

Światłotrwałość i światłonietrwałość – o możliwościach wykorzystania wyników badań mikrofedometrycznych w ochronie zbiorów

DOI: 10.36155/NK.22.00003

Tomasz Łojewski, Małgorzata Grzelec

<https://orcid.org/0000-0003-4012-0405>, Scopus Author ID: 6602666927

<https://orcid.org/0000-0003-4589-4979>

notes 22_2020
konserwatorski

Badania wykonane na AGH zostały sfinansowane w części z subwencji Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego nr 16.16.160.557.

The research conducted at AGH was partially financed by a subsidy No. 16.16.160.557 of the Polish Ministry of Science and Education.

Summary: Tomasz Łojewski, Małgorzata Grzelec, *Light (in)sensitivity of materials: on the possible uses of microfading examination results in the protection of collections*

Microfading is an accelerated light exposure method used to non-destructively test light sensitivity of materials. It utilises a light beam of a very high intensity to illuminate a submillimetre spot on the surface of an object and to promote rapid fading of a dye. The method allows for comparison of samples fading rates and for extrapolation of the results to longer exposure times, providing conservators and curators with a tool for assessment of potential light damage to collections.

This paper describes the microfading method as well as the most up-to-date developments of the technique and compares it with other methods commonly used to test light sensitivity of materials. The core concepts related to the application of microfading in preventive conservation are introduced, and examples of different possibilities of using the results of MFT measurements in exhibition planning, collection monitoring and related research are discussed.

Badania starzeniowe

Badania starzeniowe, prowadzone powszechnie w przemyśle dla określenia czasu, przez jaki produkty utrzymają wymagane walory użytkowe, wykorzystywane są również w odniesieniu do materiałów i procedur stosowanych w konserwacji. Testy takie, zwykle oparte o precyzyjnie sformułowane zapisy norm, polegają na zastosowaniu jednego lub kilku czynników fizycznych lub/i chemicznych w sposób, który znacząco przyspieszy procesy degradacji obserwowane w normalnych warunkach. W niniejszym artykule przedmiotem zainteresowania jest badanie zmian w obiekcie, wywołanych ekspozycją na działanie światła. Omówimy w nim obecne możliwości wykonywania takich testów dla dzieł sztuki i zabytków, koncentrując się na sposobie interpretacji uzyskanych wyników w konserwacji prewencyjnej.

Tradycyjnie testy starzeniowe służące określeniu odporności na światło prowadzone są z użyciem komór zaopatrzonych w źródło ksenonowe, którego rozkład widmowy jest zgodny z rozkładem widmowym światła słonecznego. Poprzez dobór odpowiednich filtrów laboratoryjne symulatory światła słonecznego pozwalają uzyskać warunki odpowiadające oświetleniu wnętrza pomieszczeń światłem słonecznym padającym przez szybę okienną. W trakcie prowadzenia testu konieczna jest kontrola temperatury i wilgotności powietrza w komorze starzeniowej, co stanowi istotne techniczne wyzwanie, gdyż lampa ksenonowa emituje bardzo duże ilości ciepła. Kolejny problem związany z prowadzeniem starzenia światłem to zapewnienie identycznej iluminacji próbek umieszczonych w różnych miejscach komory. Rozpoznając tę trudność, norma ISO-4892-1¹ w części opisującej warunki ogólne testu dopuszcza odchyłki dla dawki światła i temperatury w wysokości aż +-10%. Rzeczywista temperatura starzonych próbek może wahać się w jeszcze szerszych granicach, gdyż zależy ona od barwy obiektu (dokładniej – reflektancji, czyli stosunku mocy światła odbitego od

¹ Międzynarodowa Organizacja Normalizacyjna (2001), *Tworzywa sztuczne – Metody ekspozycji na laboratoryjne źródła światła* (ISO 4892 – 1:2001).

badanej próbki względem światła odbitego od wzorca bieli). Z temperaturą testu powiązana jest wilgotność starzonego materiału – kolejna wielkość istotnie wpływająca na kinetykę degradacji. Niemożność zapewnienia stałości tych parametrów dla serii próbek o różnym wybarwieniu obniża jakość wyników uzyskiwanych w tradycyjnych komorach starzeniowych. Na koniec (wypunktowując słabości metody, dla której chce się przedstawić nowszą alternatywę) wspomnieć trzeba o sprawie fundamentalnej, czyli o niemożności zastosowania starzenia w komorach bezpośrednio do oceny światłotrwałości dzieł sztuki – badanie takie jest niszczące i może być prowadzone tylko dla obiektów (próbek) o niewielkich rozmiarach.

Mikrofedometria

W pracy opublikowanej w 1999 roku zaprezentowano wyniki testów starzenia światłem, prowadzonych z użyciem aparatury o radykalnie nowej konstrukcji, w której światło ogniskowane było na obszarze o średnicy zaledwie 0,2 mm². Dzięki uzyskanej w ten sposób bardzo dużej gęstości mocy światła³, czas prowadzenia testu uległ skróceniu do zaledwie 5-15 minut. Mały rozmiar plamki powoduje, że efekt starzenia nie jest widoczny dla oka człowieka, co otwiera drogę do badania oryginałów. W miejscu pomiaru nie dochodziło do podgrzania próbki, gdyż do powierzchni docierało tylko światło z zakresu widzialnego. Widmo odbiciowe i wyliczane z niego parametry kolorymetryczne zbierane były w trakcie testu w trybie ciągłym. W efekcie uzyskiwano krzywe zmian barwy, pozwalające nie tylko porównywać światłotrwałość serii próbek i odnosić ją do wzorców, ale również ekstrapolować wyniki do dłuższych czasów ekspozycji

² P. Whitmore, X. Pan, C. Bailie, *Predicting the fading of objects: Identification of fugitive colorants through direct nondestructive lightfastness measurements*, "Journal of the American Institute for Conservation" 1999, vol. 38, s. 395-409.

³ 7 Mlx, czyli ponad 50 x więcej niż w typowej komorze przy maksymalnej nastawie mocy wskazywanej przez normy, czyli 765 W/m².

w oparciu o realny kształt krzywej kinetycznej, oddającej charakterystykę biegnących procesów, a nie o upraszczające założenia o liniowym charakterze zależności: dawka – wielkość zmiany.

W ciągu 20 lat od przedstawienia pomysłu na konstrukcję aparatu i sposób prowadzenia pomiarów, urządzenie, które nazwaliśmy w Polsce mikrofedometrem (MFT, *Micro Fading Tester*), zbudowane zostało w wielu ośrodkach zajmujących się badaniem dzieł sztuki. Istotny impuls dla upowszechnienia techniki MFT na świecie miało pojawienie się na rynku (2017, Instytut Fotonowy, sp. z o.o., Kraków) pierwszego urządzenia fabrycznego z oprogramowaniem i szeregiem funkcji dostosowanych do specyfiki badania dzieł sztuki i zabytków. Aparat ten, produkowany w Polsce, wykorzystywany jest już w pracowniach konserwatorskich i laboratoriach badawczych w 12 krajach.

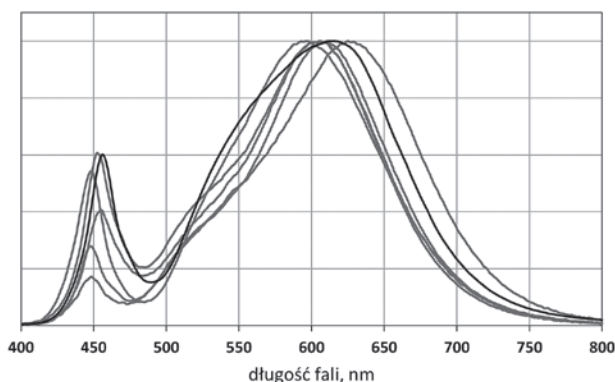
Tab. 1. Porównanie metod starzenia światłem

	Komora starzeniowa	MFT
Pomiar barwy	tylko start/stop	ciągły, punktowy, możliwość równoległego pomiaru refleksyjności
Źródła światła	ksenon (rzadziej halogen)	LED (w konstrukcjach własnych również ksenon)
Czas życia lampy	400–4000 h	50 000 h (dla LED)
Czas testu	100–400 h (możliwe jednoczesne starzenie wielu próbek)	5–15 min dla pojedynczego punktu
Zakres światłotrwałości testowanych próbek	1–8 BWStd – możliwość badania próbek relatywnie światłotrwałych	1–3(4) BWStd – badanie obiektów o niskiej światłotrwałości
Kontrola dawki	nominalnie $\pm 10\%$	błąd $< 0,5\%$
Słabe strony	test niszczący, długi czas i wysokie koszty testów, podgrzewanie i wysychanie próbek, prognozy oparte o dwupunktowy pomiar barwy (na początku i końcu starzenia)	problematiczne wyniki dla obiektów niehomogenicznych w skali < 1 mm, pomiary dla (zwykle) wielu pól barwnych na obiekcie, brak normalizacji sposobu prowadzenia testów

	Komora starzeniowa	MFT
Silne strony	możliwość badania próbek o dużej światłotrwałości, możliwość pomiaru barwy kolorymetrem przed i po teście, możliwość stosowania istniejących norm	możliwość badania oryginałów, badanie niezależne od rozmiaru obiektu, rodzaj światła identyczny ze współcześnie stosowanym oświetleniem (LED), wyznaczanie rzeczywistej krzywej kinetycznej starzenia

Krakowski mikrofedometr (dalszy opis jego dotyczy) wyposażony jest w źródło światła LED, którego rozkład spektralny mocy jest bardzo zbliżony do typowych białych diod LED, stosowanych coraz powszechniej do oświetlania obiektów w ekspozycjach muzealnych (rys. 1). Wielkość plamki pomiarowej ustalono na 0,4 mm, maksymalna moc świetlna wynosi 6,79 Mlx. Przy średnim czasie testu wynoszącym 10 minut dawka światła docierająca do obiektu to 1,13 Mlxh (megaluksogodziny), co można porównać do 74 miesięcy ekspozycji, przy stosowanym w wielu miejscach natężeniu oświetlenia równym 50 lx (10 h/dzień, 365 dni/rok).

Aparat *made in Poland* jest pierwszym mikrofedometrem wyposażonym w zautomatyzowany układ autofocus, co ma istotny wpływ zarówno na wygodę pracy, jak i uzyskiwane wyniki pomiarowe. W technice mikrofedometrii światło



Rys. 1.
Rozkład mocy widmowej komercyjnych opraw LED (linie szare) i źródła LED zastosowanego w MFT (linia czarna)

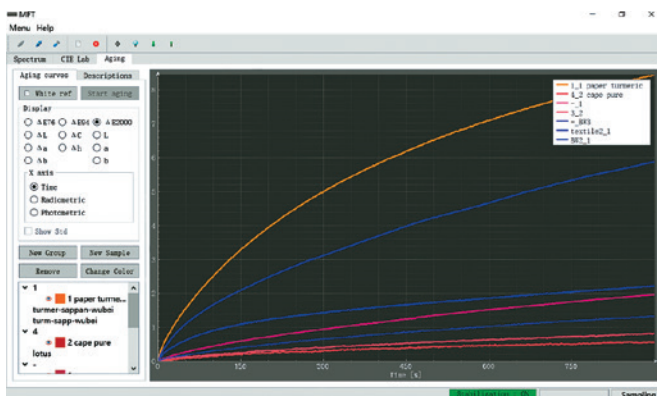
ze źródła skupiane jest przez odpowiedni układ optyczny na badanym obiekcie, po ustawieniu właściwej odległości plamka pomiarowa osiąga optymalną wielkość. Każda odchyłka, w górę lub dół, rozmywa ją i zmniejsza gęstość mocy świetlnej, z użyciem której starzony będzie obiekt. Precyzja ustawienia właściwej odległości roboczej ma więc kluczowe znaczenie dla poprawności i powtarzalności wyników starzenia.

Oprogramowanie sterujące przyrządem pozwala określić moment zakończenia pomiaru poprzez podanie czasu lub dawki światła wyrażonej w jednostkach foto- albo radiometrycznych (megaluksogodziny/watosekundy). Użytkownik ma również możliwość ustawienia wartości całkowitej zmiany barwy wyrażonej w jednostkach ΔE (wg CIE Lab 76, 94 lub 2000), przy której aparat sam zatrzyma naświetlanie obiektu. Funkcja ta pozwala zabezpieczyć się przed zmianami barwy, które użytkownik uznaje za zbyt duże, co w przypadku badania obiektów muzealnych stanowi istotny atut polskiego mikrofedometru. Dla zaawansowanych analiz przydatna jest opcja zbierania widm refleksyjności – oprócz zapisywania jako wyniku testu zmiany wielkości kolorymetrycznych, oprogramowanie zachowuje surowe dane ze spektrofotometru we wskazanych przez użytkownika interwałach i liczbie uśrednień. W trakcie testu wyniki pomiaru barwy wyświetlane są na ekranie w postaci krzywych ilustrujących zmiany barwy (fot. 2) – do wyboru są wszelkie kombinacje: czas lub dawka światła na osi odciętych (x) i dowolne wartości kolorymetryczne z przestrzeni CIE Lab (L, a, b, ΔL , Δa , Δb , ΔE_{76} , ΔE_{94} , ΔE_{2000}) na osi rzędnych (y). Istnieje też możliwość wyświetlenia krzywej zmiany nasycenia barwy (ΔC) i jej odcienia (ΔH). Na ekranie oprogramowania sterującego można również wyświetlić porównanie barwy badanej próbki na początku i w danej chwili testu (z dokładnością reprodukcji barwy do jakiej ograniczone są monitory komputerowe) oraz porównać wyniki z krzywymi dla wzorców światłotrwałości. Oprogramowanie umożliwia także automatyczne generowanie raportów pomiarowych z tabelami, wykresami i zdjęciami obszarów pomiarowych, rejestrowanymi przez kamerę, w którą wyposażony jest mikrofedometr.



Fot. 1.

Aparat MFT w trakcie badania światłotrwałości. Przekręcona o 180° podstawa pozwala zwiększyć zasięg ramienia przyrządu



Fot. 2.

Przykładowy ekran kontrolny oprogramowania sterującego aparatem MFT

Wykonanie pomiarów starzeniowych dla dzieła sztuki umożliwia oparcie jego planu konserwacji prewencyjnej o konkretne, zmierzone wartości zmiany barwy dla danej dawki światła. W dalszej części artykułu przedstawionych zostanie kilka zagadnień związanych z tą możliwością.

Najmniejsza zauważalna różnica

Omawiając pojęcie światłotrwałości obiektu sięgamy często po pojęcie *najmniejszej zauważalnej różnicy barwy* (z ang. *Just Noticeable Difference*), oznaczane dalej jako NZR. NZR to wyrażona liczbowo w jednostkach ΔE najmniejsza różnica barwy, postrzegana przez przeciętnego obserwatora. Wielkości NZR są różne dla różnych barw. Fakt ten związany jest z nierównomierną czułością spektralną ludzkiego oka. Na przykład przedział długości fal wywołujący postrzeganie barwy niebieskiej jest obszarem, na który ludzki wzrok jest mniej wyczulony. Oznacza to, że aby zaobserwować NZR dla odcienia niebieskiego konieczna jest większa zmiana długości fali. Z kolei barwy z zielonego przedziału widma są lepiej rozróżnialne przez oko człowieka, co powoduje, iż zauważalne są już znacznie mniejsze przesunięcia w odcieniu. Przestrzeń barw CIE L*a*b* została stworzona jako percepcyjnie równomierna, czyli przy założeniu, że wartość NZR wyrażona w jednostce ΔE dla każdego odcienia jest (dla uśrednionego obserwatora) taka sama⁴. Stan ten osiągnięto po korektach wprowadzonych do sposobu liczenia różnicy barwy w modelu CIE L*a*b* w roku 2000⁵. Posługując się wartościami ΔE ważne jest, aby wskazywać, jak liczona była różnica barwy, gdyż dla niektórych odcieni różnice pomiędzy wartościami ΔE liczonymi z poprawkami i bez nich są bardzo znaczące.

W badaniach światłotrwałości NZR wykorzystuje się często jako podstawę do klasyfikowania wrażliwości obiektów na światło⁶. W tym celu wykorzystuje się dane na temat dawki (wyrażonej zwykle w megaluksogodzinach, Mlxh),

4 N. Ohta, A. R. Robertson, *Colorimetry. Fundamentals and Applications*, Jon Wiley & Sons, 2005, s. 143–144.

5 M. R. Luo, *The CIE 2000 colour difference formula: CIEDE2000*, "Colour Science" 2002, s. 554–559.

6 C. Richardson, D. Saunders, *Acceptable Light Damage: A preliminary investigation*, "Studies in Conservation" 2007, vol. 52, issue 3, s. 177–187.

przy jakiej przekroczony zostanie próg NZR. W literaturze konserwatorskiej jako obiekty wrażliwe na światło wskazuje się te, dla których NZR pojawi się po naświetleniu dawką 0,4 do 3,6 Mlxh (czas odpowiadający NZR dla wzorców światłotrwałości Blue Wool 1–3)⁷. Należy zauważyć, że tak określona kategoria *obiektów wrażliwych* jest bardzo szeroka i obejmuje obiekty, dla których zalecenia odnośnie bezpiecznej ekspozycji mogą się diametralnie różnić. Uważamy, że dysponując wynikami pomiarów światłotrwałości wykonanymi na realnych obiektach i przyjmując progowe wartości NZR (co opisane zostało jeszcze poniżej), możliwe jest bardziej precyzyjne planowanie konserwacji prewencyjnej w oparciu o tzw. budżet degradacji, bez sięgania po kategoryzację, oparte o porównanie światłotrwałości dzieł do wzorców Blue Wool.

W literaturze przedmiotu⁸ znaleźć można wskazania, jaką wartość w jednostkach ΔE ma NZR – najczęściej pojawiają się liczby z zakresu 1,4–1,6. Wartości te wyznaczone były poprzez obserwację różnicy barwy w dobrych warunkach oświetlenia. Przy niskiej intensywności oświetlenia stosowanej wspólnie w muzeach, wartość różnicy barwy przekraczająca próg NZR jest zapewne większa, gdyż nasza zdolność do postrzegania barw zależy od intensywności oświetlenia⁹. Przy bardzo niskich intensywnościach światła widzenie człowieka przechodzi z reżimu widzenia dziennego (fotopowego) na pośrednie (mezo-powe), w którym rolę w postrzeganiu barw zaczynają odgrywać pręciki (niedające wrażenia barwnych). Jako progową wielkość natężenia światła, konieczną

7 A. Derbyshire, J. Ashley-Smith, *A proposed practical lighting policy for works of art on paper at the V&A*, [w]: *ICOM Committee for Conservation, 12th Triennial Meeting*, Lyon 1999.

8 CIE Technical Committee 3–22, *Control of damage to museum objects by optical radiation*, CIE Technical Report 157:2004, CIE Międzynarodowa Komisja Oświetleniowa, 2004; J. M. del Hoyo-Melendez, P. Swit, J. Sobczyk, *Measuring photostability through glass: the application of microfading testing to the study of framed pastel artworks*, “Coloration Technology” 2018, vol. 134, issue 6, s. 411–422

9 W. R. J. Brown, *The Influence of Luminance Level on Visual Sensitivity to Color Differences*, “The Journal of the Optical Society of America” 1951, vol. 41, issue 10, s. 684–688.

dla wzbudzenia widzenia fotopowego, przyjmuje się wartość 10 lm/m^2 ¹⁰. Aby wiązka o takim natężeniu dotarła do oka obserwatora, oświetlenie obiektu musi mieć moc większą, zależnie od jego reflektancji. Jako średnią wartość reflektancji powierzchni obiektów muzealnych, gdy jasność barwy równa jest poziomowi średnio-szaremu na skali szarości, przyjmuje się około 20%¹¹. Aby w takich warunkach aktywować widzenie fotopowe, potrzebne jest natężenie światła o wielkości około 50 lx (lm/m^2). Taka moc oświetlenia, pojawiająca się powszechnie w zaleceniach konserwatorskich odnośnie ekspozycji obiektów wrażliwych na światło, nie jest więc, jak często błędnie się zakłada, dawką światła najmniej szkodliwą dla światłoniemnych obiektów. Jest to w rzeczywistości dawka minimalna konieczna dla poprawnego rozróżniania barw obiektów o niskiej reflektancji¹². Co istotne, dawka ta określona została dla obserwatorów w przedziale wiekowym do 40 roku życia. Badania wskazują¹³, że zdolność do różnicowania odcieni barw zależy od wieku obserwatora – z wiekiem nasze możliwości w tym względzie spadają. Aktualne wytyczne muzealne¹⁴ nie uwzględniają obniżonych zdolności rozróżniania barw przez widzów reprezentujących starsze grupy wiekowe, niemniej problem ten jest coraz częściej przedmiotem dyskusji w kontekście kompromisów koniecznych dla osiągnięcia satysfakcjonujących warunków ekspozycyjnych. W przypadku, gdy ekspozowane obiekty nie zostały zaklasyfikowane jako najbardziej światłoniemne, obecnie wiele

¹⁰ C. Cuttle, *Light for Art's Sake, Lighting for Artworks and Museum Displays*, Butterworth-Heinemann, United Kingdom 2007, s. 237

¹¹ Tamże, s. 238.

¹² Tamże.

¹³ J. M. Kraft and J. S. Werner, *Aging and the saturation of colors. 1. Colorimetric purity discrimination*, "The Journal of the Optical Society of America" 1999, vol. 16, s. 223–230; K. Knoblauch, F. Saunders, M. Kusuda, R. Hynes, M. Podgor, K. E. Higgins, F. M. de Monasterio, *Age and illuminance effects in the Farnsworth-Munsell 100-hue test*, "Applied Optics" 1987, vol. 26, issue 8, s. 1441–1448.

¹⁴ *Zasady postępowania z obiektami zabytkowymi na podłożu papierowym*, red. D. Okrągła, Narodowy Instytut Muzealnictwa i Ochrony Zbiorów, 2012.

instytucji zaleca oświetlanie ekspozycji światłem o natężeniu około 100 lx, koniecznym dla poprawnego rozróżniania barw przez osoby starsze i z upośledzonym wzrokiem¹⁵.

Ponieważ określenie wartości NZR ma zasadnicze znaczenie dla planowania dozwolonych dawek światła (i spowodowanych przez nie zmian barwy), ewentualne uwzględnienie korekt wynikających ze wspomnianych powyżej czynników (słabe oświetlenie i wiek widza, kolor tła, poziom szczegółowości obiektu) mogłoby mieć bardzo istotny wpływ na konstrukcję takiego planu.

Krzywe fotodegradacji

Podstawowe prawa fotochemii w badaniach starzeniowych dla olbrzymiej większości przypadków nie mogą być stosowane dla tak złożonych układów, jakimi są materiały, których badanie tu omawiamy. Dotyczy to również testów wykonywanych techniką MFT. W szczególności istotny dla interpretacji wyników pomiarów starzeniowych jest fakt, że zazwyczaj przy dużej intensywności światła stosowanej w badaniach mikrofedometrycznych (5–15 Mlx, zależnie od używanej aparatury) nie jest spełniona reguła odpowiedniości (*reciprocity principle*) Bunsena i Roscoe'a¹⁶, według której ilość produktu reakcji fotochemicznej zależy wprost proporcjonalnie od dawki światła. A zatem, gdy zwiększymy dawkę światła dwukrotnie, to w obiekcie powinna zajść dwukrotnie większa zmiana. W zdecydowanej większości przypadków takie kalkulacje w odniesieniu do zmiany barwy nie są poprawne. Możemy to zilustrować za pomocą rys. 2, na którym pokazane zostały trzy najczęściej występujące typy krzywych zmiany barwy, obserwowane w testach MFT. Krzywa typu A, czyli linia o bardzo niewielkim zagięciu (bliska prostej), obserwowana jest bardzo rzadko, najczęściej rejestrujemy krzywą typu B, a w około 10% testów wyniki układają się w krzywą

¹⁵ *Smithsonian Guidelines for Accessible Exhibition Design*, [w:] *Smithsonian Directive 215*, 2006.

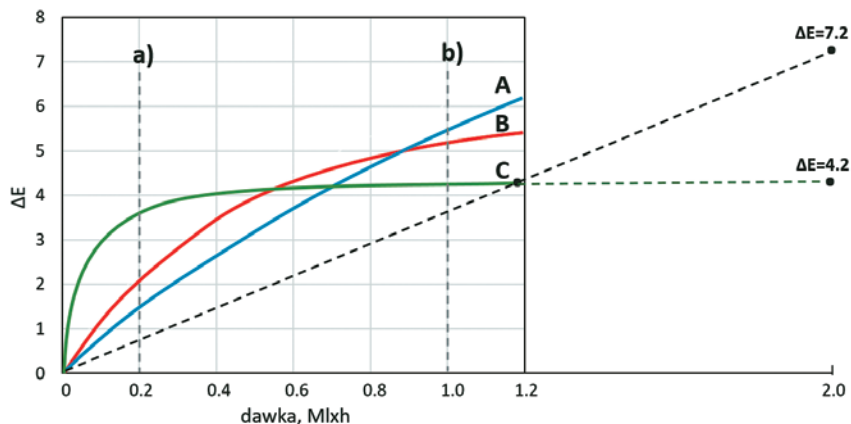
¹⁶ J. del Hoyo-Melendez, M. F. Mecklenburg, *An Investigation of the Reciprocity Principle of Light Exposures Using Microfading Spectrometry*, "Spectroscopy Letters" 2011, vol. 44, s. 52–62.

typu C (krzywa z *plateau*)¹⁷. Liniowa zależność zmiany barwy od dawki światła (czyli zmiana zgodna z regułą odpowiedniości) w naszej praktyce nie była nigdy obserwowana. W dyskusji dotyczącej światłotrwałości obiektów powszechnie sięga się jednak po proste przeliczenia, bazujące na tym uproszczeniu. Prowadzi to do bardzo istotnych błędów oszacowań zmiany barwy, co zilustrujemy poniższym przykładem.

Gdybyśmy dysponowali tylko wynikami pomiaru barwy przed i po teście starzeniowym (jak z testów w tradycyjnej komorze starzeniowej), w którym użyto dawki całkowitej równej 1,2 Mlxh (por. rys. 2), to dla krzywej C nasze przewidywania zmiany barwy dla dawki 2,0 Mlxh, oparte o regułę Bunsena–Roscoe’a, prowadziłyby nas do wartości zmiany barwy równej 7,2. Ekstrapolacja eksperymentalnie wyznaczonej krzywej daje wynik znacząco niższy, równy 4,2. Zalecenia konserwatorskie oparte o tak różne wartości zmiany barwy musiałyby być zasadniczo inne. Znajomość kształtu krzywej fotodegradacji wyznaczonej w pomiarze MFT pozwala poprawić trafność takich przewidywań.

Na rys. 2 pokazano również, że pomiary światłotrwałości nie mogą być nadmiernie skracane – wnioski z testów wyciągnięte w punkcie oznaczonym jako a) bardzo się różniły od tych wyciągniętych dla dawki oznaczonej jako b). Z naszych doświadczeń czas pomiaru MFT (z wykorzystaniem opisywanej powyżej aparatury), po którym kształt krzywej fotodegradacji staje się dobrze widoczny i może być podstawą ewentualnej ekstrapolacji do większych dawek światła (a więc dłuższych czasów ekspozycji), wynosi 8–10 minut. Ekstrapolacja wyników nawet dla obiektów spełniających regułę odpowiedniości musi być czyniona z założeniem, że są to tylko zmiany wywołane światłem, podczas gdy istnieje szereg innych czynników mogących skutkować zmianą wyglądu obiektu – wpływ gazowych i pyłowych zanieczyszczeń powietrza, wahania temperatury, czynniki mikrobiologiczne czy przemiany wynikające ze składu chemicznego obiektu.

¹⁷ C. H. Giles, *The fading of colouring matters*, “Journal of Applied Chemistry” 1965, vol. 15, s. 541–550.



Rys. 2.

Rodzaje rejestrowanych krzywych zmiany barwy (opis w tekście)

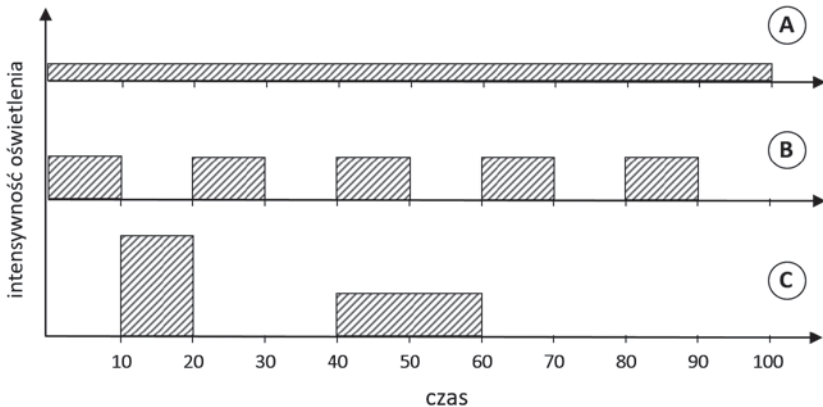
Powyższy przykład ilustruje możliwości interpretacyjne, jakie daje rejestracja pełnych krzywych starzenia. Interpretacja ta nie tylko może polegać na przewidywaniu zmian barwy dla dawek większych niż zastosowane (ekstrapolacji wyników), ale również na określeniu planu konserwacji prewencyjnej opartej o tzw. budżet degradacji.

Budżet degradacji

Pojęciem odnoszącym się do wykorzystania danych na temat światłonietrwałości materiałów w ochronie zbiorów jest termin *budżet degradacji*¹⁸ (z ang. *degradation budget*, także: *light budget*, *exposure budget*). Określa on przewidzianą dawkę światła, której poddany może zostać obiekt, zanim ulegnie zmianie barwnej równej NZR (lub innej, wskazanej jako graniczna). Posługując się taką wartością planować możemy długie okresy ekspozycji przy niewielkiej intensywności oświetlenia (scenariusz oznaczony A na rys. 3) lub

¹⁸ D. D. Saunders, *Museum Lighting: A Guide for Conservators and Curators*, Getty Conservation Institute, 2020, s. 240.

krótsze (B, C) o większej intensywności, przedzielone okresami przechowywania bez dostępu światła. Badania mikrofedometrem pozwalają wyznaczyć całkowitą dawkę światła, która spowoduje zmianę barwy uznawaną za graniczną, tzn. maksymalną dopuszczalną zmianę w projektowanym okresie, zwykle będzie to próg NZR. Ekstrapolacja wyników dla bardzo długich okresów wiąże się z nieuchronnym wzrostem niepewności wyznaczanych wartości. Dla większości obiektów konieczne będzie wykonanie kilku, rzadziej kilkunastu, pomiarów MFT, dla zidentyfikowania najbardziej światłoniemrawego obszaru i określenia dla niego charakteru krzywej zmiany barwy. W przypadku serii zgodnych technologicznie prac wystarczy może potwierdzenie światłoniemrawości obszarów barwnych, dla których wykonano już pomiary MFT, bez powtarzania testów dla obszarów, które zidentyfikowano jako odporne na światło. Określenie budżetu degradacji w oparciu o tak uzyskane wyniki jest obecnie sposobem najszybszym i najbardziej bezpośrednim. Pozwala na uniknięcie zaawansowanych badań technologicznych, zwykle czasochłonnych i kosztownych, obciążonych ryzykiem błędu, wynikającym z przeniesienia wniosków uzyskanych dla próbek modelowych na konkretny obiekt o własnej historii i unikalnym składzie.



Rys. 3.

Możliwe scenariusze oświetlenia obiektu skutkujące dostarczeniem tej samej dawki

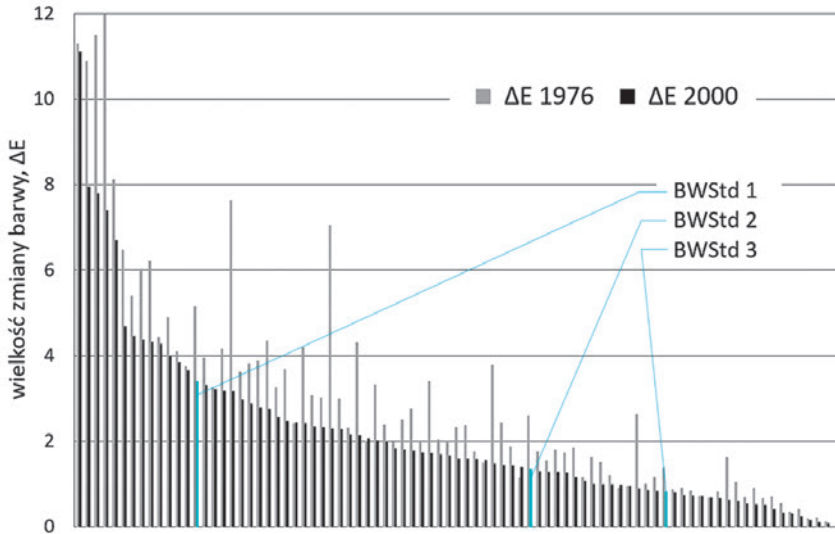
Wykorzystanie wyników z badań MFT

Najbardziej bezpośredni sposób wykorzystania wyników z oznaczeń światłotrwałości wynika z prostego porównania wielkości zmian barwy dla wszystkich zmierzonych punktów w danym zespole zbadanych obiektów i wzorców Blue Wool. Jeśli uszeregujemy uzyskane wyniki w porządku malejącym, to na szczycie listy (lub po lewej stronie histogramu – por. rys. 4), znajdują się miejsca najmniej odporne na działanie światła. Na obiekty, na których znajdują się te punkty, należy zwrócić szczególną uwagę – być może weryfikacji powinien ulec ich sposób oświetlenia i wystawienia, a ich wygląd być monitorowany, najlepiej z wykorzystaniem pomiaru barwy dla pól zidentyfikowanych jako najbardziej wrażliwe. Jeżeli istnieją takie możliwości techniczne, dla takich obiektów powinna być monitorowana łączna dawka światła¹⁹.

Bardziej zaawansowany sposób wykorzystania wyników z pomiarów MFT otwiera drogę do ustalenia indywidualnego planu konserwacji prewencyjnej dla danego obiektu. Autorzy uważają, że stosując technikę MFT możliwe jest wskazanie obszaru na badanym dziele najbardziej podatnego na fotodegradację, a przewidywania dotyczące tempa tego procesu dla takiego punktu są najlepszą podstawą do planowania konserwacji zachowawczej w kontekście ryzyka wynikającego z wystawienia obiektu na działanie światła²⁰. Posłużmy

¹⁹ B. Ford, N. Smith, *A reality check for microfade testing: Five examples*, ICOM-CC 18th Triennial Conference Preprints, Copenhagen, 4–8 September 2017, red. J. Bridgland, Międzynarodowa Rada Muzeów, Paryż 2017; J. M. del Hoyo-Melendez, P. Swit, J. Sobczyk, *Measuring photostability through glass: the application of microfading testing to the study of framed pastel artworks*, "Coloration Technology" 2018, vol. 134, issue 6, s. 411–422.

²⁰ J. M. del Hoyo-Melendez, M. Mecklenburg, *A survey on the light-fastness properties of organic-based Alaska Native artifacts*, "Journal of Cultural Heritage" 2010, vol. 11, s. 493–499; B. Ford, *Non-destructive microfade testing at the National Museum of Australia*, "AICCM Bulletin" 2011, vol. 32, issue 1, s. 54–64; S. Freeman, J. Druzik, M. Harnly, C. Pesme, *Monitoring photographic materials with a microfade tester*, ICOM-CC 17th Triennial Conference, Melbourne 17–19 September 2014; M. Pullano, M. Martnesson, *Microfading of Watercolours by*



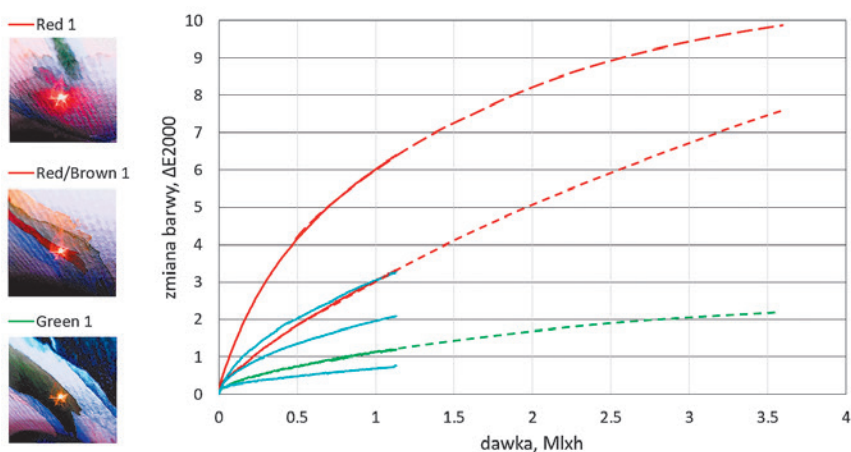
Rys. 4.

Zmiany barwy uzyskane w pomiarach MFT, wykonanych dla 81 punktów na 24 obiektach muzealnych, zestawione z wynikami dla wzorców Blue Wool 1–3

się konkretnym przykładem – 10-minutowy pomiar mikrofedometrem oznacza dostarczenie dawki światła równej 1,13 Mlxh, co (przy diskutowanych wcześniej zastrzeżeniach związanym ze spełnialnością reguły Bunsena-Roscoe’a) może być potraktowane jako równoważne okresowi 6 lat i 2 miesięcy ekspozycji przy intensywności oświetlenia 50 lx, 10 h/dzień, 365 dni/rok. Okres 6,2 lat dla obiektu muzealnego to niewiele, jeżeli chcemy stworzyć plan konserwacji prewencyjnej i rozpiścić budżet degradacji na dłuższy okres, konieczna jest ekstrapolacja takich wyników. Ponieważ dysponujemy krzywymi zmian barwy, ekstrapolacja może uwzględniać charakter krzywej kinetycznej (por. rys. 2), zwykle mającej charakter eksponencjalnego zaniku. Na rys. 5 pokazano ekstrapolację danych z pomiaru MFT, do dawki na jaką

Carl Larsson from the Gothenburg Museum of Art, Sweden, "Studies in Conservation" 2018, vol. 63, issue 1, s. 411–413.

przykładowe obiekty zostaną wystawione w okresie 20 lat. Wykorzystano rzeczywiste wyniki, zmierzone dla trzech prac E. Muncha (Munch Museet, Oslo). Były to prace na podłożu papierowym, w każdej z nich zidentyfikowano obszar (kolor) o najmniejszej światłotrwałości. Z uwagi na fakt, iż właśnie taki obszar o najmniejszej odporności na działanie światła determinuje sposób postępowania z danym obiektem, do dalszego omówienia wybrano te właśnie wyniki. Na rys. 5 umieszczono również krzywe zarejestrowane dla wzorców Blue Wool oraz makrofotografie wykonane kamerą, w którą wyposażony jest przyrząd. Wykres zmian barwy (ΔE_{2000}) przedstawiony jest w funkcji dawki (Mlxh).



Rys. 5.

Krzywe zmian barwy dla 3 punktów z ekstrapolacją wyników do dawki 3,6 Mlx, krzywe niebieskie – wyniki dla wzorców Blue Wool (od góry: 1, 2, 3)

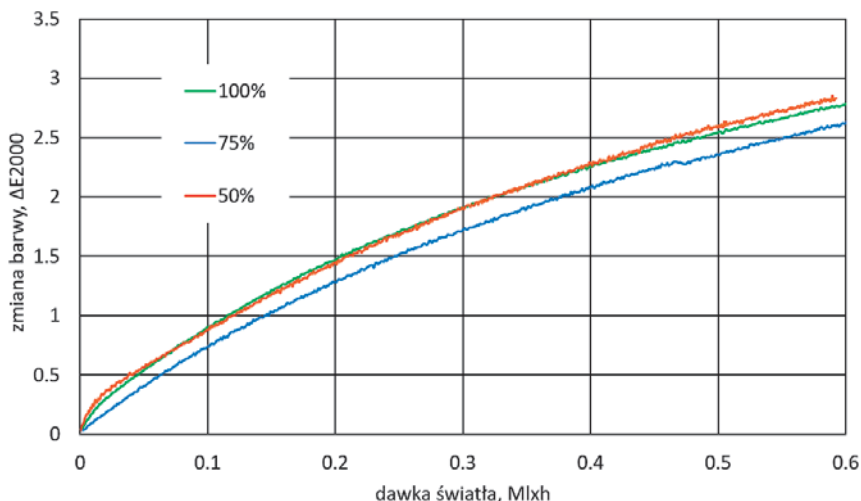
W przypadku pierwszego obiektu, w którym największe zmiany dotyczyły barwy czerwonej (pomiar oznaczony *Red 1*), mamy do czynienia z wyjątkowo wysoką wrażliwością na działanie światła, dużo większą niż dla wzorca Blue Wool 1. Ekspozycja nawet na światło o natężeniu 50 lx w krótkim czasie przynosi zmiany barwy przekraczające NZR (po 12 miesiącach ΔE_{2000} będzie większa niż 2). Obiekt wymaga wyjątkowej ochrony i na podstawie wyników MFT rekomendowane być może jego wyłączenie z ekspozycji.

Obiekt drugi, w którym największą zmianę barwy stwierdzono dla pola oznaczonego *Red/Brown 1*, ma światłotrwałość zbliżoną do wzorca BWStd 1, choć charakter krzywej zmiany barwy pozwala przewidzieć w dłuższym okresie również zmiany większe niż dla BWStd 1. Obiekt wymaga także specjalnej ochrony, ale plan konserwatorski mógłby przewidywać okresową ekspozycję. Zmiana barwy o wartości $\Delta E_{2000} = 2$ przewidywana jest po 34 miesiącach ekspozycji w opisanych powyżej warunkach.

Trzeci obiekt, w którym najbardziej wrażliwe na światło było pole zawierające barwnik zielony (*Green 1*), ma wyraźnie lepszą światłotrwałość niż poprzednie przykłady, zmiana barwy o wartości $\Delta E_{2000} = 2$ przewidywana jest po 14 latach ekspozycji. Decyzja o okresowej ekspozycji przez 3 miesiące w roku pozwala szacować, że pierwsza zauważalna zmiana pojawi się na nim po 50 latach.

Powyższe szacunki oparte są na założeniu o spełnialności reguły Bunsena-Roscoe'a, o której wiemy, że często spełniona nie jest. Czy odstępstwo od liniowej zależności dawki i zmiany barwy występuje i jak jest duże możemy przekonać się wykonując testy MFT, w których dla danego pola barwnego (ale nie tego samego punktu) wykonujemy pomiary z różną nastawą mocy lampy, np. 50, 75 i 100% mocy maksymalnej oświetlacza²¹. Jeśli przedstawimy wyniki w skali ΔE vs. dawka, krzywe uzyskane w takich pomiarach pokryją się, jeśli zasada odwrotności jest spełniona. Na rys. 6 pokazano przykładowe wyniki takiego testu, w którym stwierdzono dobrą zgodność z regułą Bunsena-Roscoe'a. Oczywiście, badanie to prowadzone jest w zakresie mocy oświetlenia, w którym, w typowym czasie trwania pomiaru starzeniowego, możliwe jest uzyskanie mierzalnych zmian barwy. Liniowość zależności dawka vs. zmiana barwy nie jest testowana przy mocach oświetlenia zbliżonych do tych realnie stosowanych przy ekspozycji w muzeum ze względu na czas potrzebny na przeprowadzenie takiego pomiaru i związane z tym problemy techniczne.

²¹ J. M. de Hoyo-Meléndez, M. F. Mecklenburg, *An Investigation of the Reciprocity Principle of Light Exposure Using Microfading Spectrometry*, "Spectroscopy Letters" 2011, vol. 44 (1), s. 52-62.



Rys. 6.

Krzywe zmiany barwy dla identycznej próbki, testy przeprowadzone przy różnych nastawach mocy lampy (100, 75 i 50% mocy maksymalnej)

Obiekty, dla których prowadzimy pomiary MFT, mają zwykle tak złożoną strukturę i naturę chemiczną, że nie możemy oczekiwać, aby pomiary przyspieszonego starzenia dawały nam precyzyjne wartości zmian barwy w interesujących nas warunkach oświetleniowych i czasie liczonym w dekadach. Jest to jednak jedyny sposób doświadczalnego zbadania wrażliwości obiektu zabytkowego na działanie światła – przewidywania oparte o wyniki MFT przybliżają nas do rzeczywistych zmian, jakim ulegną manuskrypty czy prace plastyczne w długiej perspektywie czasu. Decyzje podejmowane na tej podstawie przez konserwatora czy opiekuna zbiorów uzyskują znacznie silniejszą podstawę niż ogólne kategoryzacje oparte o rodzaj tworzywa i technikę malarską twórcy.

Eksperymentalna weryfikacja poprawności przewidywań zmian barwy obiektów poddanych działaniu światła uzyskiwanych w testach MFT wymagałaby przeprowadzenia pomiarów w warunkach naturalnego starzenia w długim okresie (liczonym w latach lub dekadach). Planując takie badanie, konieczne byłoby rozwiązanie szeregu problemów technicznych, związanych z wykonaniem

pomiarów kolorymetrycznych o wielkiej precyzji w długiej perspektywie czasu. Jeśli budżet degradacji dla danego obiektu to (przykładowo) zmiana barwy na poziomie $\Delta E=2$, rozciągnięta na przestrzeni 50 lat, to spodziewana wartość różnicy barwy mierzona w teście wykonywanym co 5 lat wynosić będzie zaledwie $\Delta E = 0,2$. Producenci dobrej klasy kolorymetrów deklarują precyzję i dokładność pomiaru dużo lepszą od tej wartości (np. $\Delta E = 0,05$), jednak deklaracje te dotyczą pomiarów wykonywanych na danym (zawsze tym samym) przyrządzie, w serii bezpośrednio po sobie następujących pomiarów dla pola białego (o wysokiej refleksyjności). Różnice pomiędzy mierzonymi wartościami barwy na różnych egzemplarzach tego samego modelu kolorymetru (po ich kalibracji na wzorce barw) według deklaracji producentów sprzętu mogą wynosić już $\Delta E = 0,5$, a więc wiele więcej niż spodziewana różnica barwy dla obiektu, dla którego planujemy takie długofalowe badanie. Kolejny problem to uzyskanie odpowiedniej powtarzalności pola pomiarowego na obiekcie (pozycjonowania kolorymetru).

Pomiary MFT możemy wykorzystywać nie tylko do określania bezpiecznych warunków ekspozycji obiektów. Technika MFT pozwala badać potencjał degradacyjny źródeł światła typu LED o różnym rozkładzie spektralnym. Dysponując aparatem wyposażonym w zmieniacz LED (istnieje wersja przyrządu, w której montowane jest aż 6 różnych typów diod LED), dobierać można rodzaj oświetlenia najbardziej odpowiedni dla danego obiektu (powodujący najmniejsze zmiany).

Inny sposób wykorzystania aparatu MFT opiera się na analizie widm refleksyjności, zbieranych w trakcie starzenia. Przebieg widma i charakter zmian zachodzących w trakcie eksperymentu starzeniowego tworzyć mogą „spektralny odcisk palca” dla badanego punktu, umożliwiając identyfikację pigmentu lub barwnika. Dane takie otwierają też drogę do poszukiwania zgodności składu chemicznego materiałów malarskich lub pisarskich na różnych obiektach. Taka analiza przebiegów czasowych widm, określana czasem jako spektroskopia korelacyjna 2D, to przykład szerokich możliwości wykorzystania techniki MFT w badaniach wykraczających poza określanie światłotrwałości obiektów muzealnych.