustycznego w celu scharakteryzowania odspojień warstw dekoracyjnych od drewnianego podłoża. Na rys. 69 przedstawiono zestawienie obszarów w których stosowano wymuszenie akustyczne ze zdjęciami wykonanymi w świetle ultrafioletowym oraz makrofotografiami wykonanymi w świetle widzialnym. Wykorzystanie oświetlenia UV pozwala na wykrycie miejsc, w których wykonano retusze (widoczne na rys. 69b jako brązowe obszary). Na rys. 70 oraz 71 przedstawiono wyniki pomiarów ze wzbudzeniem akustycznym. Wykryto korelacje pomiędzy miejscami, w których wykonywane były retusze i odspojeniami farby, co oznacza, że obraz uszkodza się stale w tych samych miejscach. Może to być spowodowane przez konstrukcję parkietu, ale potwierdzenie tej tezy wymaga dalszych analiz, w szczególności dalszego monitorowania rozwoju defektów warstwy dekoracyjnej.

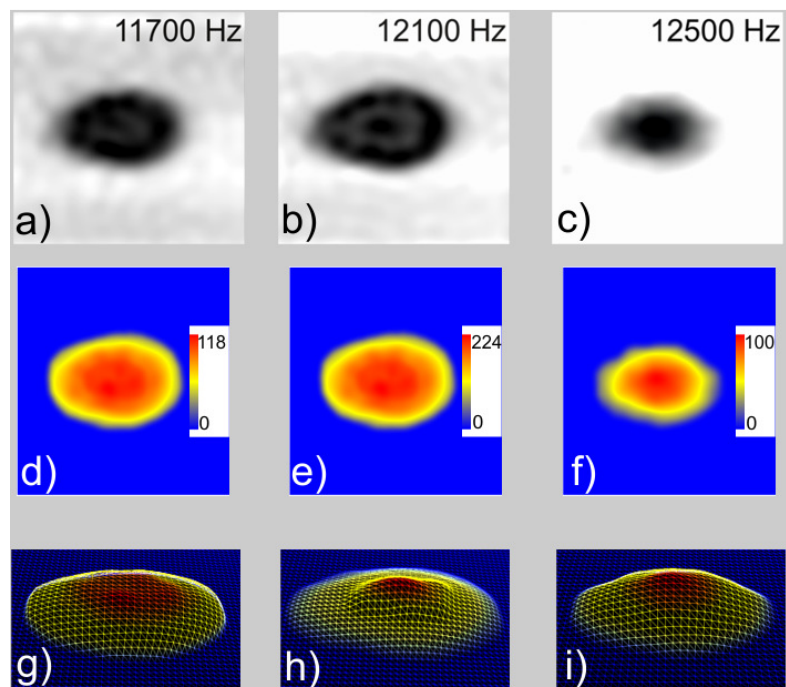
Muzeum Narodowe w Krakowie wykazało zainteresowanie prowadzeniem dalszych okresowych pomiarów stanu zachowania powierzchni obrazów przy użyciu DSPI i praktycznym wykorzystaniem wyników do określenia optymalnej ochrony zbiorów.



Rys. 69. Zestawienie interferogramu DSPI po wzbudzeniu termicznym (c) ze zdjęciem makrofotograficznym badanej powierzchni z oświetleniem UV (b) oraz samym zdjęciem makrofotograficznym badanej powierzchni (a). Na rysunku (c) zaznaczono kolorem niebieskim oraz czerwonym miejsca, w których zlokalizowano odspojenia warstwy malarskiej po pomiarze z użyciem wzbudzenia akustycznego.



Rys. 70. Interferogramy zarejestrowane podczas wymuszenia akustycznego obszaru oznaczonego kolorem niebieskim na rys. 69. W prawym górnym rogu każdego z nich znajduje się częstotliwość wymuszającej fali dźwiękowej.



Rys. 71 Interferogramy zarejestrowane podczas wymuszenia akustycznego obszaru oznaczonego kolorem czerwonym na rys. 69. Grupy rysunków (a, d, g), (b, e, h) oraz (c, f, i) odpowiadają analizie wyników pomiarowych dla częstotliwości oznaczonych na interferogramach a, b oraz c. Na rysunkach d, e, f przedstawiono dwuwymiarową mapę amplitudy wibracji. Skale na legendach odpowiadają nanometrom. Poszczególne kolory odpowiadają amplitudzie wibracji. Na rysunkach g, h, i przedstawiono trójwymiarowe wizualizacje zarejestrowanych drgań. Skala kolorów jest taka sama jak w legendach odpowiadających rysunkom d, e, f.

7.3. Wnioski końcowe

Zastosowana w pracy metodyka polegającą na poddaniu próbek imitujących zabytkowe drewno polichromowane seriom cykli rozciągających naśladujących odpowiedź drewna na zmiany wilgotności względnej otoczenia oraz śledzeniu uszkodzeń polichromii przy zastosowaniu interferometrii plamkowej, pozwoliła na znaczne poszerzenie opisu zagrożeń drewna polichromowanego w stosunku do opisu dotychczas istniejącego w literaturze przedmiotu. W szczególności:

- wyznaczono krzywą zmęczenia warstwy dekoracyjnej na drewnie, czyli zależność krytycznej wartości odkształcenia rozciągającego, dla którego następuje uszkodzenie tej warstwy, od liczby powtarzających się cykli rozciągających
- wykazano, że dla 36500 cykli, co dla bodźców powtarzających się codziennie odpowiada stu latom przechowywania obiektu, odkształcenie krytyczne wynosi 0,2%

- wartość ta stała się kryterium wyznaczenia dopuszczalnych wahań wilgotności względnej w otoczeniu drewna polichromowanego, wywołujących odkształcenia polichromii poniżej poziomu krytycznego.

Należy zaznaczyć, że uzyskany opis podatności polichromii na uszkodzenia oparto na bezpośredniej obserwacji procesu powstawania uszkodzeń na próbkach jak najdokładniej imitujących zabytki drewna polichromowanego. Podejście to było nowatorskie, ponieważ dotychczas analiza uszkodzeń obiektów była bardzo uproszczona i opierała się na określaniu właściwości mechanicznych poszczególnych ich komponentów, a nie całości. Rodziło to wątpliwości co do dokładności modelu nieuwzględniającego oddziaływania poszczególnych materiałów w złożonej strukturze polichromii na drewnie.

Należy również zaznaczyć, że przeprowadzone badania podają bardzo zachowawcze poziomy odkształceń krytycznych, odniesionych do pierwszych uszkodzeń warstwy dekoracyjnej na poziomie mikrometrycznym, dzięki zastosowaniu precyzyjnych technik interferometrii plamkowej oraz procedury analizy obrazu.

Skuteczność opracowanej metodyki analizy zmęczeniowych uszkodzeń polichromii na drewnie otwiera perspektywę dalszych niezwykle istotnych badań zależności krytycznego odkształcenia warstwy polichromii od już osiągniętego stopnia spękania tej warstwy, lub deformacji podłoża drewnianego. W ten sposób jakościowa koncepcja 'aklimatyzacji' polichromii na drewnie do wahań parametrów klimatu poprzez spękanie i deformację znajdzie ilościowy opis, a dopuszczalne wahania wilgotności względnych odniosą się do układów fizycznych bliskich obiektom zabytkowym, w których zawsze obserwuje się procesy deformacji i uszkodzeń. Następnym fascynującym wyzwaniem jest użycie wyznaczonej w pracy funkcji zmęczeniowej do oceny zagrożeń konkretnych obiektów zabytkowych wywołanych rzeczywistymi zmianami warunków w muzeach i obiektach zabytkowych, które są kombinacją fluktuacji wilgotności względnej o różnych okresach i amplitudach.

Opracowanych techniki ilościowego pomiaru mikrouszkodzeń polichromii znalazły również zadawalające zastosowanie do diagnozowania rzeczywistych polichromii na drewnie w muzeach i obiektach zabytkowych. Opracowany w pracy przenośny interferometr plamkowy udowodnił swoją przydatność w badaniach zabytkowego ołtarza w kościele w Hedalen w Norwegii oraz obrazów na desce ze zbiorów Muzeum Narodowego w Krakowie. Stworzenie odpowiednich narzędzi

badania rozwoju mikrouszkodzeń *in situ*, w stadium początkowym na długo przed powstawaniem uszkodzenia dostrzegalnego gołym okiem, ma wielkie znaczenie praktyczne przy podejmowaniu decyzji o potrzebnych działaniach prewencyjnych przez władze konserwatorskie i opiekunów obiektów zabytkowych.

8. Literatura

- [1] P. Fratzl, "Cellulose and collagen: from fibres to tissues", *Curr Opin Colloid Interface Sci* (2003) 8:32
- [2] H. Lichtenegger, M. Muller, O. Paris, C. Riekkel, P. Fratzl, "Imaging of the helical arrangement of cellulose fibrils in wood by synchrotron X-ray microdiffraction", *J Appl Crystallogr* (1999) 32:1127
- [3] H.F. Jakob, D. Fengel, S.E. Tschegg, P. Fratzl, "The elementary cellulose fibril in *Picea abies*: comparison of transmission electron microscopy, small-angle X-ray scattering and wide angle X-ray scattering results", *Macromolecules* (1995) 28:8782
- [4] S. Andersson, R. Serimaa, M. Torkkeli, T. Paakkari, P. Saranpaa, E. Pesonen, "Microfibril angle of Norway spruce [*Picea abies* (L.) Karst] compression wood: comparison of measuring techniques", *J Wood Sci* (2000) 46:343
- [5] G. Almeida, S. Gagne, R.E. Hernandez, "A NMR study of water distribution in hardwoods at several equilibrium moisture contents", *Wood Sci Technol* (2007) 41:293
- [6] G. Almeida, R.E. Hernandez, "Changes in physical properties of tropical and temperate hardwoods below and above the fiber saturation point", *Wood Sci Technol* (2006) 40:599
- [7] K.S.W. Sing, D.H. Everett, R.A.W. Haul, L. Moscou, R. A. Pierotti, J. Rouquerol, T. Siemieniewska, "Reporting physisorption data for gas solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity", *Pure Appl Chem* (1985) 57:603
- [8] R. Jowitt, P.J. Wagstaffe, "The certification of the water content of microcrystalline cellulose (MCC) at 10 water activities", BCR Information Reference Materials. Report EUR 12429. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg (1989)
- [9] V. Kocherbitov, S. Ulvenlund, M. Kober, K. Jarring, T. Arnebrandt, "Hydration of microcrystalline cellulose and milled cellulose studied by sorption calorimetry", *J Phys Chem B* (2008) 112:3728
- [10] E.O. Timmermann, "Multilayer sorption parameters : BET or GAB values", *Colloids Surf A* (2003) 220:235
- [11] A.J. Hailwood, S. Horrobin, "Absorption of water by polymers. Analysis in terms of a simple model", *Trans Faraday Soc* (1946) 42B:84

- [12] Praca zbiorowa, "Wood Handbook: Wood as an Engineering Material", Forest Product Society, USA (1999)
- [13] P. Gu, A. Zink-Sharp, J. Sell, "Hypothesis on the role of cell wall structure in differential transverse shrinkage of wood", *Holz Roh- Werkst*, (2001) 59:436
- [14] H. Yamamoto, Y. Kojima, T. Okuyama, W. P. Abasolo, J. Gril, "Origin of the biomechanical properties of wood related to the fine structure of the multi-layered cell wall", *J Biomech Eng Trans ASME* (2002) 124:432
- [15] K. Krabbenhoft, L. Damkilde, "Double porosity models for description of water infiltration in wood", *Wood Sci Technol* (2004) 38:641
- [16] W. Olek, J. Weres, "Effects of the method of identification of the diffusion coefficient on accuracy of modeling bound water transfer in wood", *Transp Porous Med* (2007) 66:135
- [17] S. Q. Shi, "Diffusion model based on Fick's second law for the moisture adsorption process in wood fiber-based composites is it suitable or not?", *Wood Sci Technol* (2007) 41:645
- [18] D. Mannes, W. Sonderegger, S. Hering, E. Lehmann, P. Niemz, "Non-destructive determination and quantification of diffusion processes in wood by means of neutron imaging", *Holzforschung* (2009) 63:589
- [19] C. Rozas, I. Tomaselli, E. F. Zanoletto, "Internal mass transfer coefficient during drying of softwood (*Pinus elliottii* Engelm.) boards", *Wood Sci Technol* (2009) 43:361
- [20] Norma ASTM E96 / E96M – 05 Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials (2005)
- [21] Norma PKN – PN-ISO 2528:2000 Oznaczanie szybkości przenikania pary wodnej -- Metoda wagowa (miseczkowa) (2000)
- [22] D.M. Burch, W. C. Thomas, A.H. Fannery, "Water Vapor Permeability Measurements of Common Building Materials", *ASHRAE Transactions* (1992) V98
- [23] S. Jakieła, "Emisja akustyczna drewna w obiektach zabytkowych pod wpływem fluktuacji klimatu", praca doktorska, Instytut Katalizy i Fizykochemii Powierzchni PAN, Kraków (2007)
- [24] B. Madson, "Duration of load tests for wood in tension perpendicular to grain", *Forest Prod J* (1975) 25:8

- [25] M. Witlox, L. Carlyle, "A perfect ground is a very soul of the art (Kingston 1835): ground recipes for oil painting", w: Preprints ICOM Committee for Conservation, 14th Triennial Meeting, The Hague, red. I. Verger, James & James, London (2005) 519
- [26] R.J. Gettens, E.W. Fitzbugh, R.L. Feller, "Calcium carbonate whites", *Stud Conservat* (1974) 19:157
- [27] S. Michalski, "Crack mechanism in gilding", w: "Gilded Wood: Conservation and History", Sound View Press, Madison, Connecticut (1991) 171
- [28] M.F. Mecklenburg, C.S. Tumosa, "Mechanical behavior of paintings subjected to changes in temperature and relative humidity", w: "Art in Transit: Studies in the Transport of Paintings", red. M. Mecklenburg, National Gallery, Washington (1991) 173
- [29] M.F. Mecklenburg, "Some mechanical and physical properties of gilding gesso", w: "Gilded Wood Conservation and History", Sound View Press, Madison, Connecticut (1991) 163
- [30] M.F. Mecklenburg, C.S. Tumosa, D. Erhardt, "Structural response of painted wood surfaces to changes in ambient relative humidity", w: "Painted Wood: History and Conservation", red. V. Dorge, F.C. Howlett, The Getty Conservation Institute, Los Angeles (1998) 464
- [31] S. Jakiela, Ł. Bratasz, R. Kozłowski, "Numerical modeling of moisture movement and related stress field in lime wood subjected to changing climate conditions", *Wood Sci Technol* (2008) 42:21
- [32] O. Allegretti, F. Raffaelli, "Barrier Effect to Water Vapour of Early European Painting Materials on Wood Panels", *Stud Conservat* (2008) 53:187
- [33] "Au coeur de La Joconde, Léonard de Vinci décodé", Gallimard i Musée du Louvre Editions, Paryż (2006)
- [34] S. Michalski, "The ideal climate, risk management, the ASHRAE chapter, proofed fluctuations, and towards a full risk analysis model", w: "Proceedings of Experts Roundtable on Sustainable Climate Management Strategies, Tenerife 2007" red. F. Boersma, Getty Conservation Institute, Los Angeles (2009) w druku, lub www.getty.edu/conservation/science/climate/climate_expertsroundtable.html
- [35] Ł. Bratasz, D. Camuffo, R. Kozłowski, "Target microclimate for preservation derived from past indoor conditions", w: "Museum Microclimates", red. T. Padfield, K. Borchersen, Narodowe Muzeum Danii, Kopenhaga (2007) 129

- [36] Norma europejska: EN 15757:2010 “Conservation of Cultural Property. Specifications for temperature and relative humidity to limit climate-induced mechanical damage in organic hygroscopic materials”
- [37] Norma włoska : UNI 10969:2002 “Cultural Heritage - General Principles for the Choice and the Control of the Microclimate to Preserve Cultural Heritage in Indoor Environments”
- [38] S. Jakiela, Ł. Bratasz, R. Kozłowski, “Acoustic emission for tracing the evolution of damage in wooden objects”, *Stud Conservat* (2007) 52:101
- [39] S. Jakiela, Ł. Bratasz, R. Kozłowski, “Acoustic emission for tracing fracture intensity in lime wood due to climatic variations”, *Wood Sci Technol* (2008) 42:269
- [40] E. Baj, G. Bozzolato, “Numerical photogrammetry for the survey of the Leaning Tower of Pisa”, *J Photo Rem Sens* (1990) 44:325
- [41] A.G. Kucukkaya, “Photogrammetry and remote sensing in archaeology”, *J Quant Spect Rad Trans* (2004) 88:83
- [42] G. Guidi, C. Atzeni, M. Seracini, S. Lazzari, “Painting survey by 3D optical scanning: the case of Adoration of the Magi by Leonardo da Vinci”, *Stud Conservat* (2004), 49:1
- [43] C. Balas, V. Papadakis, N. Papadakis, A. Papadakis, E. Vazgiouraki, G. Themelis, “A novel hyper-spectral imaging apparatus for the non-destructive analysis of objects of artistic and historic value” , *J Cult Herit* (2003) 4:330
- [44] E.P. Baltsavias, “A comparison between photogrammetry and laser scanning”, *J Photo Rem Sens* (1999) 54:83
- [45] C.L. Ogleby, “Advances in the digital recording of cultural monuments”, *J Photo Rem Sens* (1995) 50:8
- [46] E. Berndt, J. Carlos, “Cultural heritage in the mature era of computer graphics”, *IEEE Comput Graph Appl* (2000) 20:36
- [47] J.F. Asmus, “Non-divestment laser applications in art conservation”, *J Cult Herit* (2003) 4:289
- [48] P. Theokaris, A. Viafiadakis, C. Liakopoulos, “Theory of Spatial Moiré Fringes”, *J Opt Soc Am* (1968), 58:1092
- [49] A. Moreno Yeras, R. Gonzalez Pena, R. Junco, “Moiré topography: alternative technique in health care”, *Opt Las Eng* (2003) 40:105

- [50] P. Benoit, E. Mathieu, J. Hormie´re, A. Thomas, "Characterization and control of threedimensional objects using fringe projection techniques", *Nouv Rev Opt* (1975) 2: 67
- [51] P. Theokaris, "Moire´ Fringes in Strain Analysis", Pergamon, New York (1969)
- [52] J. Der Hovanesian, Y.Y. Hung, "Moiré Contour-Sum Contour-Difference, and Vibration Analysis of Arbitrary Objects", *Appl Optics* (1971), 10:2734
- [53] H. Takasaki, "Moiré Topography", *Appl Optics* (1970) 9:1467
- [54] W.J. Ryu, Y.J. Kang, S.H. Baik, S.J. Kang, "A study on the 3-D measurement by using digital projection moiré method", *Optik* (2008) 119:453
- [55] C.M. Vest, "Holographic Interferometry", Wiley, Nowy Jork (1979)
- [56] P.K. Rastogi, "Holographic Interferometry", Springer Verlag, Berlin (1994)
- [57] T. Kreis, "Holographic Interferometry", Akademie Verlag, Berlin (1996)
- [58] D. Paoletti, G. Schirripa Spagnolo, "Interferometric methods for artwork diagnostics", *Prog Opt* (1996) 35:197
- [59] S. Amadesi, F. Gori, R. Grella, G. Guattari, "Holographic methods for painting diagnostics", *Appl Opt* (1974) 13:2009
- [60] R.B. Owen, P.D. Sheets, "The potential of holography and optical contouring for archaeometry", *Archaeometry* (1989) 31:13
- [61] P. Zanetta, "Optical Techniques Applied to Measurements in Art", praca doktorska, Uniwersytet Loughborough (1994)
- [62] J.F. Asmus, "Holographic interferometry of painted surfaces", w: Preprints of the Contributions to the Oxford Congress, "Conservation of Wood in Painting and the Decorative Arts", red. N.S. Brommelle, A. Moncrieff, P. Smith, IIC, Londyn (1978) 141
- [63] V.B. Markov, G.I. Mironjuk, I.G. Yavtushenko, "Holography and Its Application for Museum Work", UNESCO Press, Paryż (1984)
- [64] J.M. Dulieu-Barton, L. Dokos, D. Eastop, F. Lennard, A.R. Chambers, M. Sahin, "Deformation and strain measurement techniques for the inspection of damage in works of art", *Reviews in Conservation* (2005) 6:63
- [65] D. Paoletti, G.S. Spagnolo, "Application of fibre optic digital speckle interferometry to mural painting diagnostics", *Meas Sci Technol* (1993) 4:614

- [66] G.S. Spagnolo, D. Ambrosini, G. Guattari, "Electrooptic holography system and digital image processing for in situ analysis of microclimate variation on artworks", *J Opt* (1997) 28:99
- [67] P. Castellini, E. Esposito, B. Marchetti, N. Paone, E.P. Tomasini, "New applications of Scanning Laser Doppler Vibrometry (SLDV) to non-destructive diagnostics of artworks: mosaics, ceramics, inlaid wood and easel painting", *J Cult Herit* (2003) 4:321
- [68] P. Castellini, E. Esposito, V. Legoux, N. Paone, M. Stefanaggi, E.P. Tomasini, "On field validation of non-invasive laser scanning vibrometer measurement of damaged frescoes: experiments on large walls artificially aged", *J Cult Herit* (2000) 1:349
- [69] P. Castellini, E. Esposito, N. Paone, E.P. Tomasini, "Non-invasive measurements of damage of frescoes paintings and icons by laser scanning vibrometer: experimental results on artificial samples and real works of art", *Measurement* (2000) 28:33
- [70] G.M. Carlomagno, C. Meola, "Infrared thermography in the restoration of cultural properties" w: Conference 4360 Thermosense XXIII Proceedings of SPIE (2001), vol. 4360
- [71] E. Grinzato, P.G. Bison, C. Bressan, A. Mazzoldi, "NDE of frescoes by infrared thermography and lateral heating", w: *Qirt* 98, EETI (1998) 64
- [72] G.M. Carlomagno, P.G. Berardi, „Unsteady thermotopography in nondestructive testing" w: "Proceedings of the III Infrared Information Exchange", red. C. Warren, St Louis (1976) 33
- [73] G. Schirippa Spagnolo, G. Guattari, E. Grinzato, P.G. Bison, D. Paoletti, D. Ambrosiani, "Frescoes diagnostics by electro-optic holography and infrared thermography". *NDTnet* 2000:5(1)
- [74] J. Wouters, M. Van Bos, K. Lamens, "Baroque Stucco Marble Decorations. II. Composition and Degradation of the Organic Materials in Historic Samples and Implications for their Conservation", *Stud Conservat* (2000) 45:169
- [75] D.J. Carr, C.R.T. Young, A. Phenix, R.D. Hibbert, "Development of a Physical Model of a Typical Nineteenth-Century English Canvas Painting", *Stud Conservat* (2003) 48:145
- [76] J.D. Rigden, E.I. Gordon, "The granularity of scattered optical maser light", *Proc. I. R. E.* (1962) 50:2367

- [77] K. Hinsch, "Laser speckle metrology - a tool serving the conservation of cultural heritage," w: "Oscillation, Waves and Interaction", red. T. Kurz, U. Parlitz, U. Kaatz, Universitätsverlag Gottingen (2007) 259
- [78] E. Bernikola, A. Nevin, and V. Tornari, "Rapid initial dimensional changes in wooden panel paintings due to simulated climate-induced alterations monitored by digital coherent out-of-plane interferometry," *Appl Phys A* (2009) 95:387
- [79] T.R. Moore, "A simple design for an electronic speckle pattern interferometer," *Am J Phys* (2004) 72:1380
- [80] M. Sjö Dahl, "Digital speckle photography in Digital speckle pattern interferometry and related techniques," w: "Digital Speckle Pattern Interferometry & Related Techniques" red. P.K. Rastogi. John Wiley, Chichester (2001) 289
- [81] K. Høgmoen, H.M. Pederson, "Measurement of small vibrations using electronic speckle pattern interferometry: Theory", *J Opt Soc Am* (1977) 67:1578
- [82] W.O. Wong , K.T. Chan, "Quantitative vibration amplitude measurement with time-averaged digital speckle pattern interferometry", *Opt Las Technol* (1998) 30:317
- [83] E. Vikhagen, "Vibration measurement using phase shifting tv-holography and digital image processing," *Opt Commun* (1989) 69:214
- [84] J.M. Huntley "Random phase measurement errors in digital speckle pattern interferometry", *Proc. SPIE* (1995) 2544:246
- [85] R. Kumar, Ch. Shakher, "Application of digital speckle pattern interferometry and wavelet transform in measurement of transverse vibrations in square plate", *Opt Las Eng* (2004) 42:585
- [86] R. Kumar, I.P. Singh, Ch. Shakher, "Measurement of out-of-plane static and dynamic deformations by processing digital speckle pattern interferometry fringes using wavelet transform", *Opt Las Eng* (2004) 41:81
- [87] E.M. Barj, M. Afifi, A.A. Idrissi, K. Nassim, S. Rachafi, "Speckle correlation fringes denoising using stationary wavelet transform. Application in the wavelet phase evaluation technique", *Opt Las Technol* (2006) 38:506
- [88] P.D. Vici, P. Mazzanti, L. Uzielli, "Mechanical response of wooden boards subjected to humidity step variations: climatic chamber measurements and fitted mathematical models", *J Cult Herit* (2006) 7:37