



# Nowoczesne metody diagnostyki obiektów zabytkowych

Mgr inż. Monika Zielińska, Politechnika Gdańska

## 1. Wprowadzenie

Obiekty zabytkowe są ważnym elementem naszej kultury i źródłem wiedzy kształtującej świadomość społeczną. Tematyka związana z budynkami wpisanymi do rejestrów zabytków, czy też będącymi pod ochroną konserwatorską staje się coraz częściej podejmowana na konferencjach i debatach międzynarodowych. Stało się to przyczyną rozwoju i popularyzacji nowych technologii diagnostyki obiektów zabytkowych. Korzyści wynikające z ich stosowania można znaleźć zarówno podczas prowadzenia prac bieżących związanych z utrzymaniem obiektu, jak również podczas projektowania i wykonawstwa robót konserwatorskich. Diagnostyka oparta o nowoczesne metody pozwala na identyfikację materiałową oraz odtworzenie struktury wewnętrznej poszczególnych elementów, co jest niezwykle ważne zwłaszcza w przypadku braku dokumentacji istniejącego obiektu. Ponadto umożliwia zobrazowanie występujących wad, uszkodzeń, pustek powietrznych, które nie są widoczne gołym okiem, jak również zmian w strukturze materiałowej. Na podstawie otrzymanych wyników możliwe jest, już na etapie projektowania, prawidłowe zaplanowanie prac konserwatorskich, restauratorskich czy modernizacyjnych.

## 2. Nowoczesne metody diagnostyki

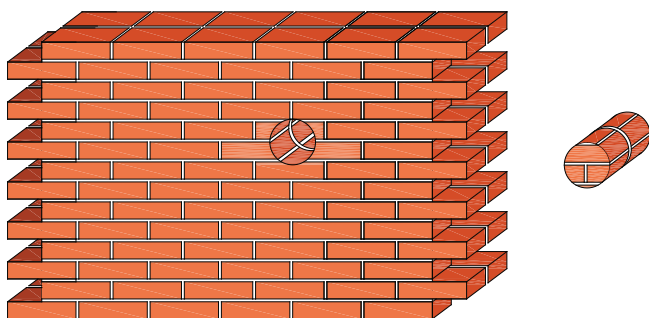
Wśród nowoczesnych metod diagnostyki obiektów zabytkowych dużą rolę odgrywają głównie metody niszczące (NDT – *non-destructive testing*). Ze względu na swój nieinwazyjny charakter pozwalają na ochronę substancji zabytkowej w możliwie dużym zakresie. Wśród nich można znaleźć badania dynamiczne, ultradźwiękowe oraz badanie z zastosowaniem georadaru. Zestawienie najczęściej stosowanych metod badawczych zobrazowano w tabeli 1 wraz z badanymi parametrami oraz zaletami i wadami metody. Ze względu na skomplikowany charakter prowadzenia badań o charakterze niszczącym i trudnościach wynikających z interpretacji danych mogą one dać niezadowolające efekty. Wynika to jednak często z błędnie przyjętej metody badawczej lub braku precyzji. Najlepsze efekty uzyskuje się, zestawiając ze sobą kilka metod, dzięki czemu otrzymane wyniki mogą zostać potwierdzone.

### 2.1. Odwierty

Odwierty to jedna z najprostszych metod diagnostyki struktury wewnętrznej elementów w obiektach zabytkowych. Nie wymaga wykonywania skomplikowanych obliczeń, a odpowiedź dotycząca struktury wewnętrznej otrzymywana jest bezpośrednio po przeprowadzeniu

Tabela 1. Metody diagnostyki obiektów zabytkowych

Metoda	Badane parametry	Zalety	Wady
Badanie wizualne	badanie stanu powierzchni zewnętrznej	niskie koszty niewymagane duże umiejętności badawcze	badanie powierzchniowe
Odwierty	struktura wewnętrzna	pewność otrzymanych danych szybkość wykonania	naruszenie substancji zabytkowej badanie tylko w punkcie odwiertu
Badanie dynamiczne	badanie parametrów modalnych (postacie i częstotliwości drgań własnych, wartość współczynnika tłumienia)	pozwała na dość precyzyjną ocenę stanu konstrukcji	dane trudne do interpretacji drogie oprzyrządowanie
Badanie ultradźwiękowe	propagacja fal sprężystych	szybkie daje dobry obraz struktury wewnętrznej	dane trudne do interpretacji metoda umiarkowanie droga
Badanie georadarem	propagacja fal elektromagnetycznych	szybkie daje dobry obraz struktury wewnętrznej	dane trudne do interpretacji drogie oprzyrządowanie



**Rys. 1.** Schemat wykonywania odwiertów

badania. Jest to metoda szybka do wykonania. Do interpretacji pobranej z odwiertu próbki, zarówno pod względem rodzaju materiału, jak i stanu technicznego, nie jest wymagana specjalistyczna wiedza.

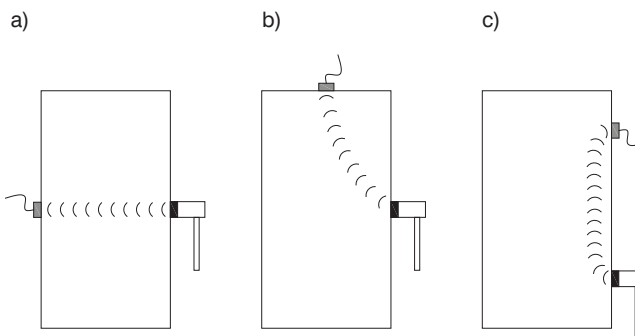
Metoda ta ma jednak wady, pozwala bowiem na identyfikację danego materiału tylko w określonym punkcie wykonywanego badania. To znacznie ogranicza możliwość korzystania z tej metody, gdyż nie jest ona miarodajna dla całego obiektu. Ponadto naruszenie substancji zabytkowej sprawia, że konserwatorzy ograniczają udzielanie pozwolenia na korzystanie z tego rodzaju badań do minimum. Metoda ta może być jednak doskonałym uzupełnieniem innych zastosowanych pomiarów, zwłaszcza jeśli skład chemiczny pobranej próbki zostanie zbadany w sposób laboratoryjny.

## 2.2. Badania dynamiczne

Badania dynamiczne polegają na wymuszeniu drgań obiektu za pomocą sił zewnętrznych, ich pomiary podczas prowadzonego eksperymentu oraz pomiary odpowiedzi dynamicznej konstrukcji. Pozwala to na poznanie parametrów dynamicznych badanych elementów, czyli postaci drgań własnych, częstotliwości drgań oraz wartości współczynników tłumienia. Badania dynamiczne można podzielić na trzy rodzaje [1]:

- teoretyczne – polegają na rozwiązaniu zagadnienia własnego dla przyjętego modelu badanego obiektu,
- eksperymentalne – polegają na wymuszeniu ruchu obiektu w sposób kontrolowany (np. za pomocą młotka modalnego) oraz pomiaru wymuszenia i odpowiedzi konstrukcji w wielu punktach pomiarowych rozmieszczonych na badanym obiekcie,
- eksploatacyjne – polegają na dokonaniu pomiaru odpowiedzi konstrukcji w wielu punktach, podczas gdy ruch układu spowodowany jest rzeczywistymi wymuszeniami eksploatacyjnymi.

Badania dynamiczne są szczególnie istotne w przypadku badań obiektów zabytkowych, dla których nie istnieje dokumentacja projektowa i nie ma możliwości identyfikacji charakterystyk materiałowych. Głównym typem prowadzonych badań dla tego typu budynków jest analiza eksploatacyjna, w której wymuszenia są



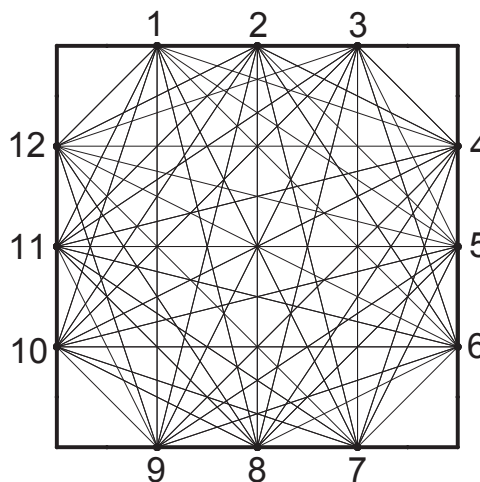
**Rys. 2.** Odczyt sygnału propagacji fali: a) bezpośredni, b) c) pośredni

spowodowane np. ruchem pojazdów, wiatrem czy też prowadzonymi w sąsiedztwie pracami budowlanymi (wbijanie ścianek szczelnych oraz pali, praca wibromłotów itp.). Wyznaczone w ten sposób parametry można wykorzystać w celu diagnostyki uszkodzeń oraz oceny stanu technicznego obiektu. Zebrane dane mogą posłużyć do opracowania sposobu wykonania niezbędnych napraw lub wzmocnień konstrukcji.

## 2.3. Propagacja fal sprężystych

Badanie propagacji fal sprężystych ma charakter nieinwazyjny i jest stosowane w diagnostyce zarówno zabytków, jak i innych obiektów inżynierii lądowej. Polega ono na pomiarach przenikania i odbić fal sprężystych w danym ośrodku. Metoda ta pozwala na ocenę jednorodności materiału, określenie wymiarów badanego elementu oraz wykrycie pęknięć, pustych przestrzeni i uszkodzeń.

Sygnał wzbudzenia fali wywołany jest za pomocą przyłożonej siły i odczytany przy użyciu akcelerometrów. Wśród badań opartych na propagacji fal sprężystych można wyróżnić metodę przepuszczenia (rys. 2a). Sygnał jest wówczas wysyłany z jednej strony elementu



**Rys. 3.** Schemat tomografii ultradźwiękowej



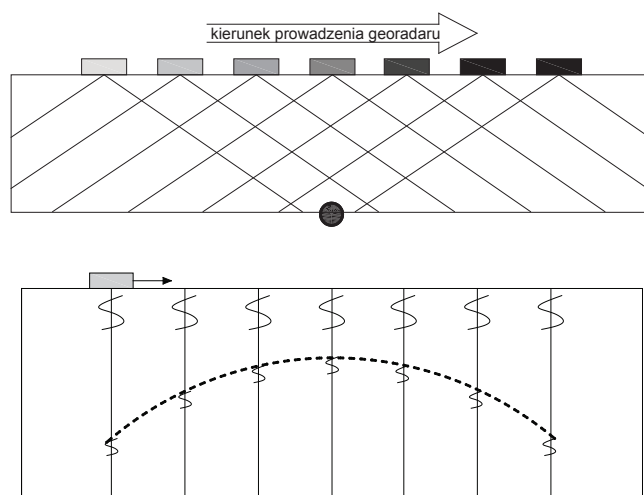
i odbierany po stronie przeciwnej. Metoda ta ma duże zastosowanie w materiałach silnie tłumiących, ponieważ fale przechodzą przez badaną próbkę tylko raz. Pozwala na obserwację zmiany natężenia przechodzących fal, gdyż każda nieciągłość materiału spotkana po drodze prowadzi do osłabienia fali. W przypadku znanej grubości materiału możliwe jest również określenie prędkości rozchodzenia się fal w danym materiale.

Kolejną z metod stosujących propagację fal sprężystych jest metoda odbicia. Akcelerometr znajduje się wówczas na tej samej powierzchni, na której jest przyłożona siła. Metoda ta wykorzystuje zjawisko odbicia fali przechodzącej przez badany materiał od ośrodka sąsiadującego. Na tej podstawie można oszacować wymiary elementu oraz sprawdzać ciągłość materiału. Mierząc czas, jaki upłynął od nadania sygnału do chwili jego odbioru, można, w oparciu o znajomość prędkości rozchodzenia się fali w danym materiale, określić przebytą drogę. Pozwala to na lokalizację powierzchni odbijającej lub wady występującej w strukturze. Metoda ta wymaga jednostronnego dostępu do elementu co jest znacznym ułatwieniem w przypadku elementów w obiektach zabytkowych.

Pomiar pośredni (rys. 2b, c) wykorzystywany jest głównie w tomografii fal sprężystych. Metoda ta jest rozwinięciem pomiaru bezpośredniego ponieważ nie bazuje wyłącznie na pomiarze sygnału znajdującego się bezpośrednio po drugiej stronie przyłożonej siły, a również na odczycie sygnałów z innych powierzchni. Przekrój badanego w ten sposób elementu jest przecinany przez wiele ścieżek fal prowadzących od nadajnika do akcelerometru (rys. 3). Wykonane w ten sposób badania pozwalają na odtworzenie obrazu struktury wewnętrznej badanego przekroju wraz z lokalnymi anomaliami, które związane są z osłabieniem materiału oraz jego niejednorodnością [2]. W celu otrzymania dokładnego obrazu liczba ścieżek musi być wystarczająco duża, tak aby nie pozostały pola wolne od przebiegu fal. Dokładność odtworzenia prędkości propagacji fali w ośrodku może być zwiększona przez przyłożenie fali o odpowiedniej częstotliwości oraz dzięki ostrożnemu zaplanowaniu liczby i rozkładu czujników odczytujących dane wyjściowe.

#### 2.4. Badanie GPR

Dużym zainteresowaniem w diagnostyce obiektów zabytkowych cieszą się badania wykonywane przy użyciu georadaru (GPR – *ground penetrating radar*). Metoda ta bazuje na propagacji fal elektromagnetycznych, które ulegają odbiciu od obiektów o zmiennych właściwościach dielektrycznych. Znajduje szerokie zastosowanie w badaniach archeologicznych, geologicznych jak również w inżynierii lądowej. W obiektach zabytkowych umożliwia ocenę stanu technicznego elementów murowanych [3–8] oraz betonowych [9]. Pozwala przy tym na ocenę grubości elementu, zebranie danych dotyczących



Rys. 4. Schemat lokalizacji obiektów metodą GPR

struktury wewnętrznej badanego ośrodka oraz lokalizację pęknięć i innych uszkodzeń. W badaniach archeologicznych wykorzystywana jest w celu eksploracji jaskiń, pomieszczeń podziemnych czy też fundamentów [10–11]. Główną zaletą badań GPR jest stosunkowo niski koszt wykonania, szybkość przeprowadzonych pomiarów oraz ciągłość otrzymanego obrazu.

Badanie GPR przeprowadza się przy użyciu rejestratora danych oraz dwóch anten (nadawczej i odbiorczej). Antena nadawcza wysyła sygnał w postaci fali elektromagnetycznej, która zostaje odbita od anomalii i odebrana przez antenę odbiorczą. Maksymalna głębokość propagacji zależy od częstotliwości wysyłanej fali elektromagnetycznej oraz od właściwości dielektrycznych badanego ośrodka. Wykorzystywane są anteny o różnych częstotliwościach w zakresie od 10 MHz do 2 GHz. Im wyższa częstotliwość, tym mniejsza głębokość penetracji i większa rozdzielczość otrzymanego obrazu. Wyniki badania dają ciągły obraz trasy wraz z występującymi anomaliami. Widoczne odchyłki mogą odzwierciedlać nieciągłości materiału, pustki oraz inne objekty.

### 3. Podsumowanie

Diagnostyka obiektów zabytkowych jest zagadnieniem niezwykle trudnym i wymagającym szerokiej znajomości tematu. Zaprezentowane w artykule trzy nowoczesne metody badań: badania dynamiczne, ultradźwiękowe oraz użycie georadaru wymagają dużej wiedzy od wykonawcy podczas interpretacji wyników. Trudność sprawia również fakt, że różnorodność zastosowanych do budowy materiałów, w zależności od regionu oraz okresu, w którym powstał obiekt, jest olbrzymia. Znaczne różnice występują również w geometrii elementów nośnych, które zmieniały się na przestrzeni wieków wraz



z pogłębianiem wiedzy inżynierskiej. Dla dużej części zabytków brakuje projektów, na podstawie których zostały one wybudowane, co również utrudnia prawidłowe zaplanowanie i zaprojektowanie prac konserwatorskich, restauratorskich czy modernizacyjnych.

Diagnostyka za pomocą nowoczesnych metod staje się coraz bardziej popularna. Najdokładniejsze efekty otrzymuje się przy zastosowaniu kilku metod jednocześnie. Uzyskane wówczas wyniki pozwalają na ewentualną kalibrację wykonywanych pomiarów, dzięki czemu rezultaty pracy można uznać za wysoko miarodajne.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Żółtowski B., Identyfikacja a diagnostyka, Zeszyty Naukowe nr 5 (77) Akademii Morskiej w Szczecinie, Szczecin, 2005  
 [2] Pérez-Gracia V., Caselles J. O., Clapés J., Martínez G., Osorio R., Non-destructive analysis in cultural heritage buildings: Evaluating the Mallorca cathedral supporting structures, NDT&E International 59 (2013)  
 [3] Binda L., Saisi A., Tiraboschi C., Valle S., Colla C., Forde M., Application of sonic and radar tests on the piers and walls of the Cathedral of Noto, Construction and Building Materials 17 (2003)

- [4] Orlando L., Slob E., Using multicomponent GPR to monitor cracks in a historical building, Journal of Applied Geophysics 67 (2009)  
 [5] Guadagnuolo M., Faella G., Donadio A., Ferri L., Integrated evaluation of the Church of S. Nicola di Mira: Conservation versus safety, NDT&E International 68 (2014)  
 [6] Ismet Kanli A., Taller G., Nagy P., Tildy P., Pronay Z., Toros E., GPR survey for reinforcement of historical heritage construction at fire tower of Sopron, Journal of Applied Geophysics 112 (2015)  
 [7] Ranalli D., Scozzafava M., Tallini M., Ground penetrating radar investigations for the restoration of historic buildings: the case study of the Collemaggio Basilica (L'Aquila, Italy), Journal of Cultural Heritage 5 (2004)  
 [8] Binda L., Zanzi L., Lualdi M., Condoleo P., The use of georadar to assess damage to a masonry Bell Tower in Cremona, Italy, NDT&E International 38 (2005)  
 [9] Courard L., Gillard A., Darimont A., Bleus J.M., Paquet P., Pathologies of concrete in Saint-Vincent Neo-Byzantine Church and Pauchot reinforced artificial stone, Construction and Building Materials 34 (2012)  
 [10] S. Tomecka – Suchoń, Georadar Studies on St. Benedict's Church on Lasota Hill, Acta Geophysica tom 60 nr 2, Kraków, 2012  
 [11] F. Soldovieri, L. Orlando, Novel tomographic based approach and processing strategies for GPR measurements using multifrequency antennas, Journal of Cultural Heritage 10S (2009)

## XI Konferencja Naukowa „Konstrukcje zespolone”

Zielona Góra, 29–30 czerwca 2017

#### TEMATYKA KONFERENCJI

- Teoria
- Badania
- Realizacje
- Wzmocnienia
- Diagnostyka
- Normalizacja
- Nowe technologie
- Projektowanie
- Perspektywy rozwoju

W ramach konferencji zostaną wygłoszone trzy referaty problemowe, a także odbędą się warsztaty z zakresu projektowania stropów zespolonych.

#### ADRES KOMITETU ORGANIZACYJNEGO

Uniwersytet Zielonogórski  
 Instytut Budownictwa  
 „Konstrukcje Zespolone 2017”  
 ul. Profesora Zygmunta Szafrana 1  
 65-516 Zielona Góra  
 Tel.: +48 68 328 2416 – sekretariat  
 +48 68 328 73 69 – Jacek Korentz  
 +48 68 328 78 03 – Paweł Błażejowski  
 Fax: +48 68 3284777  
 E-mail: konstrukcje-zespolone@uz.zgora.pl  
 www.konstrukcje-zespolone.uz.zgora.pl

#### KOMITET NAUKOWY

- Kazimierz Flaga – przewodniczący
- Czesław Machelski – zastępca przewodniczącego
- Jacek Korentz – sekretarz
- Tadeusz Biliński
- Jan Biliszczuk
- Kazimierz Furtak
- Józef Głomb
- Anna Halicka
- Stanisław Kuś
- Jan Kmita
- Mieczysław Kuczma
- Andrzej Łapko
- Arkadiusz Madaj
- Jakub Marcinowski
- Antoni Matysiak
- Janusz Murzewski
- Wojciech A. Radomski
- Leonard Runkiewicz
- Andrzej Rzyżyński
- Elżbieta Szmigiera
- Maciej Szumigała
- Witold Wołowicki
- Adam Wysokowski

#### KOMITET ORGANIZACYJNY

- Tadeusz Biliński – przewodniczący
- Piotr Alawdin – zastępca przewodniczącego
- Janusz Szelka – członek