

Jacek Młodożeniec

Zastosowanie rentgenowskiej tomografii komputerowej w badaniach struktury drewna i drewnianej rzeźby polichromowanej

Ochrona Zabytków 49/2 (193), 168-181

1996

Artykuł został zdigitalizowany i opracowany do udostępnienia w internecie przez Muzeum Historii Polski w ramach prac podejmowanych na rzecz zapewnienia otwartego, powszechnego i trwałego dostępu do polskiego dorobku naukowego i kulturalnego. Artykuł jest umieszczony w kolekcji cyfrowej bazhum.muzhp.pl, gromadzącej zawartość polskich czasopism humanistycznych i społecznych.

Tekst jest udostępniony do wykorzystania w ramach dozwolonego użytku.

ZASTOSOWANIE RENTGENOWSKIEJ TOMOGRAFII KOMPUTEROWEJ W BADANIACH STRUKTURY DREWNA I DREWNIANEJ RZEŻBY POLICHROMOWANEJ¹

W badaniach struktury rzeźb drewnianych i innych wykonanych z drewna obiektów zabytkowych brak było dotychczas efektywnej i dokładnej, a jednocześnie nie niszczącej metody badań. Klasyczne techniki rentgenograficzne umożliwiają jedynie przybliżony wgląd w budowę wewnętrzną obiektów, zaś otrzymywane wyniki mają wyłącznie charakter jakościowy. Ponadto nie są one w stanie przedstawić skomplikowanej struktury wewnętrznej obiektów, zbudowanych z elementów o niewielkich różnicach gęstości.

Opracowana dla potrzeb medycyny technika rentgenowskiej tomografii komputerowej CT-X (skrót z ang. „x-ray computer tomography”) pozwala uzyskać pełny obraz struktury wewnętrznej obiektów przestrzennych, zaś otrzymane dane mają charakter ilościowy. Ze względu na uniwersalną naturę badawczą promieniowania X oraz dużą czułość, metoda ta stworzyła nowe możliwości badania budowy wewnętrznej różnego rodzaju obiektów materialnych.

Obraz otrzymywany w technice CT-X jest zrekonstruowanym w postaci mapy rozkładu gęstości obrazem przekroju poprzecznego obiektu. Rekonstrukcja dokonywana jest w oparciu o regułę matematyczną, mówiącą iż struktura przestrzenna obiektu może zostać odtworzona, jeśli znane są wszystkie dwuwymiarowe rzuty tego obiektu. W praktyce jest to realizowane w ten sposób że obiekt wielokrotnie prześwietlany jest skupionym strumieniem promieniowania, zaś natężenie promieniowania przechodzącego rejestrowane jest przez detektory (il. 1).

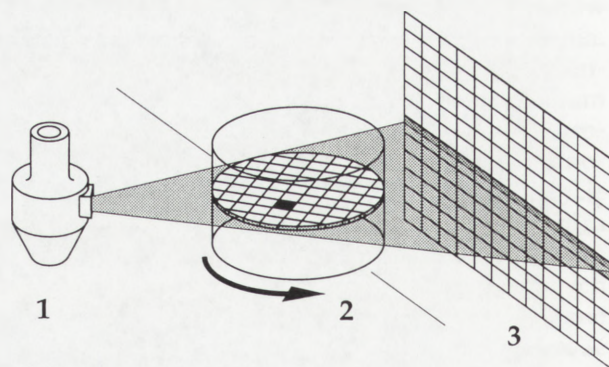
W trakcie badania, w wyniku przesuwu i obrotu obiektu względem zestawu lampa-detektor, rejestrowana jest seria zazwyczaj 360 lub 720 rzutów obiektu obejmujących całą jego szerokość, wykonana w krokach co 1° lub co 0,5°. Wyniki rejestrowane są w postaci wartości natężenia promieniowania przechodzącego w poszczególnych kierunkach. Na ich podstawie, przy użyciu odpowiedniego algorytmu matematycznego zapisanego w postaci programu komputerowego, wykonywana jest rekonstrukcja obrazu przekroju poprzecznego obiektu. Każdy punkt tak odtworzonego obrazu odpowiada pojedynczemu elementowi przestrzennemu obiektu (tzw. voxelowi). Wynikiem rekon-

strukcji jest macierz wartości liniowego współczynnika absorpcji promieniowania — $\mu(x, y) z = \text{const}$, który jest miarą średniego stopnia pochłaniania promieniowania w danej jednostce objętości obiektu. Dla danego materiału i stałej energii promieniowania współczynnik ten jest proporcjonalny do gęstości i używany w tym samym znaczeniu.

Wartości μ opisywane są według umownej liniowej skali jednostek Hunsfieldda — j. H. [cm^{-1}], skonstruowanej dla zastosowań medycznych w oparciu o następujące wartości graniczne:

- 1000 j. H. — powietrze,
- 0 j. H. — woda,
- + 1000 j. H. — materiał nieprzenikalny.

W nowszych modelach aparatów medycznych, np. SIEMENS DRH, skala ta została zagęszczona do ± 2000 j. H., przy zachowaniu tych samych punktów odniesienia jako wartości granicznych. Tak rozbudowana skala jest odbiciem bardzo dobrej rozdzielczości gęstości, rzędu 0,05%, osiąganą przez aparaturę CT-X. Rozdzielczość gęstości jest proporcjonalna do liczby zmierzonych fotonów na voxel, czyli ilości użytego promieniowania. Energia promieniowania musi być przy tym dostatecznie wysoka, aby mogło ono przeniknąć wszystkie struktury badanego obiektu pod każ-



1. Schemat budowy rentgenowskiego tomografu komputerowego: 1 — źródło promieniowania, 2 — badany obiekt, 3 — zestaw detektorów

1. Scheme of the construction of an X-ray computer tomograph: 1 — source of radiation, 2 — examined object, 3 — detector

1. Artykuł powstał w oparciu o pracę dyplomową obronioną przez autora na Wydziale Konserwacji i Restauracji Dzieł Sztuki ASP w Warszawie. Część praktyczna pracy pt. *Konserwacja rzeźby drewnianej polichromowanej z XV w. „Madonna z Dzieciątkiem”*

wykonana została pod kierunkiem prof. W. Kurpika. Część teoretyczna pt. *Zastosowanie rentgenowskiej tomografii komputerowej w badaniach struktury drewna i drewnianej rzeźby polichromowanej* powstała pod kierunkiem dr T. Ważnego.

dym kątem, gdyż w przeciwnym wypadku mogą pojawić się artefakty.

Drugim istotnym parametrem charakteryzującym możliwości zarówno techniki jak i konkretnego aparatu jest rozdzielczość liniowa. W płaszczyźnie przekroju o rozdzielczości obrazu decyduje wybrana wielkość macierzy $\{\mu(x, y)\}$ oraz średnica pola badania. Współczesne aparaty medyczne dysponują zazwyczaj dwoma rozmiarami macierzy — 256 x 256 punktów i 512 x 512 punktów, zaś wielkość pola badania można regulować płynnie w zakresie od około 50 cm do 6 cm. Rozdzielczość liniowa trzeciej współrzędnej — z określona jest grubością warstwy przekroju. Wielkość tę można w aparatach medycznych regulować w zakresie od 1 do 8 mm.

W praktyce istnieje więc możliwość manipulowania osiąganą przez aparat rozdzielczością przestrzenną przez wybór matrycy oraz zmianę średnicy pola badania. Użyty w badaniach aparat PICKER SYNERVIEW SE (model z 1988 r.) przy wyborze matrycy wysokiej rozdzielczości — 512 x 512 punktów i minimalnej wielkości pola badania — 6 cm pozwala osiągnąć rozdzielczość liniową około 0,12 mm w płaszczyźnie obrazu. Jest to jednak okupione znacznym zmniejszeniem średnicy badanego obszaru. Można jednak zauważyć stały postęp w zakresie rozdzielczości liniowej osiąganey przez nowe modele tomografów CT-X.

Medyczne aparaty CT-X, ze względu na wąski i ściśle określony zakres zastosowań uległy daleko posuniętej specjalizacji. Dla potrzeb innych dziedzin nauki konieczne było skonstruowanie prostszych i bardziej uniwersalnych skanerów. Aparaty takie powstają w ośrodkach naukowych prowadzących badania materiałowe w różnych dziedzinach. W odróżnieniu od skanerów medycznych aparaty te nie są tak ograniczone pod względem czasu trwania badania, wielkości dawki promieniowania i szybkości uzyskiwania wyników. Dzięki wydłużeniu czasu badania można uzyskać zadowalającą rozdzielczość obrazu przy użyciu mniejszej liczby detektorów. Można także rozdzielić funkcję zapisu i wstępnej obróbki danych, realizowaną przez komputer osobisty, od rekonstrukcji obrazu, wykonywanej przez większą jednostkę obliczeniową w późniejszym czasie. Jeśli chodzi o maksymalną wielkość badanych obiektów niektóre aparaty są dostosowane do szczególnych zastosowań, inne zaś, tworzone jako konstrukcje uniwersalne, mają szeroką możliwością

adaptacji. Stosowane źródła promieniowania cechuje w tej klasie sprzętowej duża różnorodność. Obok lamp rentgenowskich o mocy dobieranej do gęstości badanych materiałów stosowane są izotopowe źródła promieniowania, jak np. ^{60}Co , które znalazły zastosowanie w przenośnych aparatach przeznaczonych do prac terenowych.

Najbardziej zaawansowanym w zakresie budowy tego typu urządzeń ośrodkiem wydaje się być Federalny Urząd Badań Materiałowych w Berlinie (BAM), gdzie w latach osiemdziesiątych powstało kilka takich konstrukcji, obecnie zaś znajdują się w użyciu 3 skanery. Jako źródła promieniowania, obok szeregu lamp rentgenowskich o napięciach regulowanych do 420 kV, użyto też ^{60}Co , ^{192}Ir oraz akceleratora elektronów Linac o energii 8 lub 12 MeV. W największym ze skanerów odległość źródło–detektor, decydująca o maksymalnej wielkości badanego obiektu, wynosi 270 cm, zaś w najmniejszym, oferującym rozdzielczość przestrzenną do 18 μm , odległość ta może być regulowana w zakresie 20–100 cm².

Dla potrzeb defektoskopii żywych drzew opracowano przenośny skaner CT-X. Urządzenie oparte na ^{137}Cs jako źródle promieniowania zastosowano do oceny stanu badanych drzew oraz lokalizacji i rozpoznania wewnętrznych uszkodzeń takich jak zgnilizna, pęknięcia, mokry rdzeń i inne³. Podobne próby dla rozpoznania wewnętrznej budowy drewna podjęto w Japonii⁴.

Przeglądając wyniki badań tomograficznych obiektów zabytkowych z ostatnich kilkunastu lat można określić następujące podstawowe kierunki zastosowań tej techniki:

- badania niedostępnej i niewidocznej struktury wewnętrznej obiektów,
- badania materiałowe obejmujące rozpoznanie rodzaju, struktury i stanu zachowania materiałów,
- ocena efektów zabiegów konserwatorskich.

Badania materiałowe obiektów zabytkowych dają szczególnie ciekawe rezultaty w wypadku dużych kontrastów gęstości użytych materiałów i produktów ich destrukcji. Zastosowanie techniki CT-X pozwala na określenie pierwotnej formy silnie skorodowanych materiałów⁵, określenie techniki połączeń elementów metalowych⁶, analizę konstrukcji i techniki wykonania obiektu (np. badania instrumentów muzycznych⁷)

2. B. Illerhaus, J. Goebels, P. Reimers, H. Riesemeier, *The principle of computerized tomography and its application in the reconstruction of hidden surfaces in objects of art* (w:) 4th International Conference on Non Destructive Testing of Works of Art. October 4–6, 1994, Berlin 1994, vol. 1, s. 41–49.

3. V. von Schwartz, A. Habermehl, H.–W. Ridder, *Zerstörungsfreier Nachweis von Kern- und Wandfaulen im Stamm stehender Baume mit der Computer-Tomographie*, „Forstarchiv” 60, 1989, s. 239–245.

4. M. Onoe i in., *Portable CT Scanners for Use on Live Trees and Standing Columns* (w:) *Proceeding of International Conference Non*

Destructive Testing, Las Vegas 1986, s. 680–687.

5. H. Born, St. Gussmann, *Grundlagenforschung Tauschierungen: Zur Herstellungstechnik von Riemenzungen des 7. Jahrhunderts*, „Arbeitsblätter für Restauratoren” 1992, 2, s. 273–279.

6. P. Reimers, J. Riederer, *The Examination of Works of Art by Means of X-Ray Computer Tomography (CAT)*, 1984, s. 77–79.

7. K. Martius, *Computertomographie und ihr Einsatz in der Dokumentation von Musikinstrumenten*, „Arbeitsblätter für Restauratoren” 1992, 1, s. 129–134.

czy ocenę stanu zachowania podłoża i jego związku z polichromią. Możliwość przeanalizowania niedostępnych partii obiektu przynosi nieraz zaskakujące rezultaty, np. odkrycie wewnątrz gipsowej figury cennej XVIII-wiecznej drewnianej rzeźby ołtarzowej⁸, czy zrolowanej kartki papieru we wnętrzu brązowej statuetki Buddy⁹. Ciekawym przykładem zastosowania techniki CT-X może być badanie dzbana z Neftenbech w Niemczech, szczelnie wypełnionego zlepienymi monetami. Tomograficzne rozpoznanie położenia monet umożliwiło zaplanowanie bezpiecznego sposobu ich wydobycia¹⁰.

Technika CT-X umożliwia także uzyskanie interesujących i wartościowych wyników w badaniach przedmiotów wykonanych ze szkła i ceramiki oraz zatopionych w skałach osadowych.

Szczególnym zastosowaniem tomografii jest analiza struktury drewna i możliwość wykonania w sposób nie niszczący pomiarów niezbędnych do datowania obiektów drewnianych metodą dendrochronologiczną. Najpełniejsze badania w tym zakresie wykonane zostały na drewnie dębowym w Danii¹¹. Ustalono, iż zadowalającą dokładność pomiarów uzyskuje się dla przyrostów rocznych o szerokości powyżej 1 mm. Dla drewna wąskostopowego rozdzielczość użytej aparatury była niewystarczająca. Było to podstawowe ograniczenie możliwości zastosowania techniki CT-X w dendrochronologii.

Podsumowanie kilkunastoletnich doświadczeń w badaniach dzieł sztuki metodą CT-X przedstawił A. Beck¹², prezentując m.in. kontrowersyjne wnioski na temat możliwości identyfikacji gatunku drewna na podstawie wartości współczynnika μ . Krytycznie ustosunkowali się do tej propozycji P. Klein i H. Vogel¹³ rozpatrując szczegółowo z punktu widzenia biologii drewna tę możliwość identyfikacji gatunków. Omówili oni ponadto aktualne możliwości i ograniczenia techniki CT-X w dendrochronologii.

Do podstawowych zastosowań tomografii CT-X w badaniach obiektów zabytkowych należy ocena skuteczności zabiegów konserwatorskich. Jako przykład mogą służyć badania przydatności różnego rodzaju tworzyw i rozpuszczalników do impregnacji strukturalnej drewna, wykonane przez M. Paciorka¹⁴.

Zastosowanie tomografii CT-X pozwoliło bardzo dokładnie określić stopień nasycenia w całej objętości badanego obiektu oraz przedstawić jego wartość w postaci histogramów. Dzięki temu, że jest to metoda nie niszcząca, możliwe było uzyskanie dla tych samych próbek oraz obiektu zabytkowego zestawu histogramów wykonanych kolejno przed impregnacją, bezpośrednio po nasyceniu oraz po odparowaniu rozpuszczalnika, co dało wgląd w dynamikę procesu impregnacji. Oprócz określenia zachowania się poszczególnych impregnatów, możliwe też było zaobserwowanie zależności związanych ze stanem zachowania drewna — jego ogólną gęstością, obecnością uszkodzeń, wypełnionych i nie wypełnionych korytarzy owadów, a także z jego budową anatomiczną — rozkładem przyrostów rocznych, szerokością pasm drewna wczesnego i późnego, nieregularnościami budowy, takimi jak rdzeń czy sęki.

Cel i zakres pracy

Doniesienia o rezultatach zastosowania aparatury CT-X w badaniach obiektów materialnych, które pojawiły się w ciągu ostatniego 10-letnia, wywołały rosnące zainteresowanie tą techniką. U podstaw podjętych przeze mnie badań leżała potrzeba zorientowania się w możliwościach tej metody w zakresie badania struktury drewna i drewnianych obiektów polichromowanych oraz chęć zdobycia własnych doświadczeń w tej dziedzinie.

Celem pracy było przedstawienie wyników badań tomograficznych obiektu zabytkowego oraz ocena ich praktycznego zastosowania w planowaniu, prowadzeniu i kontroli efektów prac konserwatorskich. Wybierając za główny obiekt badań poddawaną konserwacji drewnianą rzeźbę polichromowaną zamierzano uzyskać następujące informacje:

- o konstrukcji i budowie technologicznej obiektu zabytkowego,
- o stanie zachowania obiektu jako całości i drewna jako materiału,
- o skuteczności wykonanych prac konserwatorskich,
- ilościowe dane pozwalające na ocenę efektów przeprowadzonej impregnacji strukturalnej.

8. G. Essers, *Computertomografische Untersuchungen von Bildwerken*, (w:) *Symposium Zerstorungsfreie Prufung von Kunstwerken*, 19/20.11.87, Berlin 1987, s. 61–68.

9. P. Reimers, J. Riederer, op.cit.

10. H. Riesemeier i in., *Determination of different materials, defects, and hidden structures in objects of art by CT* (w:) *4th International Conference on Non Destructive Testing of Works of Art*, October 4–6, 1994, Berlin 1994, vol. 1, s. 60–61.

11. P. Preuss, K. Christensen, K. Peters, *The Use of Computer-Tomographical X-Ray Scanning in Dendrochronology*, „Norwegian Archaeological Review”, 1991, 2.

12. A. Beck, *Original — Falschung? Bildgebende Verfahren bei der Diagnostik von Kunstwerken*, Konstanz 1990.

13. P. Klein, H. Vogel, *Computertomographie — eine Hilfe fur Dendrochronologie und Holzartenbestimmung?* (w:) *4th International Congress on Non Destructive Testing of Artistic and Cultural Objects*, October 4–6, 1994, Berlin 1994.

14. M. Paciorek, *Zastosowanie tomografii komputerowej do badania rozmieszczenia i udziału tworzywa w drewnie impregnowanym strukturalnie*, „Ochrona Zabytków” 1992, 3, s. 159–172, tenże, *Badania wybranych tworzyw termoplastycznych stosowanych do impregnacji drewna*, „Studia i Materiały Wydziału Konserwacji i Restauracji Dzieł Sztuki ASP w Krakowie”, t. 3, Kraków 1993.

Zakres pracy obejmował:

- tomograficzne badania przeglądowe obiektu zabytkowego przed rozpoczęciem prac konserwatorskich,
- badania przeglądowe obiektu wykonane klasyczną techniką rentgenograficzną przed rozpoczęciem prac konserwatorskich,
- tomograficzne badanie wybranych przekrojów obiektu po zakończeniu prac konserwatorskich.

Zbadano także zestaw próbek drewna reprezentujących kilka najważniejszych z punktu widzenia dendrochronologii i konserwacji gatunków, chcąc uzyskać ich charakterystyki densytometryczne oraz ocenić możliwość datowania dendrochronologicznego tych próbek na podstawie ich obrazów tomograficznych.

Material

Na obiekt badań wybrano XV-wieczną rzeźbę drewnianą polichromowaną Madonna z Dzieciątkiem. Rzeźbę tę, wykonaną z drewna lipowego, zaatakowaną przez owady, mającą duże ubytki i liczne późniejsze elementy drewniane i metalowe, pokrytą wtórną polichromią, uznać można za typowego reprezentanta tego rodzaju obiektów i związanych z nimi problemów.

W celu uzyskania materiałów porównawczych dotyczących badań drewna oraz danych do analizy dendrochronologicznej przebadano próbki zdrowego drewna kilku gatunków mających znaczenie w dendrochronologii oraz występujących powszechnie w dziełach sztuki i znaleziskach archeologicznych. Do badań tych wybrano próbki drewna następujących gatunków:

- dąb szerokosłoiasty (*Quercus sp.*), drewno współczesne,
- dąb szerokosłoiasty z pasmem wąskich przyrostów (*Quercus sp.*), drewno współczesne,
- dąb wąkosłoiasty (*Quercus sp.*), drewno subfossylne, wiek ok. 1000 lat,
- sosna zwyczajna (*Pinus sylvestris L.*), drewno współczesne,
- buk (*Fagus silvatica L.*), okładka książki (XVII–XVIII w.),
- lipa (*Tilia sp.*), drewno współczesne.

W zestawie tym próbki drewna dębu reprezentują gatunek mający podstawowe znaczenie w dendrochronologii europejskiej, najpełniej opracowany i najpewniejszy w datowaniu. Jest to drzewo liściaste, pierścieniowonaczyniowe, w którym nie występują ani fałszywe przyrosty ani wypadanie słojów. W drewnie tym kolejne pierścienie są dobrze widoczne i odznaczają się dużym skokiem gęstości na granicy drewna wczesnego i późnego sąsiednich przyrostów, co czyni je bardzo przydatnym do badań tomograficznych. Ponadto od-

znacza się ono dużą odpornością na działanie czynników niszczących i było szeroko stosowane w budownictwie i rzemiośle artystycznym. Wybór kilku próbek drewna tego gatunku, różniących się szerokością pierścieni oraz stanem zachowania, miał na celu określenie zakresu możliwości badawczych użytej aparatury.

Próbka drewna sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris L.*) reprezentuje w tym zestawie gatunek iglasty. Jest to drewno o szerokich pierścieniach, odznaczających się dużym kontrastem zarówno barwnym, jak i gęstości, dobrze nadające się do pomiarów dendrochronologicznych. Mogą w nim jednak wystąpić fałszywe przyrosty, a także tzw. wypadanie słojów.

Próbka drewna buka (*Fagus silvatica L.*) reprezentuje gatunek liściasty rozpierzchłonaczyniowy. Jest to drewno o mniejszych i bardziej rozmytych kontrastach gęstości na granicach przyrostów, w którym może też wystąpić tzw. wypadanie przyrostów lub fałszywe słoje.

Badany obiekt zabytkowy reprezentuje drewno lipy (*Tilia sp.*) gatunku liściastego, rozpierzchłonaczyniowego. Jak już powiedziano, jest to drewno silnie zniszczone przez owady, stanowi więc materiał dobrze ilustrujący problemy na jakie można natrafić przy badaniu obiektów zabytkowych. Dla porównania wybrano do badań próbkę współczesnego, zdrowego drewna lipy.

Metodyka

Badania tomograficzne wykonano korzystając z udostępnionego przez Instytut Psychoneurologii w Warszawie medycznego rentgenowskiego tomografu komputerowego PICKER SYNERVIEW S E (model z 1988 r.). Umożliwia on wybór matrycy 256 x 256 lub 512 x 512 punktów, regulację średnicy pola badania od około 50 do 6 cm oraz uzyskanie maksymalnej rozdzielczości przestrzennej w płaszczyźnie przekroju około 0,12 mm. Minimalna grubość skanowanej warstwy wynosi 2 mm.

Badania obiektu zabytkowego objęły szczegółowe badania diagnostyczne całej figury przed rozpoczęciem prac konserwatorskich oraz wybiórcze badania porównawcze po zakończeniu konserwacji, mające na celu ocenę skuteczności przeprowadzonych prac, a zwłaszcza zabiegu impregnacji.

Do rozpoznania konstrukcji i stanu zachowania obiektu posłużyły uzyskane w trakcie wstępnych badań tomograficzne obrazy przekrojów poprzecznych, uzupełnione o interpretację danych z krzywych densytometrycznych.

Rozmieszczenie i udział tworzywa w strukturze obiektu zabytkowego określono poprzez zestawienie krzywych densytometrycznych uzyskanych przed zabiegiem impregnacji z krzywymi uzyskanymi po odparowaniu rozpuszczalnika.

Oceny efektów pozostałych działań konserwatorskich dokonywano na podstawie oględzin tomogramów wykonanych po zakończeniu prac.

Badania rentgenograficzne wykonano na Wydziale Konserwacji Dzieł Sztuki ASP w Warszawie aparatem Baltostop BL 100/5 prod. belgijskiej, na błonach rtg. XM w formacie 30 x 40 cm.

Pomiary szerokości pierścieni przyrostów rocznych na próbkach drewna wykonano korzystając z aparatury laboratorium dendrochronologicznego na Wydziale Konserwacji Dzieł Sztuki ASP w Warszawie. W jej skład wchodzi: aparat pomiarowy ECKLUND o dokładności pomiaru 0,01 mm, mikroskop stereoskopowy WILD oraz program CATRAS¹⁵.

Pomiary niektórych próbek oraz pomiary wykonywane bezpośrednio na tomogramach wykonano w Instytucie Badawczym Leśnictwa, na specjalistycznym aparacie do pomiarów dendrochronologicznych firmy Carl Zeiss Jena, dającym dokładność 0,01 mm.

Zarejestrowane na błonach fotograficznych obrazy krzywych densytometrycznych skanowano z rozdzielczością 300 DPI, i po przekształceniu do postaci grafiki wektorowej mierzono korzystając z popularnego oprogramowania graficznego.

Wyniki badań

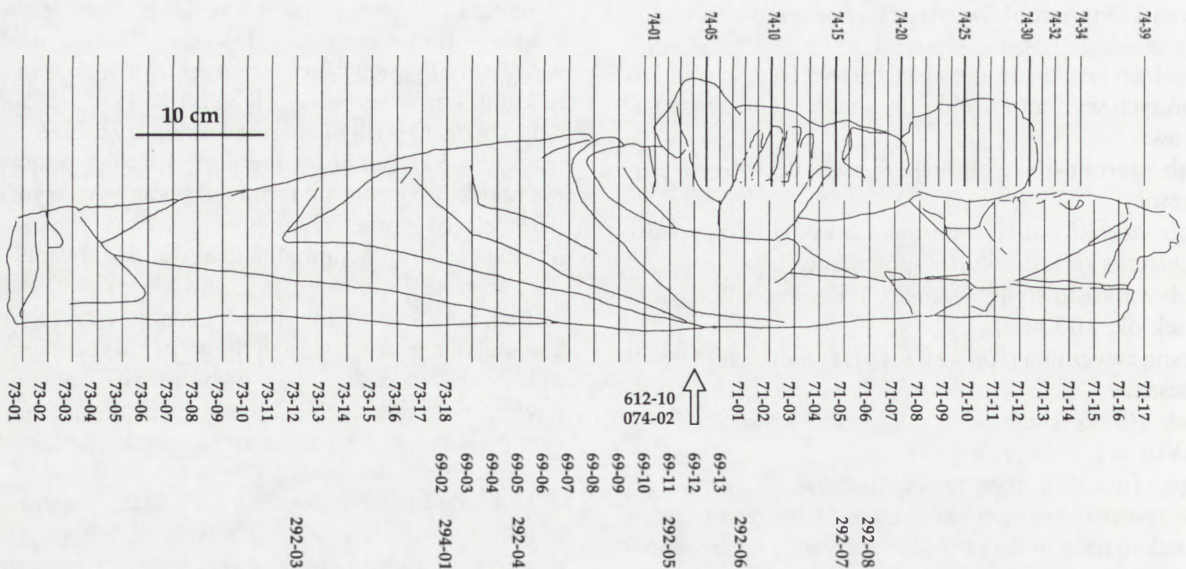
Badania rzeźby rozpoczęto od wykonania serii zdjęć przeglądowych w postaci przekrojów o grubości ska-

nowanej warstwy 2 mm, przy przesuwie 20 mm, na całej długości obiektu (skany 69.02–13, 71.01–17 i 73.01–18). Badanie to pozwoliło zorientować się w strukturze wewnętrznej rzeźby i wybrać strefy szczególnego zainteresowania. Zostało ono uzupełnione następną serią zdjęć (76.01–39), wykonanych w postaci skanów o grubości 10 mm przy przesuwie 10 mm. Pokryły one całą objętość wybranego fragmentu górnej połowy rzeźby.

Wszystkie tomogramy obiektu wykonane zostały w oparciu o algorytmy standardowej rozdzielczości 256 x 256 punktów, z wyjątkiem skanu 294.01 wykonanego w wysokiej rozdzielczości. Jako badanie porównawcze wykonano zestaw 4 klasycznych wielkoformatowych zdjęć rentgenowskich rzeźby w rzucie z góry, pokrywających całość obiektu¹⁶.

Budowa obiektu

Badanie tomograficzne potwierdziło, że zachowana, oryginalna bryła obiektu wykonana została z pojedynczego kłosa drewna. Zarazem jednak badanie to pozwoliło uzyskać pełniejszą charakterystykę użytego materiału, dostarczając danych o orientacji kłosa, układzie słoików oraz obecności i umiejscowieniu lokalnych zaburzeń w strukturze drewna — fragmentu rdzenia oraz sęków. Ujawniło ono, że rzeźba została wykonana z połówki pnia drewna lipowego, zorientowanego tak, że występujący w obiekcie fragment rdze-

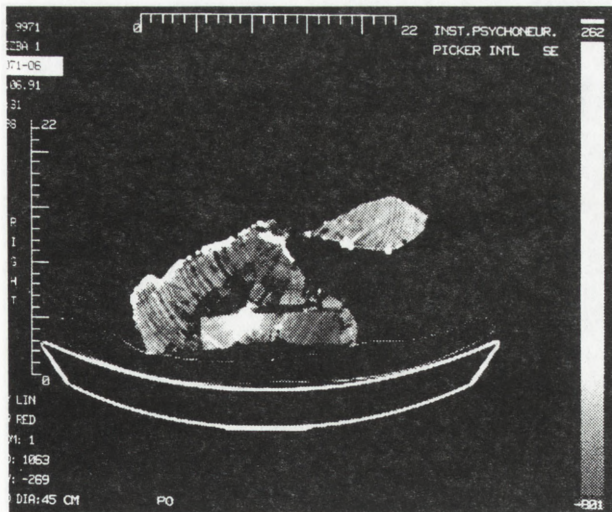


2. Lokalizacja skanów wykonanych w trakcie badań tomograficznych: pierwszego — (73.01–73.18, 69.02–69.13, 71.01–71.17, 74.01–74.39) i drugiego — (294.01, 292.03–09, 612.10)

2. Localization of scans performed during tomographic examination: first — (73.01–73.18, 69.02–68.13, 71.01–71.17, 74.01–39) and second — (294.01, 292.03–09, 612.10)

15. R. W. Aniol, *Tree ring analysis using CATRAS*, „Dendrochronologia”, 1983, 1, s. 45–53.

16. Wyniki tych badań — zdjęcia i opisy — zostały zamieszczone w dokumentacji konserwatorskiej pt. *Rzeźba drewniana polichromowana „Madonna z Dzieciątkiem”* (nr inw. ASP 274).



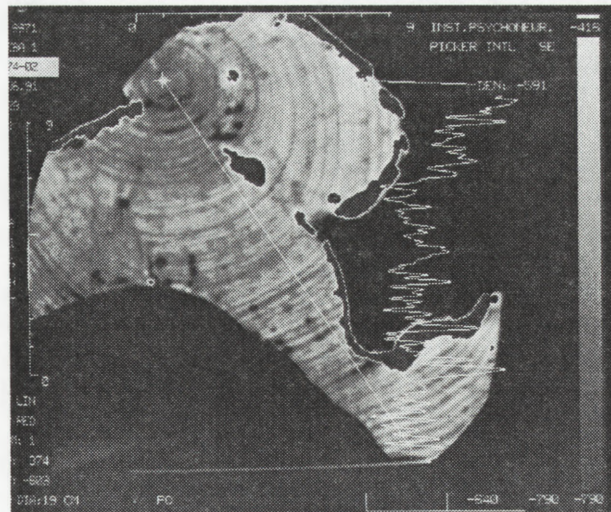
3. Skan 074-02 (18x14,5 cm). Obiekt przed konserwacją. Wzdłuż zaznaczonej na przekroju prostej wyznaczona została, przedstawiona obok, krzywa zmian gęstości

3. Scan 074.02. Object prior to conservation. Along the straight line marked along the cross section — the curve of density changes, presented alongside. The latter served for determining the state of the behaviour of the wood and for describing the effects of the operation and its intensification

nia znalazł się pośrodku frontowej, najbardziej wystającej części rzeźby (skany 69.11-13). Zdjęcia tomograficzne ukazały też szczegóły konstrukcyjne późniejszych, drewnianych uzupełnień obiektu, wyraźnie widocznych na zdjęciach nie tylko dzięki czytelnym, ostrym krawędziom, odmiennemu układowi słoików czy występowaniu pustek na styku z oryginałem, ale także dzięki znacznie wyższej gęstości lepiej zachowanego, późniejszego materiału, mimo że zostały wykonane z tego samego gatunku drewna.

Z licznych w obiekcie elementów metalowych tomografia ujawniła tylko jeden — duży żelazny gwóźdź tkwiący w odwrociu rzeźby. Natomiast żaden z licznych, drobnych, wbitych w powierzchnię rzeźby gwoździ żelaznych o średnicy około 1 mm i długości kilku mm, widocznych na klasycznych zdjęciach rentgenowskich, nie dał zauważalnego śladu na obrazie tomograficznym. Prawdopodobne jest że żaden z cienkich skanów pierwszej serii nie natrafił na gwóźdź, zaś na skanach drugiej serii, o grubości 10 mm, obraz cienkich gwoździ uległ rozproszeniu. Możliwe też, że obraz gwoździ zlał się z obrazem polichromii.

Warstwy malarskie wystąpiły wyraźnie w postaci jednolitego pasma o wysokiej gęstości, w którym nie można rozróżnić zaprawy od leżących na niej polichromii czy złoceń. Na podstawie zdjęć można oznaczyć lokalną grubość polichromii, a także stwierdzić obecność wlewów wtórnej zaprawy w otwarte korytarze owadów. Natomiast płyty płótna leżące w wielu miejscach pod wtórną zaprawą nie dały własnego obrazu



4. Skan 071-01 (10,5x 8,7 cm). Widoczna silnie zaatakowana przez owady trójkątna strefa w środkowej części rzeźby. W strefie przyrdzeniowej rozległe, ułożone koncentrycznie ubytki. W najbardziej wystającym fragmencie tej strefy fragment drewna o podwyższonej gęstości. Na licu jest on widoczny w postaci sęka. Polichromia, w części środkowej leży na powierzchni obiektu długimi, równymi fragmentami, bez wlewów w ubytki, co wskazuje że leży ona na płótnie

4. Scan 071.01. A clearly visible triangular sphere in the central part of the statue, seriously attacked by insects, with sides restricted by radial lines. A considerable part is completely covered with filled insect damage. The duramen sphere discloses extensive concentrically arranged damage. The most protruding part of this sphere contains a fragment of wood with higher density, visible on the face in the form of a knot. Apart from the area of largest damage, the wood appears to be rather well preserved. In the central part — long equal fragments of the polychromy lie on the surface of the object, without infusion into the visible gaps, which means that polychromy remains on the canvas

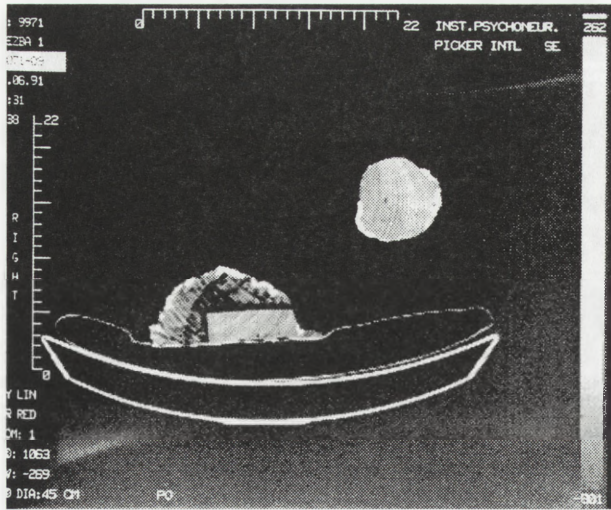
tomograficznego. Ich obecności można się domyślać w miejscach, gdzie wtórna zaprawa, leżąc bezpośrednio nad otwartymi pustkami, nie wypełniła ich.

Stan zachowania obiektu

Na obraz stanu zachowania drewna składają się następujące widoczne na tomogramach elementy:

- puste korytarze owadów występujące w postaci kontrastowych, owalnych plam o średnicy 1-3 mm i ich zgrupowań,
- pęknięcia, wzdłuż których nastąpiło rozsuniecie się drewna i powstała pustka wewnętrzna,
- korytarze owadów wypełnione odchodami widoczne w postaci pojedynczych, owalnych plam o obniżonej gęstości i ich zgrupowań,
- obniżenie gęstości drewna proporcjonalne do stopnia jego rozkładu.

Co istotne, technika tomografii komputerowej pozwala nie tylko stwierdzić obecność takich uszkodzeń, ale też dostarcza dokładnych danych o ich ilości, lokalizacji i rozkładzie, pozwalając określić strefy najsilnie zniszczone oraz najbardziej zagrożone.

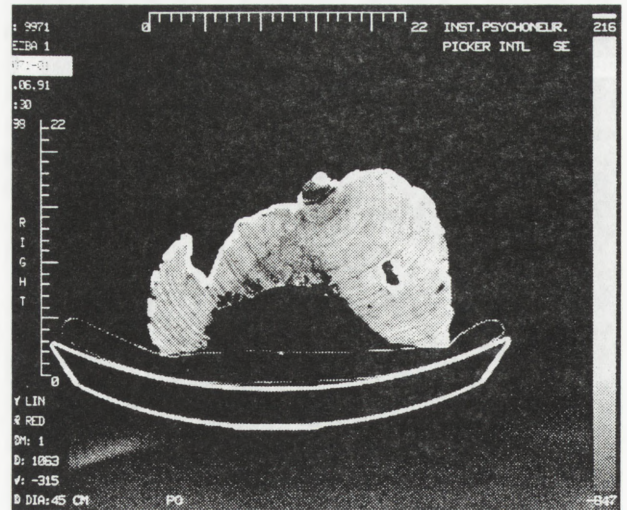


5. Skan 071-06 (10,5x 8,7 cm). Widoczne liczne, wtórne elementy konstrukcyjne. Metalowy ćwiek (10;5), kolek mocujący (5;3), jeden duży oraz kilka mniejszych fleków (17;7 i 15;6). Drewno oryginału bardzo silnie zniszczone przez owady. Kanaly wypełnione układają się w obrębie drewna wczesnego wielu kolejnych przyrostów, na całej ich długości, grupują się też wzdłuż linii promieniowych. Kanaly puste tworzą rozległe, podłużne ubytki wewnętrzne. Prawie całkowicie zniszczona jest też ręka Dzieciątka (13;13). Warstwa zaprawy nierówna z licznymi wlewaniami

5. Scan 071-06. The blurred shape with very high density in the central part of the lift is a picture of a metal element. Also visible — an outline of one of the pegs (5;3) and an area more attacked by the insects (12;5). Over the main lift — visible two smaller supplementary elements (17;7 and 15;6). The wood of the original is seriously damaged by insects. Filled canals are arranged within the range of the early wood of many successive rings, and along their entire length. They also create a configuration along the radial lines. Empty canals, both along the radial lines and along the course of the rings, create extensive, elongated inner gaps, chiefly in the central part of the statue. The hand of the Infant Jesus is also almost totally destroyed (13,13). The layer of the mortar is uneven, with numerous infusions

W badanym obiekcie dały się zaobserwować tendencje do grupowania się korytarzy owadów w pewne charakterystyczne, niekiedy bardzo regularne struktury, wśród których można wyróżnić:

- zgrupowania wielu równoległych korytarzy biegnących stycznie do powierzchni obiektu, pierwotnie tuż pod warstwą polichromii, będące przyczyną znacznych ubytków powierzchni rzeźby,
- nieregularne zgrupowania pustych lub wypełnionych korytarzy, tworzące wewnątrz obiektu strefy o obniżonej gęstości drewna,
- zgrupowania korytarzy w obrębie wybranego przyrostu rocznego; drewno wczesne wyróżnionego pierścienia zostaje prawie całkowicie zniszczone przez równoległe lub nawet zachodzące na siebie kolejne korytarze,
- zgrupowania leżące w płaszczyźnie promieniowej, w postaci szeregu równoległych korytarzy biegnących w drewnie wczesnym kolejnych sąsiadujących pierścieni.



6. Skan 071-09 (10,5x 8,7 cm). Widoczny fragment kolka mocującego oraz jego gniazda w drewnie oryginału (5;3). W obrębie figury Marii kanały wypełnione układają się w drewnie wczesnym kolejnych przyrostów, na całej ich długości. Kanaly puste grupują się w obrębie poszczególnych przyrostów, układając się jednocześnie wzdłuż linii promieniowych. Jedna z nich tworzy prawie całkowicie zniszczoną płaszczyznę biegnącą w poprzek całej figury

6. Scan 071-09. Several insect canals within the range of the lift. To the left, a visible fragment of a peg and its nest in the wood of the original. In the figure of the Holy Virgin Mary the filled canals are arranged within the early wood of successive rings, along their entire length. The empty canals are grouped within particular rings, at the same time arranged along the radial lines. One of the latter creates an almost completely damaged plane running across the whole figure, at the same time delineating the inner boundary of the empty canals

Dwa ostatnie typy zgrupowań prowadzą do powstania silnie lub całkowicie zniszczonych płaszczyzn w obrębie stosunkowo zdrowego drewna. Pod wpływem naprężeń mogą one następnie powodować powstawanie pęknięć. Zjawisko takie wystąpiło w badanym obiekcie (skany 71.9-15). Żadnego z wymienionych uszkodzeń nie udało się zidentyfikować na zwykłych zdjęciach rentgenowskich, z wyjątkiem otwartych korytarzy biegnących stycznie do powierzchni i wypełnionych wtórną zaprawą. Natomiast uzyskane dane o rozkładzie stref najsilniejszego zniszczenia potwierdziły, że późniejsze uzupełnienia ubytków rzeźby wykonano w częściach najsilniej zniszczonych przez owady.

Na obrazie prezentującym najdłuższą sekwencję pierścieni przyrostów rocznych (skan 074-02) wybrano optymalną prostą i otrzymano krzywą densytometryczną wzdłuż tej prostej. W założeniu krzywa ta miała służyć do określenia skuteczności impregnacji, jednak zawarte w niej dane można również interpretować jako informacje o stanie zachowania drewna.

Uzyskany na tomogramie 074-02 obraz struktury drewna przedstawia czytelnie jego budowę anatomiczną i można uznać, iż rozdzielczość obrazu była w tym wypadku wystarczająca. Ekstrema krzywej powinny

Tabela 1

Wsp. liniowy osłabienia prom. rtg. [jH]	Rdzeń	Strefa przyrdzeniowa	Strefa zewnętrzna	Uszkodzenia wewnętrzne	Drewno współczesne
drewno wczesne	-490	-680/-690	-590/-630	-710/-790	-530/-600
drewno późne	—	-620/-650	-505/-550	—	-410/-480

Tabela 2

Wzrost gęstości drewna obiektu zabytkowego w wyniku impregnacji 20% roztworem Paraloidu B 72 w ksylenie, po odparowaniu rozpuszczalnika	
Drewno zdrowe — drewno wczesne — drewno późne	30÷50 j. H., średnio 45 j. H. 30÷110 j. H., średnio 60 j. H.
Drewno zniszczone	średnio w miejscach dobrze przesyconych ok. 100 j. H.

więc wiernie przedstawiać położenie granic przyrostów rocznych. Wykres w niektórych fragmentach przybiera wyraźnie periodyczny, regularny przebieg. Wartości kolejnych maksimów i minimów w tych fragmentach są do siebie zbliżone, zaś odstępy między nimi są mniej więcej stałe. Na tomogramie odpowiada tym fragmentom wykresu wyraźny obraz struktury anatomicznej drewna. Natomiast nieregularnym fragmentom wykresu odpowiadają strefy o zatartej strukturze drewna, uszkodzonego przez czynniki biologiczne. W rejonach tych zanika szereg ekstremów, występuje pogłębienie minimów spowodowane niszczeniem przez owady przede wszystkim drewna wczesnego oraz obniżenie maksimów. To ostatnie może być jednak spowodowane zmniejszeniem szerokości pasm drewna późnego na skutek żerowania owadów, a niekoniecznie obniżeniem gęstości zachowanych jego fragmentów. Głębokie minima, wybiegające znacznie poniżej gęstości drewna wczesnego, odpowiadają słabo wypełnionym obszarom uszkodzonym. Wartości ekstremów odpowiadających dobrze zachowanym przyrostom drewna są zbliżone. Wyraźnie niższą gęstość wykazuje drewno w strefie przyrdzeniowej, w promieniu około 4 cm od rdzenia (Tabela 1).

Oceny stanu zachowania drewna można więc dokonać zarówno na podstawie zmian jego gęstości, jak i samego kształtu krzywej rozkładu gęstości.

Badanie rezultatów zabiegu impregnacji strukturalnej obiektu zabytkowego

Zniszczone drewno obiektu zabytkowego zaimpregnowano 20% roztworem Paraloidu B 72 w ksylenie. Impregnację przeprowadzono w foliowej komorze próżniowej, przy ciśnieniu ok. 70 mm Hg¹⁷. W trakcie zabiegu obiekt pochłonął około 6 dm³ roztworu impregnatu. Po odparowaniu rozpuszczalnika masa obiektu wzrosła o 1405 g, czyli o 29,5% masy początkowej¹⁸. Oceny ilości oraz rozmieszczenia tworzywa w strukturze rzeźby dokonano w oparciu o zestawienie krzywych densytometrycznych wyznaczonych dla tych samych prostych przed zabiegiem impregnacji oraz po zakończeniu odparowywania rozpuszczalnika¹⁹.

Porównanie krzywych potwierdza, że bryła obiektu została przesycona impregnatem w całej swej objętości. Wyraźnie widoczna jest różnica w sposobie i stopniu osadzania się tworzywa w drewnie zdrowym (regularna, lewa część krzywej odpowiadająca dobrze zachowanemu drewnu w zewnętrznej części rzeźby) i w silnie zniszczonym drewnie części wewnętrznej, przyrdzeniowej (środkowa i prawa część krzywej — Tabela 2).

W drewnie zdrowym nastąpiło dosyć równomierne osadzenie się tworzywa, zarówno w drewnie wczesnym, jak i późnym. Wzrost gęstości był wyższy w pa-

17. Szczegółowy opis zabiegu przedstawiony jest w dokumentacji konserwatorskiej (nr inw. ASP 274).

18. Masa początkowa obiektu wynosiła 4768 g, masa końcowa, określona po 4 miesiącach odparowywania, wyniosła 6173 g.

19. Zamierzano przeprowadzić pomiary na kilku wybranych przekrojach obiektu, jednak na skutek utraty danych w archiwum tomografu możliwe było przeprowadzenie tylko jednej serii pomiarów, w oparciu o pojedynczą krzywą zarejestrowaną w trakcie wstępnych badań na błonie fotograficznej.

Tabela 3

	Średnia gęstość drewna oceniana na podstawie wykresów gęstości	Stopień pokrycia lica polichromią	Średnia gęstość drewna po impregnacji i odparowaniu rozpuszczalnika
Rzeźba „Król Kazimierz Wielki” z muzeum UJ	-700 j. H.	bliski 100%	-400*-500 j.H.
Rzeźba „Madonna z Dzieciątkiem”, nr inw. ASP 274	-600 j.H.	ok. 30%	-500 j.H.

smach drewna późnego. Może to wskazywać, że w drewnie późnym, gdzie średnice komórek są mniejsze, zaś udział masy drzewnej większy niż w paśmie drewna wczesnego, szybciej nastąpiło zablokowanie migracji tworzywa. Jednocześnie wskazuje to na bardzo dobre przesylenie tego obszaru roztworem impregnującym.

W drewnie zniszczonym rozkład tworzywa jest bardzo nierównomierny. W miejscach, w których gęstość drewna była bardzo obniżona, odpowiadających słabo wypełnionym ubytkom wewnętrznym, nastąpił jedynie niewielki wzrost gęstości, rzędu 0÷30 j. H. W miejscach tych zabrakło zapewne struktury, na której mogłyby nastąpić osadzenie się tworzywa.

W pozostałych obszarach drewna zniszczonego, zawierających zarówno zachowane fragmenty drewna, jak i wypełnione korytarze owadów, nastąpił wyraźny i dosyć równomierny wzrost gęstości, średnio o około 100 j. H., przy czym średni lokalny wzrost gęstości jest tym większy im niższa była pierwotna gęstość materiału. Znacznie większy udział tworzywa w drewnie zniszczonym jest zjawiskiem pozytywnym.

W badanym obiekcie, obok struktury anatomicznej drewna, największy wpływ na udział i sposób rozmieszczenia tworzywa w drewnie ma stan zachowania samego drewna.

Oceniając efekty impregnacji należy mieć na uwadze, że przy zastosowaniu jako impregnatu 20% roztworu Paraloidu B 72, pomijając migrację tworzywa oraz objętość zajęta przez masę drzewną, przy całkowitym przesyleniu struktury drewna, maksymalny wzrost gęstości pochodzący od tworzywa nie może przekraczać około 170 j. H.²⁰ Po uwzględnieniu niedostępnej dla roztworu impregnującego i niestety trudnej do oszacowania w drewnie zabytkowym objętości masy drzewnej, wielkość ta będzie jeszcze mniejsza.

Możliwość porównania uzyskanych efektów impregnacji obiektu zabytkowego ze stopniem nasycenia

rzeźby badanej przez M. Paciorka²¹ jest ograniczona zarówno ze względu na różnice w budowie i stanie zachowania obu obiektów, jak i różnice w przyjętych sposobach opisu wyników (Tabela 3).

W rzeźbie krakowskiej pierwotna średnia gęstość drewna, oceniana na podstawie histogramów, jest niższa o około 100 j. H. Ponadto stopień zachowania polichromii na licu obiektu bliski 100% oraz wypełnienie większości ubytków musiały wywrzeć wpływ na kierunek i tempo odparowywania rozpuszczalnika. Natomiast użycie tych samych materiałów oraz zastosowanie podobnej techniki i procedury zabiegu i taki sam czas odparowywania powinny zapewnić rzetelność porównania wyników. Możliwość porównania jest jednak znacznie zmniejszona ze względu na ograniczenie opisu wyników do określenia wzrostu gęstości drewna po przesyleniu roztworem impregnującym. Natomiast wzrost gęstości drewna po odparowaniu rozpuszczalnika, pochodzący od samego tworzywa, został jedynie opisany jako proporcjonalny do osiągniętego stanu nasycenia rzeźby roztworem impregnującym. Przedstawionego w tabeli porównania efektów impregnacji można więc było dokonać jedynie na podstawie załączonych wykresów.

Wydaje się, że osiągnięty stopień nasycenia drewna tworzywem wzmacniającym jest zbliżony w obydwu obiektach. Natomiast osiągnięte w wypadku rzeźby Madonna z Dzieciątkiem znacznie bardziej równomierne przesylenie bryły obiektu roztworem impregnującym oraz jego pełniejsze i równomierne odparowanie można przypisać znacznym ubytkom polichromii oraz gąbczastej strukturze silnie zniszczonego drewna z licznymi otwartymi ubytkami.

Problemy z porównaniem wyników badań wskazują, że należy wypracować i przyjąć jedną wspólną metodę opisu efektów impregnacji. Ponieważ zasadnicze znaczenie ma osiągnięty udział i rozkład samego tworzywa we wzmacnianym drewnie, to on powinien być

20. Oszacowania dokonano w oparciu o założenie liniowości skali gęstości w zakresie od -1000 do ok. +200 j.H. — zob. M. Paciorek, *Badania wybranych tworzyw...* Ponadto przyjęto określone w badaniach własnych wartości charakterystyczne dla stałego

Paraloidu B 72: gęstość = 1,14g/dm³ oraz liniowy wsp. osłabienia prom. rtg. = +50 j.H.[cm⁻¹].

21. M. Paciorek, *Badania wybranych tworzyw...*

przede wszystkim prezentowany. Wzrost gęstości w wyniku nasycenia drewna roztworem impregnującym, mimo że bardziej efektywny, jest wielkością drugorzędą, choć niesie też ze sobą ważne informacje pozwalające na ocenę skuteczności zastosowanej techniki nasycania oraz migracji tworzywa w procesie odparowywania.

Badania dendrochronologiczne

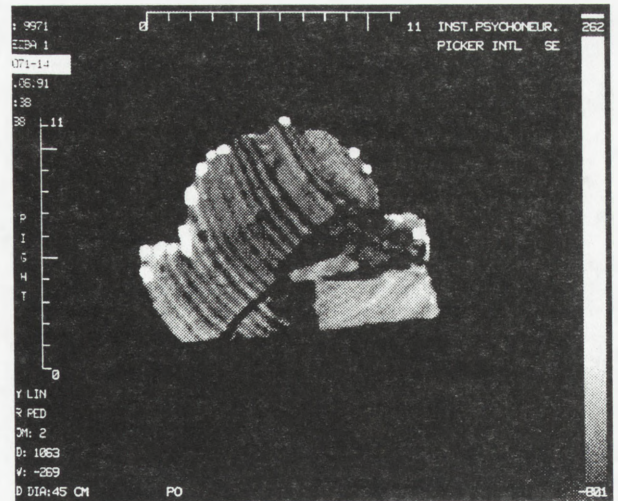
Wyniki uzyskane w trakcie badań drewna dębu wskazują na możliwość uzyskiwania tą metodą wartościowych danych z punktu widzenia dendrochronologii. Teoretyczna maksymalna rozdzielczość użytej aparatury jest wprawdzie niższa niż przeciętnych aparatów optycznych, wykonujących pomiary z dokładnością 0,05 mm, jednak otrzymywane profile pochłaniania promieniowania były wystarczająco dokładne, aby przedstawić szczegóły budowy wewnętrznej drewna o wielkości rzędu 0,5 mm, co powinno umożliwić identyfikację wszystkich, nawet największych przyrostów w badanych próbkach. Czytelność otrzymanych obrazów tomograficznych jest natomiast zbyt niska.

Jedynie fragmenty szerokosłojiste, o szerokości przyrostów powyżej 1 mm i wysokim kontraście gęstości między drewnem wczesnym a późnym, dają dostatecznie wyraźny obraz, umożliwiający ich identyfikację i pomiar bezpośrednio na tomogramie. Fragmenty zawierające wąskie przyrosty, w których różnice gęstości między drewnem wczesnym a późnym są kilkakrotnie mniejsze, dają obraz znacznie mniej kontrastowy, na którym gęsto rozmieszczone granice przyrostów ulegają zatarciu.

Kontrastowość obrazu można w pewnym zakresie poprawić optymalnie dobierając jego rozpiętość tonalną dla każdej próbki lub jej fragmentu. Nie stanowiłoby to problemu przy swobodnym dostępie do pełnego cyfrowego zapisu wyników badania i oprogramowania do jego obróbki, jednak obecnie jedyną dostępną na zewnątrz formą zapisu wyników są fotogramy obrazu na monitorze.

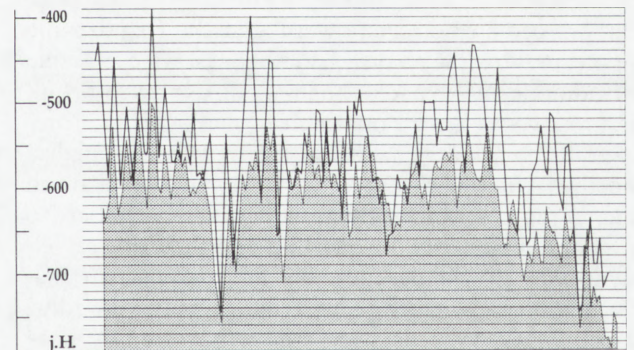
Do wykonania pomiarów dendrochronologicznych szerokosłojistego drewna dębu o szerokości przyrostów rzędu 2 mm wystarczają tomogramy wykonane w oparciu o standardową matrycę 256 x 256 punktów. Umożliwiają one wykonanie pomiarów zarówno na krzywej absorpcji promieniowania, jak i bezpośrednio na obrazie tomograficznym.

Do efektywnego zbadania próbek drewna wąskosłojistego konieczne jest zastosowanie matrycy wysokiej rozdzielczości 512 x 512 punktów i zmniejszenie pola badania do minimum, co pozwala osiągnąć teoretyczną rozdzielczość około 0,1 mm. Otrzymane w ten sposób obrazy tomograficzne okazały się jednak zbyt mało kontrastowe i w efekcie nieczytelne, co



7. Skan 071-14 (10,5x 8,7 cm). W tylnej części rzeźby pęknięcie całkowicie oddzielające fragment drewna od jej korpusu. Jest ono kontynuacją promieniowego zgrupowania pustych kanałów widocznego już od skanu 71-01. W szczelinę pomiędzy dużym flekiem a drewnem oryginalu wciśnięte dwa małe, leżące na sobie kliny drewniane (12;5). Ponadto większy klocek drewna wypełnia trójkątne wycięcie ukryte pod flekiem (8;4)

7. Scan 071.14. Empty canals create rows of single width, arranged along the rings or radial lines. In the back part of the statue - a fissure which completely separates the fragment of the wood from its corps, and is a continuation of a radial grouping of empty canals, seen already in scan 71.01. Two small, wooden wedges, one on top of the other, are pressed into the fissure between the large lift and the wood of the original (12,5). Furthermore, a larger block of wood fills the triangular cleft concealed under the lift (8.4)



8. Wzrost gęstości drewna obiektu zabytkowego w efekcie impregnacji roztworem Paraloidu B 72 po odparowaniu rozpuszczalnika

8. Increase of wood density of the historical object due to impregnation with a solution of Paraloid B 72, after the evaporation of the solvent

uniemożliwiło wykonanie pomiarów bezpośrednio na tomogramach. Na zdjęciach tych skala kontrastu nie została jednak dobrana w sposób optymalny.

Natomiast otrzymane w tych badaniach profile absorpcji promieniowania wydają się przedstawiać wewnętrzną strukturę drewna z dokładnością wystarczającą dla potrzeb pomiarów dendrochronologicznych. Na ich kształt, oprócz ułożonych na przemian pasm

Tabela 4

Próbka drewna	Zakres wartości gęstości tomograficznych (pierwsze dwie liczby opisują przeciętny zakres gęstości typowy dla zdrowego drewna danej próbki, liczby w nawiasie podają zakres gęstości obejmujący wartości ekstremalne)
Buk, drewno zabytkowe XVII–XVIII w., próbka 1	$-300 \div -460$ ($-270 \div -490$) j. H.
Buk, drewno zabytkowe XVII–XVIII w., próbka 2	$-360 \div -540$ ($-340 \div -570$) j. H.
Lipa, drewno współczesne	$-410 \div -650$ j. H.
Lipa, drewno zabytkowe XV w.	$-520 \div -640$ ($-500 \div -790$) j. H.
Dąb szerokosłoiasty, drewno współczesne. Odczyt wzdłuż dwu różnych prostych w obrębie tej samej próbki	A: $-200 \div -390$ ($-140 \div 430$) j. H. B: $-200 \div -430$ ($-140 \div -460$) j. H.
Dąb szerokosłoiasty z pasmem wąskich przyrostów, drewno współczesne. Odczyt w obrębie drewna szerokosłoiastego — A i wąskosłoiastego — B	A: $-180 \div -380$ ($-130 \div -480$) B: $-330 \div -500$ ($-290 \div -560$) j. H.
Dąb czarny, wąskosłoiasty, drewno subfossylne, ok. 1000 lat	$-490 \div -590$ ($-490 \div -630$) j. H.
Sosna, drewno współczesne. Odczyt wzdłuż trzech różnych prostych w obrębie tej samej próbki	C: $-370 \div -640$ j. H. D: $-350 \div -710$ j. H. E: $-350 \div -610$ j. H.

drewna wczesnego i późnego, wpłynęły też jednak inne elementy anatomiczne występujące w drewnie dębu, np. promienie rdzeniowe. Poprawne rozpoznanie granic przyrostów na tych krzywych jest więc znacznie utrudnione. W wypadku analizy pojedynczych profili jest to kwestia daleko posuniętej dowolności interpretacji. Rozwiązaniem może być w tym wypadku analiza porównawcza większej liczby krzywych uzyskanych dla tej samej próbki wzdłuż różnych prostych. Bardzo pomocne byłoby też porównanie z dostatecznie czytelnym obrazem tomograficznym, umożliwiającym analizę na całej powierzchni przekroju, a nie tylko wzdłuż pojedynczej, wybranej przypadkowo prostej.

W wypadku próbek drewna współczesnego najlepsze efekty uzyskiwano przy pomiarach odległości między minimami krzywej absorpcji. Jednak w wypadku badania drewna dębu czarnego, subfossylnego, którego wiek oceniono na około 1000 lat, znacznie lepsze efekty dał pomiar odległości między maksimami. Wskazuje to, że w wypadku badań starego, zniszczonego drewna także ta metoda pomiaru może dostarczyć wartościowych informacji.

Szacując teoretycznie minimalną szerokość możliwego do zaobserwowania i zmierzenia przyrostu drewna dębu należy założyć, iż do jego prawidłowego

rozpoznania niezbędne jest rozróżnienie pasm drewna wczesnego i późnego. Oznacza to, że w szerokości przyrostu muszą mieścić się co najmniej dwa punkty macierzy rekonstrukcji obrazu. W wypadku użytej w tych badaniach aparatury oznaczałoby to możliwość zmierzenia wszystkich przyrostów o szerokości powyżej 0,2 mm. Wśród badanych próbek drewna dębu szerokość największych przyrostów wynosiła 0,5 mm.

Jednak już badania przeprowadzone w Danii w r. 1984²² wykazały, że w przypadku drewna dębu minimalnej szerokości możliwych do zmierzenia przyrostów nie można określić w sposób jednoznaczny.

W porównaniu z tymi — najpełniejszymi z dotychczas opublikowanych — wynikami badań w tej dziedzinie należy odnotować dalszy znaczący postęp w zakresie jakości wyników, dotyczący głównie wzrostu rozdzielczości liniowej, co daje w efekcie możliwość rozpoznania i zmierzenia znacznie węższych przyrostów. Wydaje się, że pomiar wszystkich opisanych w tej publikacji próbek, w których największe z występujących przyrostów miały około 0,3 mm szerokości, leży już w zakresie możliwości użytej w obecnych badaniach aparatury. Ponadto wydaje się, że wykonywanie pomiarów na krzywych absorpcji promieniowania rentgenowskiego, w przeciwieństwie do zastosowanej

22. P. Preuss, K. Christensen, K. Peters, op. cit.

przez duńskich naukowców metody pomiarów optycznych bezpośrednio na obrazie tomograficznym, pozwala na uzyskanie wartościowych wyników także w tych wypadkach, gdy otrzymany obraz tomograficzny jest zbyt zatarty, by umożliwić prawidłowe rozpoznanie struktury drewna. Natomiast metoda pomiarów bezpośrednio na tomogramie, w wypadku jego dostatecznej czytelności daje swobodę wyboru linii pomiaru, pozwala na wykonanie pomiarów wzdłuż różnych prostych dla tej samej próbki i w efekcie pozwala uniknąć zakłóceń pochodzących od uszkodzeń lub zaburzeń struktury drewna.

Wykonano także badania tomograficzne pojedynczych próbek kilku innych gatunków drewna. Zbadano jeden gatunek iglasty — sosnę zwyczajną (*Pinus sylvestris* L.) oraz dwa gatunki liściaste rozpięchłonaczyniowe — buk (*Fagus sylvatica* L.) i lipę (*Tilia* sp.). Cechy budowy anatomicznej dwóch ostatnich gatunków znacznie utrudniają wykonanie pomiarów dendrochronologicznych metodą tradycyjną, chodziło więc w tym wypadku o stwierdzenie możliwości wykonania takich pomiarów na podstawie wykresu zmian gęstości drewna.

Uzyskana dla drewna sosny krzywa absorpcji zdaje się wskazywać, że gatunek ten, a także prawdopodobnie inne gatunki iglaste, może się bardzo dobrze nadawać do prowadzenia badań dendrochronologicznych metodą CT-X. Także krzywe otrzymane dla gatunków liściastych rozpięchłonaczyniowych wydają się dostatecznie zróżnicowane, aby było możliwe na ich podstawie wykonanie pomiarów dendrochronologicznych. Warunkiem osiągnięcia wartościowych wyników jest jednak zastosowanie dostatecznie wysokiej rozdzielczości liniowej.

Charakterystyki gęstości poszczególnych gatunków drewna

Otrzymane w badaniach tomograficznych krzywe absorpcji promieniowania rentgenowskiego, proporcjonalnej do lokalnej gęstości materiału próbek, wykorzystano też do sporządzenia zestawienia zakresu i średnich wartości osłabienia dla poszczególnych gatunków drewna.

W przedstawionej tabeli poszczególne próbki drewna cechuje różny zakres osłabienia promieniowania. Należy jednak zauważyć, że nawet w obrębie tych samych próbek drewna istnieją pewne różnice. Ponadto przedstawione próbki należą do trzech, zdecydowanie różniących się pod względem budowy anatomicznej grup — iglastych, liściastych pierścieniowonaczyniowych oraz liściastych rozpięchłonaczyniowych.

Widoczne między nimi różnice w zakresie osłabienia promieniowania w wypadku drzew należących do tej samej grupy mogą być znacznie mniejsze. Przykładem może być tu zestawienie drewna buka i lipy.

Obok przynależności gatunkowej istotny wpływ na zakres gęstości tomograficznej próbek wydaje się mieć przeciętna szerokość pierścieni. Szczególnie duży wpływ wywiera ona w próbkach gatunków, u których występuje znaczna różnica gęstości między drewnem wczesnym a późnym — u drzew iglastych i liściastych pierścieniowonaczyniowych.

Trzeba też zauważyć, że w wypadku badań, w których rozdzielczość obrazu tomograficznego jest zbliżona do wielkości badanych struktur, może następować uśrednianie gęstości w poszczególnych punktach i w efekcie spłaszczenie krzywej absorpcji. Zdecydowanie największy wpływ na zakres gęstości tomograficznej danej próbki ma jej wiek i stan zachowania drewna.

Wydaje się więc, że sugerowana przez niektórych autorów²³ możliwość identyfikacji gatunku drewna na podstawie zakresu osłabienia promieniowania rentgenowskiego jego próbki jest mało prawdopodobna. Być może przy większym zasobie doświadczenia można by się o to pokusić na podstawie zestawienia zakresu osłabienia danej próbki i jej dobrej jakości obrazu tomograficznego.

Dane o zakresie osłabienia promieniowania mogą się natomiast okazać przydatne do ilościowej oceny stanu zachowania i wytrzymałości drewna zabytkowego, a być może i innych jego cech fizycznych, takich jak zawilgocenie czy zasolenie.

Uwagi końcowe

Możliwość zastosowania tej techniki w badaniach budowy i diagnostyce stanu zachowania rzeźb drewnianych polichromowanych oraz drewna zabytkowego wydaje się w świetle przeprowadzonych prób oczywista. Jakość uzyskiwanych informacji jest z punktu widzenia tego zakresu zastosowań całkowicie wystarczająca. Zastosowanie dostępnej aparatury medycznej do takich badań jest całkowicie możliwe i nie wymaga żadnych dodatkowych przygotowań.

Jednak interpretacja uzyskanych wyników, zwłaszcza w zakresie identyfikacji materiałów i określenia stanu ich zachowania, mogłaby być dużo pełniejsza w wypadku dysponowania odpowiednim materiałem porównawczym. Uzasadnioną potrzebą wydaje się więc opracowanie wzorcowego zestawienia gęstości tomograficznej poszczególnych materiałów oraz zdrowego, współczesnego drewna najważniejszych gatun-

23. A. Beck, *Original — Fälschung? Bildgebende Verfahren bei der Diagnostik von Kunstwerken*, Konstanz 1990; K. Martius, *Computertomographie und ihr Einsatz in der Dokumentation von Mu-*

sikinstrumenten, "Arbeitsblätter für Restauratoren" 1992, 1, s. 129-134.

ków. Przydatna mogłaby być też skala pozwalająca ocenić stopień ich destrukcji na podstawie obniżenia gęstości.

W badaniach drewnianych obiektów zabytkowych uznano za całkowicie możliwe następujące zakresy zastosowań:

1. określenie budowy technologicznej obiektów, obejmujące:

- rozpoznanie pierwotnej konstrukcji obiektu,
- rozpoznanie późniejszych zmian, przeróbek i uzupełnień w jej zakresie,
- określenie wymiarów poszczególnych elementów konstrukcji, w tym także warstw technologicznych, takich jak np. warstwa zaprawy,
- identyfikację poszczególnych materiałów i określenie ich rozmieszczenia w obiekcie,
- określenie cech technologicznych materiałów, ich jakości oraz ukrytych wad,
- ocenę konstrukcji obiektu i użytych materiałów pod kątem jakości wykonania, wiedzy technologicznej autora, czasu powstania obiektu a także stanu zachowania i przyczyn ewentualnych uszkodzeń;

2. określenie uszkodzeń i stanu zachowania obiektu, w tym:

- rozpoznanie obecności, lokalizacji i rozmiarów uszkodzeń mechanicznych, a także często określenie przyczyn ich powstania,
- określenie stanu zachowania materiałów w oparciu o porównanie zmian ich gęstości w stosunku do materiałów współczesnych,
- ocenę istniejących już uszkodzeń pod kątem ich wpływu na dalsze bezpieczeństwo obiektu, wskazanie miejsc największego zagrożenia oraz przewidywanie kolejnych możliwych zniszczeń.

Możliwość ilościowego określenia rozkładu gęstości oraz — przez porównanie wyników kolejnych badań — śledzenie jej zmian w czasie czyni z tej techniki uniwersalne narzędzie badawcze. Zakres możliwych zastosowań może obejmować śledzenie procesów dynamicznych i zmian zachodzących w obiekcie pod wpływem czynników zewnętrznych, takich jak:

- zmiany kształtu pod wpływem naprężeń,
- migracja wilgoci lub innych substancji,
- badania efektów zabiegów konserwatorskich.

Przeprowadzone badanie efektywności zabiegu impregnacji próżniowej obiektu zabytkowego pozwala stwierdzić, że możliwości użytej aparatury medycznej były zupełnie wystarczające dla tego zakresu zastosowań. Jednak wysoka dokładność danych jest w znacznej mierze tracona w wyniku jedyne go dostępnego sposobu rejestracji i przenoszenia wyników badań w postaci fotogramów ekranu monitora zestawu. Możliwość uzyskania zapisu wyników w postaci cyfrowej macierzy rozkładu gęstości i przeniesienia ich do

innych dostępnych komputerów pozwoliłaby na zachowanie dokładności wyników oraz możliwości dalszej ich obróbki i porównań. Dałoby to też możliwość pełniejszej i dokładniejszej prezentacji wyników takich badań.

Próby zastosowania rentgenowskiej tomografii komputerowej do pomiarów i datowania próbek drewna metodą dendrochronologiczną nastroczają kilka problemów, jednak ich rodzaj może świadczyć o dokonującym się postępie w tej dziedzinie.

Decydującym problemem jest uzyskanie zadowalającej rozdzielczości liniowej obrazu tomograficznego. Wydaje się jednak że współczesne aparaty medyczne (model użyty w tych badaniach pochodzi z 1989 r.) umożliwiające uzyskanie rozdzielczości rzędu 0,1 mm, osiągają już granicę pozwalającą na efektywne zastosowanie ich do wykonania takich pomiarów.

Nowym problemem jest opracowanie odpowiednich metod pomiarów. W wypadku pomiaru pojedynczych krzywych rozpoznanie granic kolejnych przyrostów na krzywej absorpcji, nawet dla nie uszkodzonego drewna współczesnego, jest często kwestią interpretacji. Dla uzyskania poprawnych wyników konieczna jest więc analiza porównawcza co najmniej kilku krzywych absorpcji dla jednej próbki i stworzenie na ich podstawie krzywej wypadkowej, wolnej od lokalnych zakłóceń, która byłaby podstawą do wykonania pomiarów. Procedura taka wydaje się jeszcze bardziej uzasadniona w wypadku drewna zabytkowego, mogącego zawierać liczne, rozlokowane przypadkowo, uszkodzenia wewnętrzne.

Przeprowadzenie w pełni wartościowych badań w tej dziedzinie oraz dalsze możliwości pracy wymagają znalezienia możliwości przeniesienia wyników badań tomograficznych w postaci cyfrowej do powszechnie dostępnych systemów komputerowych. Czas dostępu do konsoli aparatury medycznej jest zbyt drogi i ograniczony, zaś jej możliwości zbyt wąsko wyspecjalizowane, aby umożliwić swobodną i wszechstronną analizę wyników. Obecna metoda rejestracji i przenoszenia wyników w postaci fotogramów ekranu monitora powoduje zbyt dużą utratę dokładności danych i praktycznie pozbawia możliwości dalszego ich przetwarzania.

Sama procedura analizy i pomiarów krzywych absorpcji jest bardzo pracochłonna. Wskazuje to na konieczność opracowania metod umożliwiających automatyczne wykonanie takich pomiarów.

Podsumowując powyższe wnioski można stwierdzić, że na obecnym etapie zasadniczym problemem staje się już nie kwestia możliwości technicznych samej aparatury i jej dokładności, lecz możliwość pełnego dostępu do wyników badań oraz ich dalszej obróbki. Rozwiązanie tego problemu jest jedyną metodą znaczącej poprawy jakości wyników dostępnych bezpo-

średnio dla badaczy. Od strony technicznej obróbka wyników w postaci zrekonstruowanej już macierzy rozkładu gęstości leży w pełni w zakresie możliwości współczesnych komputerów osobistych. Przeszkodą jest tylko brak odpowiedniego oprogramowania pozwalającego na przeniesienie danych.

Kwestia kosztów badania tomograficznego nie powinna być natomiast istotnym ograniczeniem. Koszt wykonania przeciętnego badania, w ramach którego otrzymuje się przeciętnie około 10 skanów, wynosi 2 mln złotych (sierpień 1994). Jest to porównywalne z ceną klasycznego badania rentgenowskiego obiektu średniej wielkości.

BIBLIOGRAFIA

- G.C. Conroy, M.W. Vannier, *Noninvasive Three-Dimensional Computer Imaging of Matrix-Filled Fossil Shells by High Resolution Computed Tomography*, „Science” 1984, 226, s. 456–458.
- J. Cott, A. Unger, *Resultate einer Nasskonservierung mit Zucker*, „Restauro” 1991, 6, s. 392–397.
- M. Kiepuszewska, M. Roznerska, *Próba identyfikacji substancji wzmacniających drewno przy użyciu zapisu rentgenograficznego*, „Acta Universitatis Ni-

colai Copernici. Zabytkoznawstwo i Konserwatorstwo” t. XX, 1993, s. 147–171.

- W. Kurpik, *Przemieszczanie spoiw w czasie wysychania mas trocinowych (w:) Zabytkowe drewno — konserwacja i badania*, Warszawa 1987, s. 117–124.
- M. Niedzielska, *Konserwacja rzeźby „Król Kazimierz Wielki” z Muzeum UJ*, „Ochrona Zabytków” 1992, 3, s. 225–231.
- P. Reimers, J. Riederer, J. Goebels, A. Ketttschau, *Dendrochronology by Means of X-Ray Computed Tomography (CT)*, „Archaeometry” 1989, s. 121–125.
- R. van Schoute, H. Verdungstraete-Marcq, *Radiography*, „Journal of European Study Group on Physical, Chemical, Mathematical Techniques Applied to Archaeology” 1986, s. 131–153.
- T. Ważny, *Dendrochronologia w ochronie zabytków*, „Ochrona Zabytków” 1986, 4, s. 303–305.
- T. Ważny, *O dendrochronologii i możliwości jej zastosowania w datowaniu zatopionego wczesnośredniowiecznego portu w Zatoce Puckiej*, „Pomerania Antiqua”, t. XIV, 1990, s. 133–147.
- T. Ważny, *Określenie wieku zabytków architektury z Pomorza Wschodniego przy zastosowaniu metody dendrochronologicznej*, „Ochrona Zabytków” 1992, s. 254–359.

The Use of X-ray Computer Tomography in the Examination of the Structure of Wood and Wooden Polychromies

The CT-X tomography technique makes it possible to depict the inner construction of spatial objects with a precision that permits the execution of geometric measurements and a quantitative determination of the density pattern.

Owing to the fact that this is a non-destructive technique, it can be applied for examining unique objects such as works of art.

The author worked on a sixteenth-century polychromy linden sculpture and obtained information about:

- the technological construction and damage of the object,
- the structure of the wood and the state of its preservation,
- the effectiveness of the vacuum impregnation of old wood,
- the effects of other conservation operations.

An examination of samples of several types of wood enabled the author to establish the scale of tomographic densities. He also attempted to define the possibility of

employing CT-X tomography for dendrochronological measurements.

The outcome of the investigation proved to be extremely valuable for determining the state of the preservation of the wooden object, the selection of a conservation programme and subsequent work. This method allows us to observe the dynamics and effects of conservation operations.

On the other hand, the achievement of valuable results in dendrochronological measurements depended predominantly on the parameters of the samples. In the case of narrow-ring samples it balanced on the borderline of the abilities of the used apparatus (a PICKER SYNERVIEW S.E. medical tomograph from 1988).

The basic problem, however, proved to be the lack of opportunities for a direct transference of the results to a generally accessible computer system. This fact adversely affected the precision of the results and made impossible their complete presentation.