

RADIOGRAFIA W OCHRONIE DZIEDZICTWA KULTUROWEGO

Radiography in the protection of cultural heritage

Wojciech Głuszewski

Streszczenie: Metody radiograficzne pozwalają za pomocą promieniowań X oraz gamma (γ) wykrywać wewnętrzne niezgodności w całej objętości materiału. W zasadzie nie ma ograniczeń co do rodzaju badanych obiektów. Warunkiem jest jedynie dostęp do dwóch stron napromieniowywanego przedmiotu lub konstrukcji. Alternatywą dla analogowych, błonowych technik radiograficznych jest radiografia cyfrowa. O jakości obrazu i dawce pochłoniętej decyduje technologia przetwarzania promieniowania hamowania na sygnał cyfrowy. Postęp w radiografii stymulowany jest głównie przez zastosowania medyczne i przemysłowe. Z nowych rozwiązań mogą korzystać również konserwatorzy dzieł sztuki. Dużą rolę w upowszechnianiu technik jądrowych w identyfikacji i konserwacji obiektów istotnych dla dziedzictwa kulturowego odgrywa Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej (MAEA). W artykule omówiono niektóre aspekty zastosowania radiografii w muzealnictwie dyskutowane w trakcie konferencji MAEA zorganizowanej w Narodowym Muzeum Wojny na Malcie.

Abstract: Radiographic methods make it possible to detect internal and subsurface imperfections in the entire volume of the material using X and gamma rays (γ). In principle, there are no restrictions as to the type of tested objects. The condition is only access to two sides of the irradiated object or structure. An alternative to analog, film radiography techniques is digital radiography. The quality of the image and the absorbed dose are determined by the technology of converting the braking radiation (bremsstrahlung) into a digital signal. Advances in radiography are mainly driven by medical and industrial applications. The new solutions can also be used by art conservators. The International Atomic Energy Agency (IAEA) plays a major role in the dissemination of nuclear techniques in the identification and conservation of objects significant for cultural heritage. The article discusses some aspects of the use of radiography in museology discussed during the IAEA conference organized at the National War Museum in Malta.

Słowa kluczowe: radiografia, konserwacja dzieł sztuki, promieniowanie hamowania, fluorescencja rentgenowska

Keywords: radiography, conservation of works of art, bremsstrahlung, X-ray fluorescence

Wstęp

Dziedzictwo kulturowe to (obok przekazów ustnych i tradycji) różnorodne obiekty kultury materialnej. Muzealnicy i historycy sztuki starają się poznać ich historię i zachować w dobrym stanie dla przyszłych pokoleń [1]. Bardzo pomocna w pracy konserwatorów jest ocena aktualnego fizykochemicznego stanu artefaktów [2]. Wiedza zdobyta z pomocą analitycznej chemii pozwala często odtworzyć dzieje obiektu o nieznanym pochodzeniu [3]. Dzięki temu wzbogacone zostaje również dziedzictwo kulturowe w jego niematerialnym wymiarze. Prace chemików i fizyków nad przedmiotami o zwykle unikalnej historycznej lub/i artystycznej wartości mają nierutynowy charakter. Każde badanie to indywidualnie zadanie, które wymaga dużej inwencji naukowców oraz najczęściej oryginalnego wykorzystania analitycznej aparatury. Można powiedzieć, że w tych badawczych pracach jest więcej „sztuki niż nauki”. Dodatkowo metody analityczne należy sprawdzić i przetestować z punktu widzenia bezpieczeństwa historycznych materiałów. Najlepiej gdyby były to procedury nieniszczące i nieinwazyjne (niewymagające pobierania próbek). Warunek ten spełnia wiele metod diagnostycznych, które opracowano na podstawie wie-

dzy zdobytej w zakresie fotochemii i chemii radiacyjnej. Wśród technik wykorzystujących różne rodzaje promieniowań wymienić można metody: fotograficzne, mikroskopowe (np. mikroskopię elektronową), spektroskopowe (spektroskopia Ramana, IR), wykorzystujące promieniowania X (radiografia, techniki dyfrakcyjne i fluorescencyjne). Nowe możliwości dają zastosowania synchrotronów i neutronowych źródeł promieniowania.

Chemia radiacyjna a fotochemia

Chociaż fotochemia i chemia radiacyjna mają wiele obszarów wspólnych, to jednak należy pamiętać o zasadniczych różnicach w oddziaływaniu promieniowania niejonizującego i jonizującego na materię. Pierwsze działa selektywnie i jest pochłaniane jedynie przez grupy chromoforowe. Natomiast promieniowanie jonizujące oddziałuje na wszystkie składniki proporcjonalnie do ich udziałów elektronowych. W praktyce niewielkie ilości związków chemicznych, które odgrywają podstawową rolę w fotochemii nie są widoczne dla promieniowania jonizującego [4].

Warto na wstępie wyjaśnić również kilka kwestii nomenklaturowych. Promieniowanie rentgenowskie, charakterystyczne dla wzbudzonego atomu ma subtel-

ną naturę i powstaje w wyniku przeskoków elektronów między powłokami elektronowymi. W radiografii wykorzystuje się natomiast elektromagnetyczne promieniowanie hamowania o ciągłym widmie, powstające przy oddziaływaniu cząstek obdarzonych ładunkiem z materią. Najczęściej w tym celu napromieniowuje się wiązką elektronów matryce z metali ciężkich. Oba rodzaje promieniowań (rentgenowskie i hamowania) są nierozłączne i ogólnie nazywa się je promieniowaniem X. Przykładowo we fluorescencji rentgenowskiej promieniowanie hamowania służy do wzbudzenia analizowanego następnie promieniowania rentgenowskiego. Alternatywnym rozwiązaniem w radiografii jest promieniowanie gamma emitowane przez wybrane radionuklidy.

Badania radiograficzne

Metody radiograficzne pozwalają za pomocą promieniowań jonizujących badać w zasadzie dowolny materiał w całej jego objętości. Warunkiem jest jedynie dostęp do dwóch stron przedmiotu. Wszystko po to, aby móc z przodu umieścić źródło promieniowania (fot. 1), a za artefaktem błonę rentgenowską inaczej zwaną kliszą (fot. 2). W nowoczesnych rozwiązaniach zamiast filmu używa się ekranu fosforowego lub detektora cyfrowego. Po zainstalowaniu aparatury klisza zostaje napromieniowana, a następnie wywoływane są z niej obrazy. I właśnie na ich podstawie wskazuje się miejsce i rozmiar potencjalnej wady, a także określa jej strukturę. W szczególności radiograficznej defektoskopii podlegają metale i ich stopy oraz materiały niemetalowe o grubości kilkudziesięciu milimetrów. Pokrewnymi zagadnieniami są znacznie rzadziej stosowana radiografia neutronowa oraz wspomniana fluorescencja rentgenowska.



Fot. 1. Źródło promieniowania jonizującego umieszczone przed obrazem z kolekcji Muzeum Narodowego Malty. W celu wykonania oceny całego płótna należało wykonać kilka pomiarów kolejnych jego fragmentów (fot. W. Głuszewski)

Photo 1. A source of ionizing radiation placed in front of the tested object (painting from the collection of the National Museum of Malta). In order to evaluate the entire canvas, several measurements of its various fragments had to be made (photo by W. Głuszewski)

Radiografia cyfrowa

W klasycznym badaniu rentgenowskim obraz jest utrwalany na specjalnej światłoczułej kliszy, a następnie wywoływany. W radiografii cyfrowej (radiowizjografii) wynik otrzymywany w postaci cyfrowej od razu trafia do pamięci komputera. Napromieniowanie trwa zaledwie kilka sekund, co pozwala na zmniejszenie dawki promieniowania. Obraz utrwalony na kliszy fotograficznej nie może być zmieniony. Natomiast technika cyfrowa pozwala powiększyć lub zmniejszyć obraz, wyświetlać negatyw bądź pozytyw, zmieniać kontrast oraz wysycenie. Można także szczegółowo analizować wybrany fragment i wykonywać pomiary. W radiologii tradycyjnej rolę nośnika danych spełnia klisza fotograficzna, która może ulec zniszczeniu. Cyfrowy obraz, który łatwo archiwizować jest trwały i się nie starzeje. Z tych powodów płyty selenowe, fosforowe, krzemowe oraz cyfrowa obróbka obrazu uzyskiwanego w czasie rzeczywistym zajmują naczelne miejsce we współczesnej radiografii.

W systemach bezpośrednich (DR) obraz rentgenowski pojawia się na ekranie komputera niemal natychmiast po ekspozycji na promieniowanie rentgenowskie. W systemach pośrednich (CR) rejestratorem obrazu jest płyta pamięciowa pokryta fosforem służącym do zapisu obrazu utajonego, który następnie odczytywany jest w specjalnym skanerze.

Należy jednak zwrócić uwagę, że najlepsze systemy radioskopii cyfrowej zbliżają się dopiero do standardowej radiografii na błonie. Badania radiograficzne o podwyższonej czułości na błonach drobnoziarnistych, posiadają wciąż jeszcze wyższą rozdzielczość i wykrywalność szczegółów.

Ekran fosforowy

Warto wyjaśnić, że stosowane współcześnie tzw. fosforowe ekrany, czyli radioluminescencyjne wyświetlacze z pamięcią (ERLM) mają niewiele wspólnego z pierwiastkiem fosforem (fot. 2). Co prawda pokrewny termin fosforescencja, oznaczający świecenie różnych substancji po wcześniejszym wystawieniu na działanie światła, pochodzi rzeczywiście od fosforu. Jednak zjawisko jego świecenia to chemiluminescencja, czyli emisja światła powstającego w wyniku reakcji chemicznych. W tym przypadku jest to utlenianie białego fosforu. Można dodać, że efekt świecenia uzyskamy również w trakcie przejścia tlenu ze stanu singletowego (1O_2) do trypletowego (3O_2). Tak na marginesie, nie wszyscy może wiedzą, że oddychamy tlenem dwuatomowym, a więc trypletowymi cząsteczkami, które posiadają tylko jedno wiązanie między atomami tlenu.

ERLM to folie zawierające kryształki fluorobromku domieszkowanego bardzo niskim stężeniem dwuwartościowych jonów europu ($BaFBr:Eu^{2+}$). Materiał tego

typu ma zdolność magazynowania energii w strukturze krystalicznej przekazywanej do materiału przez promieniowanie jonizujące. Odłożona energia np. promieniowania hamowania jest uwalniana przez fotostymulację laserową. Cykl użytkowania ERLM składa się, więc z trzech ekspozycji. W pierwszym etapie promieniowanie jonizujące (X, gamma...) zapisuje obraz. Następnie obraz ten jest odczytywany (uwalniany) linia po linii wąską wiązkę światła widzialnego. Zwykle używa się do tego lasera HeNe. Na koniec w celu zresetowania ekranu wielokrotnego użytku naświetla się go intensywnym światłem widzialnym. ERLM można wystawić na działanie światła, o ile w jego wrażliwej warstwie nie ma ukrytych obrazów.

Sekwencję zachodzących zjawisk można inaczej opisać w sposób następujący. Promieniowanie jonizujące generują lawiny ekscytonów (kwazicząstek powstałych w wyniku korelacji elektronu i dziury w domieszkowanym kryształ). Dwuwartościowe jony europu działają, jako aktywatory, uwalniając elektrony w paśmie przewodnictwa kryształu (przechodząc na trzeci stopień utlenienia). Elektrony są pułapkowane w metastabilnych centrach zwanych „centrami PSL”, których stężenia są proporcjonalne do ilości energii przekazywanej przez promieniowanie. Utajonym obrazem jest, więc energia proporcjonalna do pochłoniętej dawki promieniowania. Obraz odczytujemy za pomocą skanera wyposażonego w laser o określonej długości fali (zwykle 635 nm). W wyniku naświetlania fotostymulowane elektrony uwalniane z pułapek rekombinują z dziurami emitując luminescencyjny sygnał o długości fali zwykle około 390 nm. Fotopowielacz przekształca światło w elektrony i wzmacnia sygnał przetwarzając go w postaci cyfrową. Po odczytaniu energia zawarta jeszcze w centrach PSL jest całkowicie uwalniana poprzez wystawienie ekranu na intensywne białe światło. ERLM może być ponownie użyty tysiące razy.

Ekran fosforowy jest łatwy w użytkowaniu. Nie jest potrzebna ciemnia do wyładowania kasety. Większość



Fot. 2. Ekran fosforowy demonstruje David Baratto ekspert MAEA z firmy Gillardoni. Jak widać, obejmuje on około 25% płótna (fot. by W. Głuszewski)

Photo 2. Phosphor screen before being placed behind the image. As you can see, it covers about 25% of the canvas (photo by W. Głuszewski)

producentów oferuje automatyczne urządzenia do rozładunku i odczytu. Przy zapisie cyfrowym do wywołania obrazu nie używa się środków chemicznych, co eliminuje koszty utylizacji i ponownego przetwarzania odpadów. Cyfrowy format obrazów pozwala na bardzo wyrafinowaną i ukierunkowaną eksploatację niemal natychmiast po napromieniowaniu. Używa się w tym celu oprogramowania do szybkiego przetwarzania obrazu. Wyniki mogą być udostępniane w sieciach komputerowych wewnątrz lub poza laboratoriami w celu przetwarzania, diagnozowania i archiwizacji.

Badania obiektów historycznych

Ważną rolę w upowszechnianiu technik jądrowych w identyfikacji i konserwacji obiektów istotnych dla dziedzictwa kulturowego odgrywa MAEA [5]. Przykładowo w czerwcu tego roku zorganizowano w Valletcie stolicy Republiki Malty regionalny kurs na temat zastosowania radiografii (RT) w ochronie obiektów o znaczeniu historycznym (Regional Training Course on Radiography for Cultural Heritage Preservation). W trakcie szkolenia omówiono następujące tematy: ochrona dziedzictwa kulturowego w kontekście wykorzystania promieniowań jonizujących, unikatowe zalety radiografii, zastosowania gamma radiografii i tomografii komputerowej w ochronie zabytków, przepisy prawne oraz międzynarodowe standardy w zakresie ochrony radiologicznej [6, 7], mobilna radiografia. Przeanalizowano kilka przykładów wykorzystania radiografii oraz fluorescencji rentgenowskiej w konserwacji rzeźb i obrazów. Porównano wady i zalety tradycyjnej rentgenowskiej kliszy oraz radiografii cyfrowej. Odbyły się również zajęcia praktyczne z wykorzystaniem przenośnego urządzenia przemysłowego do radiografii cyfrowej.

Badania medyczne

Postęp w zakresie radiografii związany jest głównie z jej medycznymi i przemysłowymi zastosowaniami. Konserwatorzy dzieł sztuki korzystają jedynie z tych osiągnięć, często współpracując z zakładami medycyny nuklearnej. Również defektoskopy rutynowo stosowane w branżach: motoryzacyjnej, grzewczej i sanitarnej wykorzystuje się w celu poznania budowy i stanu zachowania dzieł sztuki lub zabytków oraz ich składu chemicznego. Początkowo w radiologii używano klisz fotograficznych. Niewielka czułość wymagała stosowania długich czasów ekspozycji. Pacjent otrzymywał dawkę promieniowania wielokrotnie wyższą od stosowanych dzisiaj [8]. Później pojawiły się specjalistyczne klisze rentgenowskie. Czas badania znacznie się skrócił i zmalała dawka. Współczesne elektroniczne przetworniki obrazowe przypominają elementy światłoczułe, stosowane w aparatach i kamerach cyfrowych. Zadowolają

się one niewielką ilością promieniowania, a wynik jest dostępny niemal natychmiast. Zdarza się, że trzeba ocenić kształt, wymiary i wzajemne położenie narządów, robi się wtedy kilka zdjęć. Metoda wymaga od radiologa doskonałej wyobraźni przestrzennej. Z pomocą przychodzi rentgenowska tomografia komputerowa. Źródło promieniowania i detektory obracają się wokół pacjenta, wykonując serię zdjęć (czasami ponad 200) pod różnymi kątami, a komputer oblicza trójwymiarowy obraz narządów. Ceną jest większa dawka pochłoniętego promieniowania. Zamiast pacjenta można badaniu poddać obiekt historyczny i uzyskać jego trójwymiarowy obraz.

Badania radiologiczne obrazów

Za pomocą promieniowania jonizującego można w sposób nieniszczący badać np. obrazy starych mistrzów na płótnie i drewnie, rzeźby, starodruki, dokumenty archiwalne, instrumenty muzyczne, obiekty etnograficzne lub archeologiczne oraz historyczne budowle. Radiografia jest obecnie podstawowym rodzajem diagnostyki malarstwa. Wykorzystuje się ją do analizy zastosowanych przez artystę technik i technologii, określenia stanu zachowania dzieła oraz zakresu wcześniejszych ingerencji konserwatorskich. Badania radiograficzne umożliwiają spektakularne odkrycia przemalowań obrazów wykonanych na płótnie lub drewnie. Zdarzało się, że malarze z jakichś powodów zmieniali koncepcję i na gotowym już praktycznie dziele наносили istotne zmiany. W efekcie powstawały dwa obrazy jeden widoczny dla widza i drugi ukryty pod spadem. Teoretycznie można współcześnie dzięki technikom radiografii rentgenowskiej spróbować odtworzyć „oryginalną” kopię dzieła w jego pierwotnej wersji. Przykładem jest obraz olejny maltańskiego artysty Giuseppe Cali „Śmierć Draguta”. Został on namalowany w 1867 r., po powrocie Caliego na Maltę po dwóch latach spędzonych w Neapolu. Tematem płótna jest śmierć osmańskiego generała Draguta podczas Wielkiego Oblężenia Malty w 1565 r. Pierwsza wersja obrazu różni się w wielu szczegółach od dzieła oglądanego w świetle widzialnym.

Radiacyjna konserwacja drewna

Bardzo często badania rentgenowskie są pierwszym etapem konserwacji obiektów drewnianych. Przykładowo w konsolidacji tzw. mokrego drewna na wstępie sprawdza się, czy znajdują się w nim elementy metalowe. Głównym zadaniem konserwatora jest usunięcie wilgoci lub wody i wprowadzenie w to miejsce preparatu, który będzie utrzymywał całą strukturę obiektu. Impregnat powinien być odporny na czynniki atmosferyczne, charakteryzować się dużą odpornością mikrobiologiczną i nie powinien zmieniać barwy



Fot. 3. Sala II wojny światowej w Narodowym Muzeum Wojny w Valletcie. Na ścianie widać fragment powiększonej fotografii przedstawiającej niemieckich żołnierzy łamiących polski szlaban. Zdjęcie symbolizuje napaść III Rzeszy na Polskę

Photo 3. World War II Room at the National War Museum in Valletta. On the wall there is a huge enlargement of the photograph of German soldiers breaking the Polish barrier. The photo symbolizes the attack of the Third Reich on Poland



Fot. 4. Poddana konserwacji flaga maltańskich piratów (fot. by W. Głuszewski)

Photo 4. The flag of the Maltese pirates under conservation (photo by W. Głuszewski)



Fot. 5. Tarcza rycerza maltańskiego (fot. by W. Głuszewski)

Photo 5. Shield of the Maltese knight (photo by W. Głuszewski)

obiekty. Jeżeli istnieje zagrożenie, że w tradycyjnym, długotrwałym procesie konserwacji z zastosowaniem poli(tlenku etylenu) fragmenty metalowe mogą ulec korozji, warto zastosować bardzo szybkie sposoby radiacyjnej konsolidacji. Tak więc punktem wyjścia w zabezpieczeniu artefaktów wydobytych z wody jest ich radiacyjna inspekcja pod kątem poszukiwania elementów o dużej gęstości [9].

Podsumowanie

Konserwatorzy dzieł sztuki korzystając ze zdobytych naukowych w radiografii, muszą stale uzupełniać wiedzę na temat najnowszych technik RT. W praktyce to kustosze, a więc osoby odpowiedzialne za bezcenne niekiedy dzieła sztuki muszą zdecydować, czy wystarczy projekcyjna radiografia dwuwymiarowa na filmie lub detektorze cyfrowym, czy też należy zastosować np. tomografię komputerową (CT). Przy skanowaniu CT źródło promieniowania i związane z nim detektory obracają się wokół obiektu, który sam porusza się w stożkowej wiązce promieniowania jonizującego. Dowolny punkt w obiekcie jest przecinany z wielu kierunków przez różne wiązki w różnym czasie. Informacje dotyczące pochłaniania promieniowania są zestawiane i poddawane obliczeniom w celu wygenerowania dwuwymiarowych obrazów w trzech płaszczyznach (osiowej, czołowej i strzałkowej), które mogą być dalej przetwarzane w celu uzyskania obrazu trójwymiarowego.

Szkolenie MAEA odbywało się w Narodowym Muzeum Wojny, mieszczącym się w forcie Saint Elmo w Valletcie. Jest to jedno z najpopularniejszych muzeów na Malcie. Podczas II wojny światowej była tutaj szkolona obsługa dział przeciwlotniczych. W roku 2015 muzeum zostało odnowione, a jego kolekcja zawiera teraz ekspozycję poczynając od czasów epoki brązu do roku 2004. Głównym wykładowcą kursu był David Baratto z firmy Gilardoni. Założone przez wybitnego specjalistę dr. inż. Arturo Gilardoni przedsiębiorstwo jest jednym z wiodących producentów sprzętu rentgenowskiego i ultrasonograficznego na świecie. Firma jest obecna

w trzech sektorach: medycznym, bezpieczeństwa i badań nieniszczących (NDT).

Wojciech Głuszewski,
Instytut Chemii i Techniki Jądrowej,
Warszawa

Literatura

- [1] W. Głuszewski, Features of radiation conservation of high collections of objects about of historical interest, *Journal of Heritage Conservation*, 2015, 41, 84 – 91 (13)
- [2] W. Głuszewski, Disinfection of cultural heritage objects using electron beam accelerators, Chapter 20, 173 – 177, IAEA, Radiation Technology Series No. 6, Uses of Ionizing Radiation for Tangible Cultural Heritage Conservation, IAEA, 2017
- [3] Tomasz Kalicki, Wojciech Głuszewski, Marcin Frączek, Paweł Przepióra, Luminescencyjne datowania w badaniach geoarcheologicznych, *PTJ*, 3 (64), 2021, 34-41
- [4] W. Głuszewski, Efekty ochronne w radiolizie naturalnych i syntetycznych polimerów, *Bezpieczeństwo Jądrowe i Ochrona Radiologiczna*, 2022, 1, 123, 22-26
- [5] J. Perkowski, W. Głuszewski, Preservation of large collections of artefacts, Chapter 18, 157 – 162; Radiation Technology Series No. 6, Uses of Ionizing Radiation for Tangible Cultural Heritage Conservation, IAEA, 2017
- [6] Wojciech Głuszewski, Identyfikacja i konserwacja dzieł sztuki a ochrona radiologiczna, *Bezpieczeństwo Jądrowe i Ochrona Radiologiczna*, Biuletyn Informacyjny Państwowej Agencji Atomistyki, 2017, 108, 2, 32-39
- [7] M. Kubicka, W. Głuszewski, Nowe Kierunki rozwoju bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej w Polsce, *Bezpieczeństwo Jądrowe i Ochrona Radiologiczna*, 2022, 2, 124, 36-37
- [8] Wojciech Głuszewski, Dekada Muzeum Politechniki Opolskiej i Lamp Rentgenowskich, *Bezpieczeństwo Jądrowe i Ochrona Radiologiczna*, 2021, 4, 52-53
- [9] Wojciech Głuszewski, Hanna Lewandowska, Jarosław Sadło, Laurent Cortella, Radiacyjna konserwacja naturalnych i syntetycznych tworzyw polimerowych, *Materiały konferencji: Analiza chemiczna w ochronie zabytków*, Warszawa, 2021, 31-33