

Krzysztof Schabowicz*

Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Politechnika Wroclawska

Najnowsze metody nieniszczące wykorzystywane w badaniach w budownictwie

The latest non-destructive methods used in research in construction

ABSTRACT

This paper presents the latest non-destructive methods used in research in construction. The classification of the methods are included. The most interesting of the methods are described. A focus is on the latest non-destructive. Today the development of test methods is oriented towards the evaluation of the characteristics of structures and structural components other than strength. The development of equipment enabling one to obtain an accurate image of the inside structure of the tested element in macro, micro and nano scale. An extensive survey of the literature on the subject, which researchers and experts in the diagnostics of civil structures may find useful, is included.

Keywords: civil structures; diagnostics; test methods; nondestructive methods; seminondestructive methods

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono najnowsze metody nieniszczące wykorzystywane w badaniach w budownictwie. Zamieszczono przegląd i opis wybranych metod. Pokazano przede wszystkim przydatne do tego celu najnowsze metody nieniszczące. Można zaobserwować, iż rozwój metod badawczych jest ukierunkowany na ocenę w elementach i konstrukcjach innych cech niż wytrzymałość. Następuje on w kierunku konstruowania aparatury badawczej pozwalającej uzyskiwać precyzyjne dane odnośnie do struktury badanego elementu zarówno w skali makro, jak i mikro, a czasem i nano. Daje to możliwość pełniejszej oceny jakości wykonania poszczególnych elementów w obiekcie budowlanym i jego konstrukcji.

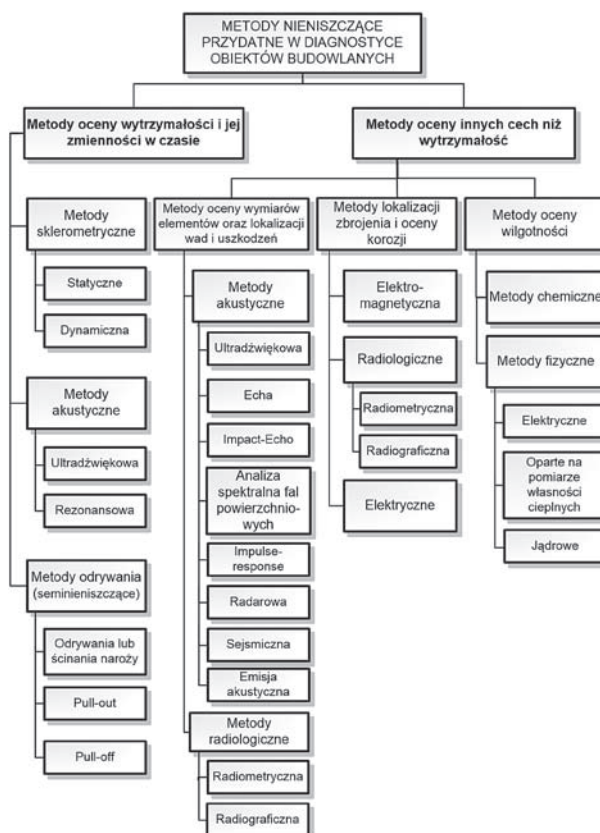
Słowa kluczowe: obiekty budowlane; diagnostyka; metody badawcze; metody nieniszczące

1. Wstęp

Najnowsze metody nieniszczące wykorzystywane w badaniach w budownictwie dotyczą głównie elementów i konstrukcji budowlanych. Są to zazwyczaj konstrukcje wykonane z betonu i poddaje się je badaniom z różnych przyczyn i w różnym czasie, zarówno na etapie wznoszenia, jak i użytkowania. Przydatnych może być do tego celu wiele metod badawczych, które ze względu na stopień ingerencji w konstrukcję można podzielić w budownictwie na niszczące, seminieniszczące i nieniszczące. Badaniom niszczącym są poddawane przede wszystkim próbki pobierane z konstrukcji, rzadziej całe elementy lub konstrukcje.

Badaniom seminieniszczącym i nieniszczącym poddaje się również próbki i elementy, ale także całe konstrukcje. Badania seminieniszczące charakteryzują się tym, że podczas nich następuje niewielka lokalna i zazwyczaj przypowierzchniowa ingerencja w strukturę materiału. Z kolei w badaniach nieniszczących nie dochodzi do takiej ingerencji i można je wykonywać na dużej powierzchni i na znaczną głębokość, a ponadto umożliwiają powtarzanie pomiarów. Natomiast, gdy badana konstrukcja jest jednostronnie dostępna, bo styka się np. z gruntem lub z wodą, niektóre z nieniszczących metod stają się do tego celu nieprzydatne. Jako przykłady takich konstrukcji można podać fundamenty i ściany garaży podziemnych, ściany tuneli i kolektorów, elementy konstrukcyjne obiektów hydrotechnicznych. W takich przypadkach pojawia się konieczność skorzystania z nieniszczących metod badawczych, które nadają się do wykorzystania w konstrukcjach dostępnych jednostronnie.

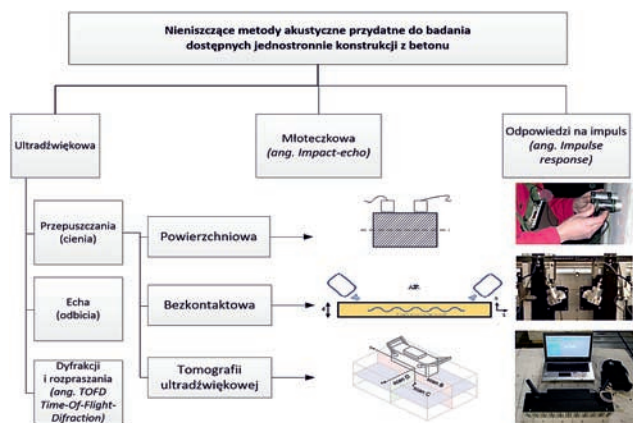
*Autor korespondencyjny. E-mail: k.schabowicz@pwr.edu.pl



Rys. 1. Metody nieniszczące przydatne w diagnostyce obiektów budowlanych [4].

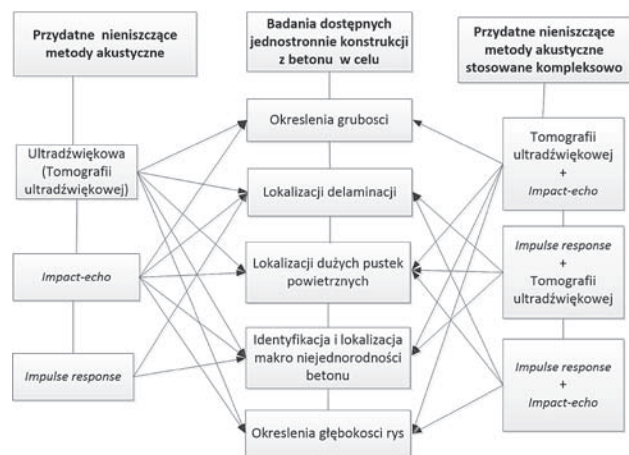
Fig. 1. Non-destructive methods in the diagnosis of building objects [4].

Na rysunku 1 pokazano charakterystyczny podział metod nieniszczących przydatnych w diagnostyce obiektów budowlanych za [4]. Z kolei na rysunku 2, za [5], przedstawiono zmodyfikowaną klasyfikację nieniszczących metod akustycznych przydatnych w badaniach dostępnych jednostronnie konstrukcji z betonu. W artykule [11] zaprezentowano tę klasyfikację szerzej. Natomiast na rysunku 3, za [11], przedstawiono nieniszczące nowoczesne metody akustyczne stosowane pojedynczo lub kompleksowo przydatne do badania dostępnych jednostronnie konstrukcji z betonu.



Rys. 2. Klasyfikacja nieniszczących metod akustycznych przydatnych do badania dostępnych jednostronnie konstrukcji z betonu [5], [11].

Fig. 2. Classification of non-destructive acoustic methods useful for testing of single-sided concrete structures [5], [11].



Rys. 3. Przydatność nowoczesnych nieniszczących metod akustycznych stosowanych pojedynczo lub kompleksowo do badania dostępnych jednostronnie konstrukcji z betonu [11].

Fig. 3. The usefulness of modern non-destructive acoustic methods used individually or comprehensively for testing of concrete structures available on one side [11].

Należy zwrócić uwagę, że w badaniach dostępnych jednostronnie konstrukcji z betonu ekspert dokonujący badania musi podjąć decyzję dotyczącą wyboru właściwej metody, aparatury i zastosowania odpowiedniej metodyki umożliwiającej wykrycie i identyfikację ewentualnych wad.

2. Klasyfikacja wybranych imperfekcji

W sytuacji braku informacji, w tym o rodzaju badanej

imperfekcji, należy wykonać badanie wstępne wybraną metodą i aparaturą, aby na podstawie przeprowadzonej heurystycznie analizy otrzymanych rezultatów zastosować odpowiednią metodę, aparaturę i, co ważne, metodykę badań. Sytuacja jest prostsza, gdy na podstawie informacji uzyskanych na przykład od zleceniodawcy wiadomym jest, jaka imperfekcja występuje. Do dalszej analizy przydatna jest wiedza na temat lokalizacji (położenia), rozległości (wielkości obszaru występowania) i intensywności (zaawansowania zmiany zależnej od rodzaju wady) zidentyfikowanej (rozpoznanej) imperfekcji.

Tab. 1. Klasyfikacja wybranych imperfekcji geometrycznej i materiałowych wraz z zaproponowanymi pojęciami dotyczącymi ich opisu w dostępnych jednostronnie konstrukcjach z betonu badanych nowoczesnymi nieniszczącymi metodami akustycznymi i z przyporządkowaniem metod przydatnych do ich badania [11].

Tab. 1. Classification of selected imperfections occurring in unilaterally accessible concrete structures, together with terms proposed for their description and assigned state-of-the-art non-destructive acoustic methods suitable for testing such structures [11].

| Rodzaj/opis imperfekcji | Metoda badania | | | | | |
|--------------------------------------|--|-------------|------------------|---------------------------------------|--|------------------------------|
| | Ultradźwiękowa (Tomografia ultradźwiękowa) | Impact-echo | Impulse response | Tomografia ultradźwiękowa+Impact-echo | Impulse response + Tomografia ultradźwiękowa | Impulse response+Impact-echo |
| Nieprawidłowa grubość elementu | identyfikacja | • | • | - | • | - |
| | lokalizacja | • | • | - | • | - |
| | rozległość | • | • | - | • | - |
| Delaminacja | identyfikacja | • | • | • | • | • |
| | lokalizacja | • | • | o | • | • |
| | rozległość | • | • | • | • | • |
| Duże pustki powietrzne | identyfikacja | • | • | - | • | • |
| | lokalizacja | • | • | - | • | • |
| | rozległość | • | • | - | • | • |
| Strefy makro-niejednorodności betonu | identyfikacja | • | • | • | • | • |
| | lokalizacja | • | • | • | • | • |
| | rozległość | • | • | o | • | • |
| Rysy | identyfikacja | - | o | - | o | - |
| | lokalizacja | - | o | - | o | - |
| | rozległość | - | o | - | o | - |
| intensywność | o | o | - | o | - | - |
| | o | o | - | o | - | - |
| | o | o | - | o | - | - |
| intensywność | nd | nd | nd | nd | nd | nd |
| | nd | nd | nd | nd | nd | nd |
| | nd | nd | nd | nd | nd | nd |
| intensywność | - | o | - | o | - | o |
| | - | o | - | o | - | o |
| | - | o | - | o | - | o |
| intensywność | - | • | - | • | - | • |
| | - | • | - | • | - | • |
| | - | • | - | • | - | • |

Oznaczenia: • – metoda przydatna, o – metoda częściowo przydatna, - – metoda nieprzydatna, nd – nie dotyczy

W tabeli 1 za [11] podano klasyfikację wymienionych wyżej imperfekcji, geometrycznej i materiałowych, podając pojęcia dotyczące ich opisu w dostępnych jednostronnie konstrukcjach z betonu badanych wymienionymi wcześniej nowoczesnymi nieniszczącymi metodami akustycznymi i z przyporządkowaniem metod przydatnych do ich badania.

Z kolei w tabeli 2, na przykładzie imperfekcji materiałowej

– delaminacji objaśniono zaproponowane pojęcia doprecyzowujące na podstawie przeprowadzonych badań opis tych imperfekcji, a mianowicie: identyfikację, lokalizację, rozległość, intensywność.

Tab. 2. Przykładowe objaśnienie zaproponowanych pojęć dotyczących opisu imperfekcji materiałowej – delaminacji płyty włókno-cementowej badanej metodami nieniszczącymi.

Tab. 2. Explanation of proposed terms for describing geometric imperfection in unilaterally accessible concrete structures tested by means of non-destructive acoustic methods.

| Opis imperfekcji | Ilustracja opisu imperfekcji | |
|--|------------------------------|----------|
| | Widok | Przekrój |
| 1. Identyfikacja Rozpoznanie, stwierdzenie, że występuje imperfekcja - delaminacja płyty | | |
| 2. Lokalizacja Określenie położenia imperfekcji w przekroju płyty z dokładnością na jaką pozwala zastosowana aparatura | | |
| 3. Rozległość Określenie wielkości obszaru występowania imperfekcji - pole pow., objętość, - z dokładnością na jaką pozwala aparatura | | |
| 4. Intensywność Określenie zaawansowania imperfekcji - rozkład delaminacji w rozumieniu lokalnym, ale na całym obszarze | | |

Tab. 3. Opis wybranych metod badawczych [1-3, 6-10, 12].

Tab. 3. Description of selected research methods [1-3, 6-10, 12].

| Metoda | Zestaw badawczy | Przykładowe wyniki | Zasada działania | Zakres częstotliwości pracy i głębokość pomiaru |
|---|-----------------|--------------------|---|---|
| Metoda ultradźwiękowa [1] | | | Pomiar czasu rozchodzenia się fali podłużnej w ośrodku. Zestaw badawczy składa się z miernika oraz z dwóch przetworników: nadajnika i odbiornika. Nadajnik wysyła sygnał – falę podłużną – która propaguje się przez badany element betonowy i jest odbierana w odległości L, przez odbiornik. | Głowice walcowe: 25-100 kHz 50-3000 mm |
| Metoda odpowiedzi na impuls [3, 7, 8, 10] | | | Wykorzystuje się impuls wytworzony za pomocą gumowego młotka, jako źródła fal sprężystych rozchodzących się w badanym elemencie. Uderzenie wprowadzania element w wibracje, podczas gdy specjalny przetwornik (geofon) znajdujący się w pobliżu miejsca uderzenia, mierzy amplitudę drgań. | 0-800kHz 100-500 mm |
| Metoda echa [2] | | | Mierzy się czas przejścia fal sprężystych, które ulegają odbiciu od wady lub powierzchni ograniczających wewnątrz elementu | 20-300 kHz 25-400 mm |
| Metoda młoteczkowa [2, 3, 7, 8, 10] | | | Wykorzystuje się zjawisko propagacji fal mechanicznych. Fala wzbudzana jest uderzeniem metalowej kulki w powierzchnię badanego obiektu. Po uderzeniu energia rozchodzi się przestrzennie w obiekcie w postaci fal mechanicznych. Odbite fale są rejestrowane za pomocą piezoelektrycznego przetwornika. | 2-40 kHz 10-800 mm |
| Metoda tomografii ultradźwiękowej [9, 12] | | | Tomografia opiera się na propagacji fali sprężystej w badanym ośrodku. Źródłem wzbudzenia jest zwykle antena wielogłowicowa składająca się z 48 przetworników, która odbiera i przetwarza sygnały ultradźwiękowe. | 50-200 kHz 25-2500 mm |

3. Wybrane nieniszczące metody badawcze

Z tabeli 1 można wywnioskować, że szczególnie przydatne w rozwiązywaniu problemów związanych z badaniami imperfekcji w dostępnych jednostronnie konstrukcjach z betonu takich jak: nieprawidłowa grubość konstrukcji, delaminacja na styku warstw betonowych, duże pustki powietrzne, strefy makro-niejednorodności betonu, rysy, są metody tomografii ultradźwiękowej i impact-echo. W tabeli 3 przedstawiono opis wybranych metod badawczych. Z kolei w tabeli 4 zamieszczono porównanie metod pod względem wybranych czterech kryteriów: komfort użycia zestawu badawczego, różnorodność zastosowania, sposób prezentacji wyników, wady metody. Należy zwrócić uwagę, że nadal szuka się nowych metod badawczych, które umożliwiają pozyskanie większej ilości danych z badań, a co za tym idzie dokładniejszą analizę konstrukcji budowlanych.

4. Podsumowanie

Z przedstawionego w artykule przeglądu literaturowego, a także na podstawie własnych doświadczeń można stwierdzić, że obecnie poszukiwane są nieniszczące metody badawcze, które będą przydatne w diagnostyce obiektów budowlanych. W szczególności dotyczy to możliwości wykrywania wykonanych z betonu elementach i konstrukcjach różnego rodzaju wad i defektów (imperfekcji). Istotne miejsce zajmują w tym względzie metody zaliczane do akustycznych.

Podobnie jak w medycynie istnieje potrzeba konstruowania aparatury badawczej umożliwiającej otrzymywanie obrazu

Tab. 4. Porównanie metod pod względem wybranych czterech kryteriów [6].

Tab. 4. Comparison of methods in terms of selected four criteria [6].

| Metoda | Komfort użycia zestawu badawczego | Różnorodność zastosowania | Sposób prezentacji wyników | Wady metody |
|-----------------------------------|--|--|---|--|
| Metoda ultradźwiękowa | Potrzebny środek sprzęgający przy głowicach walcowych; małe i lekkie urządzenie, prosty sposób przeprowadzania badania | Ocena: wytrzymałości betonu, modułu sprężystości, jednorodności, detekcja rys i ubytków, głębokości rys, kontrola jakości betonu | Wyświetlenie czasu przejścia na ekranie miernika | Wpływ właściwości betonu na wynik, problematyczna interpretacja wyników, w przypadku głowic punktowych krótki zasięg pomiaru |
| Metoda odpowiedzi na impuls | Badanie dużych powierzchni w krótkim czasie; powierzchnia w dowolnym stanie wilgotności | Ocena: jednorodności betonu; lokalizacja stref podejrzanych o występowanie defektów | Wykresy amplitudy w funkcji częstotliwości, parametry charakterystyczne, mapy rozkładu wartości charakterystycznych | Problematyczna interpretacja wyników; nie daje żadnych informacji o głębokości wykrytych defektów, niska dokładność |
| Metoda echa | Natychmiastowe rezultaty; wystarczający jednostronny dostęp do przeprowadzenia badania; małe urządzenia | Pomiar grubości konstrukcji; wykrywanie wtrąceń, raków, porów, rozsegregowania betonu, rys i innych defektów | A-skan - punktowy pomiar w funkcji czasu | Liniowy defekt zorientowany równoległe do sygnału może zostać nie zauważony, problematyczna interpretacja A-skanu |
| Metoda młoteczkowa | Małe i lekkie urządzenie; czasochłonne badanie | Wykrywanie defektów: rozwarstwienia, raki, pory, rozsegregowanie kruszywa, rysy, pęknięcia, delaminacje | Wykres amplitudy w funkcji częstotliwości | Defekty o rozmiarze podobnym lub większym niż długość fali nie będą zlokalizowane; potrzeba dokładnego przygotowania powierzchni |
| Metoda tomografii ultradźwiękowej | Komfort użycia, czasochłonne badanie | Detekcja defektów, pomiar grubości obiektu przy dostępie jednostronnym | Przejrzyste wizualizacje: widok z góry, przekrój poprzeczny i podłużny, obraz 3D | Tomogramy często muszą być interpretowane z wykorzystaniem dodatkowych informacji |

“wnętrza” i struktury badanego elementu, wykorzystując przy tym oprogramowanie zbudowane ze złożonych modeli matematycznych i sztucznej inteligencji. Ma to na celu umożliwienie bardziej zaawansowanej analizy zarejestrowanych w trakcie badań rezultatów.

W celu uproszczenia i zautomatyzowania powtarzalnych badań prowadzonych na dużych elementach konstrukcyjnych i obiektach budowlanych budowane są skanery i roboty wyposażone w aparaturę umożliwiającą kompilację kilku metod badawczych stosowanych równocześnie.

5. Literatura/References

- [1] „CMH Ltd - Distributors of Testing Equipment and Labware.” [Online]. Dostępne na: <http://www.cmh-test.co.uk/>. [Udostępniono: 15-sie-2015].
- [2] Ł. Drobiec, J. Jasiński, i A. Piekarczyk, „Metody lokalizacji wad konstrukcji betonowych-metoda młoteczkowa. Cz. 2”, *Przegląd Bud.*, t. 78, ss. 37–42, 2007.
- [3] T. Gorzelańczyk; J. Hoła J.; Ł. Sadowski, K. Schabowicz, “Methodology of nondestructive identification of defective concrete zones in unilaterally accessible massive members”, *Journal of Civil Engineering and Management*, 2013, Vol. 19, No. 6, ss. 775-786.
- [4] J. Hoła; K. Schabowicz, „Nieniszcząca diagnostyka obiektów budowlanych: przegląd wybranych najnowszych metod z przykładami zastosowań”, 56 Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB, Kielce-Krynica, 2010.
- [5] J. Hoła, K. Schabowicz, “State-of-the-art non-destructive methods for diagnostic testing of building structures - anticipated development trends”, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2010, Vol. X, Nr 3, pp. 5-18.
- [6] D. Jawor, Ł. Radzik, K. Schabowicz, “ Analysis of contemporary non-destructive acoustic methods for concrete testing at the construction site”, *Defektoskopie* 2015, pp. 39-46.
- [7] V. M. Malhotra, N. J. Carino, “Handbook on Nondestructive Testing of Concrete”. CRC Press, 2004.
- [8] K. Schabowicz, J. Hoła, “Nondestructive elastic-wave tests of foundation slab in office building”, *Materials Transactions*, 2012, Vol. 53, pp. 296-302.
- [9] K. Schabowicz, V. Suvorov, “Nondestructive testing of a bottom surface and construction of its profile by ultrasonic tomography”, *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2014, Vol. 50, No. 2, pp. 109-119.
- [10] K. Schabowicz, “Methodology for non-destructive identification of thickness of unilaterally accessible concrete elements by means of state-of-the-art acoustic techniques”, *Journal of Civil Engineering and Management*, 2013, Vol. 19, No. 3, pp. 325-334.
- [11] K. Schabowicz; “Modern acoustic techniques for testing concrete structures accessible from one side only”, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, DOI: 10.1016/j.acme.2014.10.001.
- [12] K. Schabowicz; Ultrasonic tomography – the latest nondestructive technique for testing concrete members – description, test methodology, application example, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2014, Vol. 14, No. 2, pp. 295-303.