

Metody lokalizacji wad konstrukcji betonowych – metoda ultradźwiękowa (cz. I)

Dr inż. Łukasz Drobiec, dr inż. Radosław Jasiński, dr inż. Adam Piekarczyk,
Politechnika Śląska, Gliwice

Impulsowe nieniszczące metody badań konstrukcji, wraz z rozwojem technik pomiarowych i doskonalszej aparatury, stają się coraz powszechniejszym i dostępniejszym narzędziem w diagnostyce elementów betonowych. W niniejszym opracowaniu przedstawiono podstawy teoretyczne oraz omówiono przykłady lokalizacji wad konstrukcji betonowych przy zastosowaniu jednej z impulsowych metod badawczych, a mianowicie metody ultradźwiękowej.

1. Wprowadzenie

Metody i techniki nieniszczących badań diagnostycznych, stosowanych w budownictwie, służą głównie do wykrywania nieciągłości struktury materiałów, ich właściwości, określania wymiarów elementów oraz lokalizacji położenia zbrojenia, identyfikacji jego średnicy i grubości otulenia betonem, bez zmian właściwości użytkowych badanej konstrukcji.

Najczęściej stosowanymi metodami nieniszczącymi są badania sklerometryczne, impulsowe (ultradźwiękowe i młoteczkowe) oraz radiologiczne i elektromagnetyczne metody określania położenia zbrojenia w elementach żelbetowych.

Badania diagnostyczne metodami sklerometrycznymi są znane powszechnie i szeroko opisywane [1], [2], [3], [4], [5], dlatego nie będą tutaj omawiane. Metody impulsowe (ultradźwiękowe i młoteczkowe) wykorzystuje się najczęściej do lokalizacji wad i nieciągłości struktury konstrukcji [6], [7], [8], [9] jednostronnego pomiaru grubości [10] oraz szacowania wytrzyma-

łości, jednorodności i ciężaru objętościowego betonu [8], [11], [12], [13]. W metodzie ultradźwiękowej do oceny parametrów diagnozowanej konstrukcji bazuje się na pomiarach prędkości fal ultradźwiękowych, zaś w przypadku metody młoteczkowej analizuje się uzyskane spektra częstotliwościowe.

W pierwszej części prezentacji metod lokalizacji wad w konstrukcjach żelbetowych skupiono się na ogólnym omówieniu podstaw metody i przykładów badań wad strukturalnych i jednostronnego pomiaru grubości elementów betonowych prowadzonych metodą ultradźwiękową.

2. Podstawy metody ultradźwiękowej

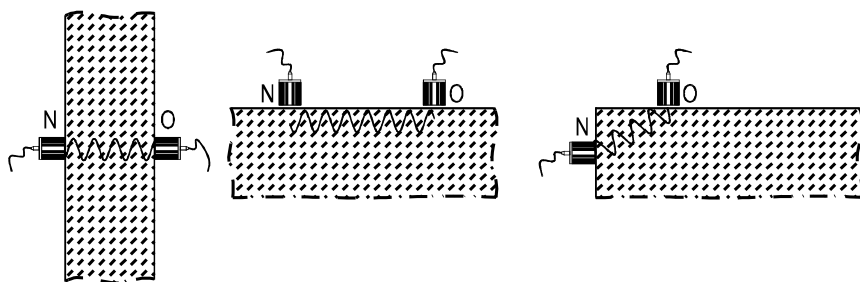
Ultradźwięki to drgania mechaniczne o częstotliwości większej od granicy słyszalności ucha ludzkiego, to jest >20 kHz, które mogą się rozchodzić w ośrodkach gazowych, ciekłych i stałych. Ultradźwięki, podobnie jak fale świetlne, rozchodzą się w postaci wiązek, ulegają odbiciu, załamaniu i ugięciu. W badaniach betonu stosuje się fale ultradźwiękowe o częstotliwościach od 30 kHz do około 500 kHz, rzadziej do 1 MHz. Im wyższa jest częstotliwość drgań, tym dokładniejszy jest pomiar, lecz mniejsza energia impulsu i większe jego tłumienie. Stosuje się zatem fale o możliwie największej częstotliwości drgań, takie jednak, aby po przejściu przez badany element możliwe było odebranie jeszcze wyraźnego sygnału o dostatecznej energii. W wypadku konstrukcji masywnych lub wykonanych z gor-

szych betonów, bardziej rozpraszających energię fal, wykorzystuje się niższe częstotliwości impulsów.

Podstawy metody ultradźwiękowej opierają się na fizycznym związku pomiędzy prędkością fali ultradźwiękowej C_f w danym ośrodku a właściwościami tego ośrodka [2], [14], [16]. Wszystkie ośrodki charakteryzują się sprężystością objętościową. Mogą się w nich rozchodzić fale podłużne L, czyli lokalne rozrzedzenia i zgęszczenia, o prędkości C_L . Ciała stałe, w odróżnieniu od gazów i cieczy, mają również sprężystość postaciową. W związku z tym w ciałach stałych i cieczach o dużej lepkości rozchodzą się również fale poprzeczne T o prędkości C_T , gdzie przemieszczenia ośrodka odbywają się w kierunku prostopadłym do kierunku propagacji fal.

Na styku ciała stałego i powietrza prawie cała energia fali ulega odbiciu i nie dochodzi do zjawiska refrakcji (załamania). W przypadku styku dwóch ciał stałych fala zostaje w części odbita i w części załamana. Amplitudy fal odbitych i załamanych zależą od wartości akustycznej oporności falowej poszczególnych warstw.

Badania ultradźwiękowe betonu prowadzi się zgodnie z instrukcją [16] i normą [17]. Do pomiaru czasu rozchodzenia się fal używa się przyrządów pozwalających na precyzyjny pomiar prędkości ultradźwięków zwanych defektoskopami. W przypadku badań betonu urządzenia te noszą nazwę betonoskopów. Przyrządy te powinny wytwarzać impulsy powtarzane okresowo i emitować fale podłużne, umożliwiając pomiary głowi-



Rys. 1. Pomiar ultradźwiękowy z głowicami ułożonymi: a) przeciwległe, b) równoległe, c) ukośnie

camy w przedziale częstotliwości od 30 do 500 kHz oraz dokonywać pomiaru prędkości fali ultradźwiękowej w betonie z dokładnością $\pm 2,5\%$.

Prędkość propagacji impulsu ultradźwiękowego w betonie bada się przez wprowadzenie do niego fali i pomiar czasu przejścia między głowicą nadawczą i odbiorczą. Znajomość czasu przejścia impulsu i drogi jaką przebył, umożliwia wyznaczenie prędkości rozchodzenia się fal podłużnych. Wynik pomiaru w postaci czasu przejścia wyświetlany jest na generatorze zegarowym. Głowice (nadawcza i odbiorcza) umieszczone mogą być względem siebie w sposób przeciwległy, ukośny lub równoległy (powierzchniowy) – rysunek 1. Brak współosiowości głowic w wypadku prowadzenia badań przy ich przeciwległym ustawieniu (rys. 1a) może być przyczyną niedokładności szacowania prędkości propagacji ultradźwięków ze względu na ukośny kierunek transmisji w odniesieniu do osi obu głowic. Odchylenie wiązki fal o pewien kąt powoduje jej osłabienie i deformację impulsu rejestrowanego przez głowicę odbiorczą, co oczywiście ma istotny wpływ na pomiar prędkości fal. W przypadku stosowania głowic płaskich występują także pewne trudności w określeniu drogi przebywanej przez impulsy. Jest to bowiem odcinek inny, niż wynikałoby to z odległości pomiędzy osiami głowic.

Przy równoległym układzie głowic (rys. 1b) prędkość ultradźwięków wyznaczona przy małej odległości między głowicami jest znacznie

wyższa od określonej przy ustawieniu przeciwległym. Przy pewnym rozstawie głowic osiąga się wartość zbliżoną do prędkości uzyskiwanej przy przeciwległym układzie głowicy nadawczej i odbiorczej.

W celu uniknięcia dużych strat energii impulsu ultradźwiękowego na skutek odbicia, głowice sprzęga się z badanym materiałem za pomocą środka sprzęgającego, jak np. towot, kit trwale plastyczny, szare mydło, plastelina, gliceryna itp.

W betonach konstrukcyjnych prędkość fal podłużnych zależy od struktury i rodzaju materiałów składowych. W przypadku betonów jamistych (niezagęszczonych) i betonów komórkowych, prędkość propagacji fal, jak podano w pracy [8], zależy malejąco od porowatości betonu i może osiągnąć wartość dwukrotnie mniejszą od uzyskiwanej w betonie zwartym.

Prędkość rozchodzenia się ultradźwięków w betonie zależy także od jego wilgotności, naprężeń oraz w mniejszym stopniu, od temperatury. W betonie wilgotnym propagacja fal jest szybsza. W przypadku betonu mokrego o porowatości 20% wzrost ten może sięgać 750 m/s. Naprężenia w betonie mniejsze od 40% wytrzymałości na ściskanie lub rozciąganie nie wywołują istotnych zmian prędkości propagacji fal. Przy wyższych wartościach naprężeń, inicjujących mikrorysy, dochodzi do kilkuprocentowego spadku prędkości propagacji drgań i kilkudziesięcioprocentowego wzrostu tłumienia. Wpływ temperatury betonu na prędkość i tłumienie fal ultradźwiękowych w normalnych warunkach

eksploatacyjnych jest nieznaczny, z wyjątkiem zamarzania.

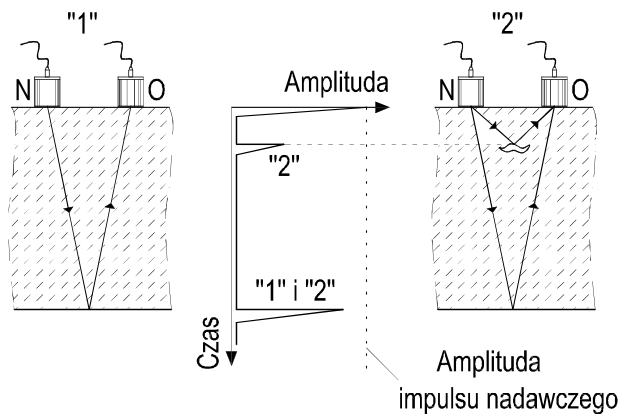
Pręty zbrojeniowe w konstrukcjach żelbetowych stanowią liniową niejednorodność ośrodka i zmieniają jego właściwości akustyczne, co prowadzi do zakłóceń propagacji fal. Autor prac [8] i [18] wykazał na drodze eksperymentu, że prędkości fal różnią się istotnie w swobodnym pręcie stalowym, niezbrojonym betonie i w ośrodku zbudowanym z tych materiałów zespolonych ze sobą akustycznie. Prędkość ultradźwięków w pręcie zabetonowanym jest niższa niż w pręcie swobodnym i większa niż w betonie niezbrojonym. W pewnej odległości od prętów zbrojeniowych prędkość maleje i w pewnym oddaleniu, uzależnionym od średnicy zbrojenia, stabilizuje się na poziomie prędkości propagacji fal w betonie niezbrojonym.

Sondowanie ultradźwiękowe elementów żelbetowych umożliwia wyznaczenie izolinii prędkości rozchodzenia się fal i uzyskanie ultrasonograficznego przekroju poprzecznego elementu. Tego typu badania mogą zostać wykorzystane do lokalizacji zbrojenia w przekroju, a gradient zmian prędkości (zagęszczenie izolinii prędkości) umożliwia oszacowanie średnicy zbrojenia [8].

Metoda ultradźwiękowa umożliwia, w zależności od stosowanych rodzajów fal, wykrywanie przede wszystkim wewnętrznych, ale także powierzchniowych i podpowierzchniowych nieciągłości struktury elementów.

Przy wykrywaniu i lokalizacji wad strukturalnych obiektów, z wykorzystaniem defektoskopii ultradźwiękowej, stosuje się trzy metody:

1. **metodę echa** (większość zastosowań) związaną z odbiciem fal od powierzchni obiektów,
2. **metodę przepuszczania** (cienia) opartą na efekcie przystania wiązki fal przez nieciągłości,
3. **metodę TOFD** (time-of-flight diffraction) wykorzystującą zjawisko dyfrakcyjnego ugięcia i rozpraszania fal na poprzecznych, w sto-



Rys. 2. Przebieg podłużnej fali ultradźwiękowej i sygnały obserwowane na ekranie defektoskopu przy wykorzystaniu metody echa

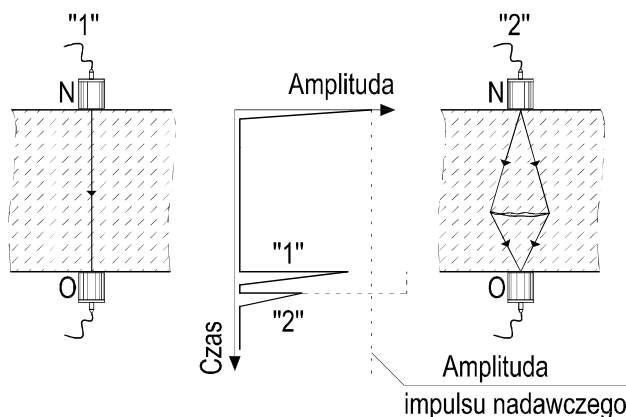
sunku do kierunku przebiegu fal, krawędziach nieciągłości.

W badaniach mogą być łączone różne metody badań ultradźwiękowych. W systemie TOFD stosuje się metodę przepuszczania połączoną ze zjawiskiem odbicia fal ultradźwiękowych, które występuje wtedy, gdy fala pada na granicę ośrodków o różnej impedancji akustycznej.

Metoda echa wymaga jedynie jednostronnego dostępu do badanego obiektu. Na rysunku 2 pokazano zasadę prowadzenia badań metodą echa. Kiedy badania dokonuje się w obszarach elementu pozbawionego wewnętrznych defektów – pozycja „1” na rysunku 2, wówczas na ekranie defektoskopu obserwuje się echo pochodzące od fal odbitych od dna obiektu. W przypadku, gdy wewnątrz badanej konstrukcji występuje nieciągłość strukturalna nieprzystająca całkowicie wiązki fal ultradźwiękowych – pozycja „2”

na rysunku 2, wtedy na ekranie urządzenia pomiarowego zauważyć można dodatkowo echo wynikające z odbicia się ultradźwięków od nieciągłości, a w zasadzie od powietrza, które ją wypełnia. Informacją o występowaniu wady struktury betonu będzie jej echo, które pojawi się między impulsem początkowym, a echem dna elementu. Położenie echa nieciągłości wzdłuż osi czasu zawiera informację o głębokości jej położenia. Lokalizacja nieciągłości wiąże się z pomiarem czasu przejścia fali w badanym materiale. Na wartość amplitudy echa wady betonu wpływ ma rodzaj i kształt nieciągłości, pole jej powierzchni, orientacja względem kierunku wprowadzanej wiązki fal, odległość od głowicy oraz właściwości sprężyste, jednorodność i anizotropia betonu.

Metodę przepuszczania, zwanej również metodą cienia, używa się

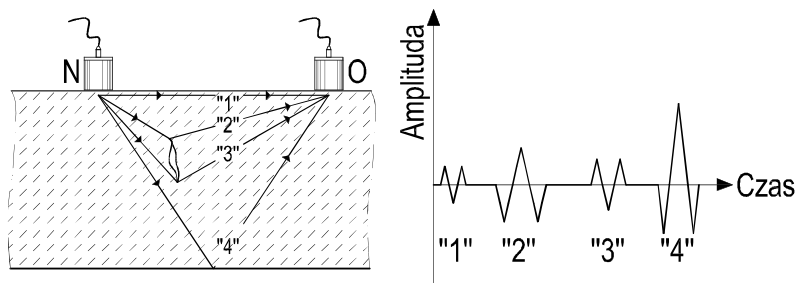


Rys. 3. Nieciągłość obiektu, przebieg fali ultradźwiękowej i sygnały obserwowane na ekranie defektoskopu przy wykorzystaniu metody przepuszczania

do wykrywania nieciągłości położonych blisko powierzchni badanych, kiedy możliwy jest dwustronny dostęp do konstrukcji. Na rysunku 3 przedstawiono zasadę prowadzenia badań metodą przepuszczania. W tej metodzie głowicę nadawczą i odbiorczą umieszcza się na przeciwległych powierzchniach badanego obiektu naprzeciwko siebie. Sygnał, który obserwuje się na ekranie urządzenia badawczego, stanowi impuls fali przechodzącej przez obiekt zarejestrowany przez głowicę odbiorczą. Jeżeli na drodze fali ultradźwiękowej znajduje się nieciągłość (położenie „2” na rysunku 3), wtedy odebrany impuls ma mniejszą amplitudę i dobiega do głowicy nieco później niż w przypadku, gdy fala przebiega przez materiał bez wewnętrznych defektów. O występowaniu nieciągłości betonu świadczy wówczas osłabienie energii fali docierającej do odbiornika oraz dłuższy czas przejścia przez badany obiekt. Osłabienie energii zależy od wymiarów i położenia wady względem głowic. Większy spadek energii fali nastąpi, kiedy nieciągłość będzie znajdowała się bliżej głowicy nadawczej i co z tym związane, przysłaniać będzie większą część padającej na nią wiązki ultradźwiękowej. Szacowanie wymiarów wad struktury betonu wykrytych metodą przepuszczania opiera się na analizie amplitudy i szerokości obwiedni odebranego impulsu.

Metodę TOFD, bazującą na pomiarze czasu przejścia fal dyfrakcyjnych, stosuje się głównie do badań jakości połączeń przerobowych oraz widocznych na powierzchniach obiektów rys. Wykorzystuje się tutaj zjawisko dyfrakcji fal ultradźwiękowych na krawędziach nieciągłości płaskich oraz zjawisko odbicia. Metodą tą wykrywane mogą być dowolnie zorientowane płaskie (pęknięcia) i objętościowe (pustki) wady betonu.

W przypadku nieciągłości zorientowanych poprzecznie, ugięcie fal następuje zarówno na ich gór-



Rys. 4. Sygnały obserwowane przy wykorzystaniu metody TOFD

nych, jak i dolnych krawędziach. Pęknięcia poziome, np. rozwarstwienia, wywołują odbicie fal. Nieciągłości objętościowe powodują odbicie części wiązki fal od ich górnych powierzchni. Natomiast część wiązki obiega dolną powierzchnię pustki, tracąc swoją energię.

W metodzie TOFD głowice umieszcza się w ustawieniu równoległym po obu stronach badanego obszaru, czyli np. widocznej na powierzchni rysy. Ideę metody pokazano na rysunku 4.

Między głowicą nadawczą i odbiorczą przebiega fala podłużna podpowierzchniowa „1”. Dyfrakcja ultradźwięków na krawędziach nieciągłości prowadzi do powstania fal ugiętych „2” i „3”. Impulsy te docierają do głowicy odbiorczej w czasie pomiędzy rejestracją fali podpowierzchniowej i fali odbitej od dna elementu „4”.

Analiza wyników badań metodą TOFD polega na wykorzystaniu, oprócz informacji wynikających ze zmierzonych amplitud, informacji o fazie zarejestrowanych fal ultradźwiękowych. Impuls „4” odbity na granicy z ośrodkiem o znacznie mniejszej akustycznej oporności falowej oraz impuls fali ugiętej „2” mają fazę różną o 180° w stosunku do fali „1” i impulsu ugiętego na dolnej krawędzi wady betonu. Analiza faz fal ugiętych może zatem dostarczać informacji o rodzaju wykrytej nieciągłości.

W pracy [8] przedstawiono badania wykorzystujące efekt dyfrakcji fal ultradźwiękowych do szacowania głębokości rys w betonie, co ważne, również z uwzględnieniem prę-

tów zbrojeniowych, które stanowią element ciągłości ośrodka, mimo występujących zarysowań. Pręty zbrojeniowe są miejscem punktowej dyfrakcji i stanowią swego rodzaju „most”, po którym fale ultradźwiękowe krótszą drogą i z większą prędkością docierają do głowicy odbiorczej. Zjawisko to uniemożliwia bezpośrednią rejestrację fal ugiętych na krawędzi zarysowań. Możliwe jest jednak odfiltrowanie tego efektu dzięki przeprowadzeniu dodatkowego pomiaru impulsu przechodzącego tylko wzdłuż zbrojenia, w strefie gdzie nie występują zarysowania przy symetrycznym względem rysy układzie głowic lub wykonanie podwójnej rejestracji sygnału przy niesymetrycznym rozmieszczeniu głowic, lecz przy odwróconym kierunku transmisji fal w każdym przypadku.

3. Aparatura badawcza

Rozwój defektoskopii trwa w Polsce od 1950 roku i stał się przyczynkiem do produkcji defektoskopów wykorzystywanych do badań betonu i stali [19].



Rys. 5. Betonoskop cyfrowy [M-3], a) widok zestawu, b) badanie konstrukcji

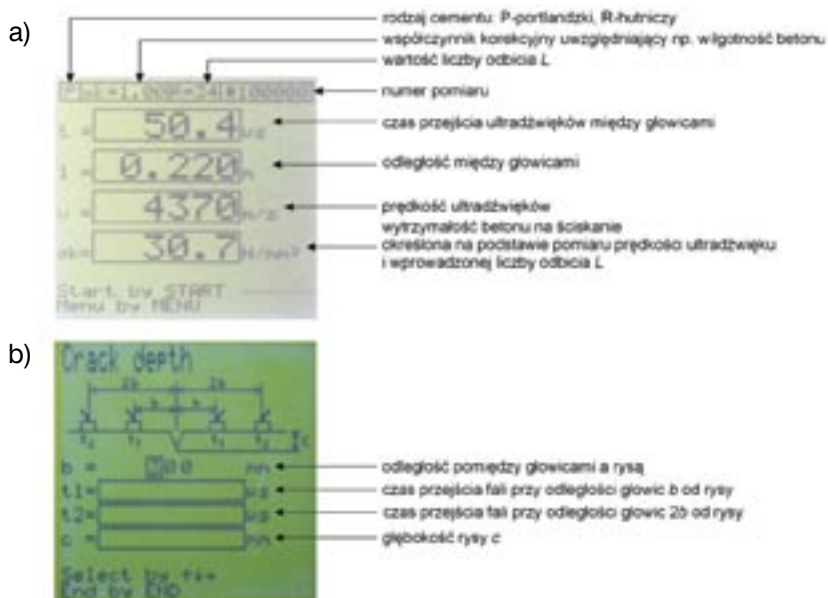
W większości urządzeń służących do badań defektoskopowych betonu (betonoskopach) wykorzystuje się tzw. zobrazowanie typu A, polegające na przedstawieniu sygnałów po detekcji, gdzie prezentowane są echa zawierające informacje o wielkości nieciągłości, a zmierzony czas przejścia dostarcza informacji o odległości wady betonu od powierzchni badanego obiektu. Pomiaru czasu przejścia impulsu dokonuje się z dokładnością mikrosekundową. Bardziej skomplikowane jest szacowanie wielkości nieciągłości, które wiąże się z doбором odpowiednich parametrów wiązki ultradźwiękowej i określeniem jej dyfrakcji.

Defektoskopy można podzielić na dwie zasadnicze grupy:

Defektoskopy analogowe – ocena wymiarów nieciągłości obiektów oparta jest na porównaniu amplitudy i echa z echemi otrzymanymi od określonych reflektorów wzorcowych. Defektoskopy takie umożliwiają wykonanie badań metod echa i przepuszczania oraz pracę z jedną głowicą pojedynczą, dwoma pojedynczymi lub z głowicą podwójną.

Defektoskopy cyfrowe – różnią się od defektoskopów analogowych głównie sposobem zobrazowania sygnału.

Rozwój techniki spowodował znaczną miniaturyzację urządzeń pomiarowych, miejsce nieporęcznych urządzeń analogowych coraz częściej zajmują cyfrowe (rys. 5) aparaty „walizkowe”, pozwalające na badania trudnodostępnych fragmentów konstrukcji.



Rys. 6. Prezentacja wyników na ciekłokrystalicznym wyświetlaczu betonoskopu cyfrowego [M-3], a) pomiar prędkości rozchodzenia się ultradźwięków, b) pomiar głębokości rysy

Cyfrowy sposób analizy i zapisu uzyskanych wyników badań znacznie skraca czas prowadzenia pomiarów, a stosowne oprogramowanie daje możliwości natychmiastowego określenia następujących wielkości:

– wytrzymałości betonu na ściskanie, pod warunkiem wprowadzenia określonej na podstawie pomiarów

młotkiem Schmidta liczby odbicia L (rys. 6a),

– głębokości rysy c na podstawie pomiaru czasu przejścia fali załamanej krawędzi rysy (rys. 6b).

Zasadniczymi częściami, które stanowią wyposażenie defektoskopów (betonoskopów) są głowice ultradźwiękowe, które służą do wprowadzania fal ultradźwiękowych do badanych obiektów oraz odbioru tych fal. Głowice ultradźwiękowe można podzielić na:

– normalne – służą do wykrywania płaskich i przestrzennych nieciągłości wewnętrznych, określania grubości elementów, pomiarów tłumienia fal ultradźwiękowych i prędkości ich rozchodzenia się,

– podwójne – są przydatne przy wykrywaniu nieciągłości znajdujących się blisko powierzchni badanego obiektu oraz przy pomiarze małych grubości elementów,

– wieloprzetwornikowe.

Głowice pojedyncze zawierają jeden przetwornik ultradźwiękowy. W przypadku stosowania głowic pojedynczych, w badaniach metodą echa, ten sam przetwornik służy jako źródło oraz odbiornik fal ultradźwiękowych. W badaniach prowadzonych metodą przepuszczania, jedna głowica, z jednym przetwornikiem

stanowi źródło fal ultradźwiękowych, natomiast druga odbiornik.

Głowice podwójne posiadają dwa przetworniki ultradźwiękowe, nadawczy oraz odbiorczy i pracują w metodzie echa.

Głowice ultradźwiękowe zawierają przetworniki [15]:

– piezoelektryczne (najczęściej stosowane):

- normalne fal podłużnych – służą do wprowadzania do obiektu fal ultradźwiękowych pod kątem 90° w stosunku do powierzchni materiału,

- podwójne fal podłużnych – stosowane do wprowadzania do obiektu fal pod kątem 90° lub mniejszym, w stosunku do powierzchni materiału,

- skośne fal poprzecznych – służą do wprowadzania do obiektu fal ultradźwiękowych pod różnymi kątami w stosunku do powierzchni materiału,

- fal powierzchniowych – wykorzystywane do generowania fal rozchodzących się w warstwie powierzchniowej o grubości równej długości fal;

– elektromagnetyczno-akustyczne (EMAT);

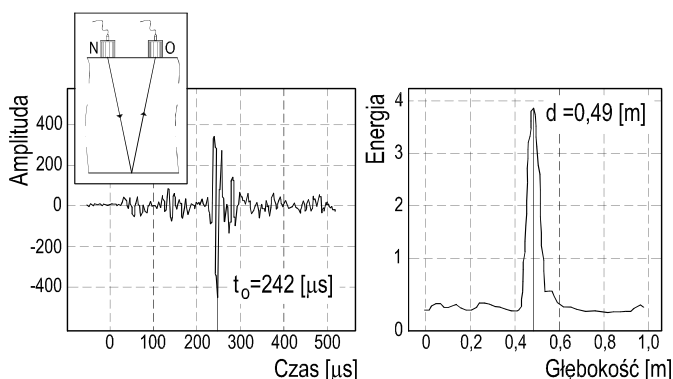
– magnetostrykcyjne;

– laserowe.

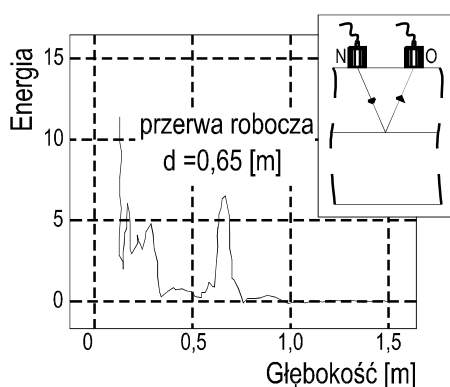
Głowice mogą mieć kształt walcowy (rys. 7a), ale mogą być także wyposażone w koncentratory eksponencyjne i stożkowe (rys. 7b), które pozwalają na badanie powierzchni chropowatych lub gdy wykorzystywana jest metoda echa przy dostępie jednostronnym [20]. Głowice tego typu mogą również służyć do precyzyjnego (punktowego) określania wytrzymałości i jednorodności betonu [21]. W celu ułatwienia przesuwu głowicy po betonie używa się głowic z ruchomymi rolkami (7c). Pomiar prędkości propagacji ultradźwięków w betonie wymaga doboru odpowiedniej częstotliwości głowicy. Należy kierować się zasadą, że proporcje między długością fali a wymiarami badanego obiektu powinny być takie, aby badany ośrodek można uznać za nieograniczony.



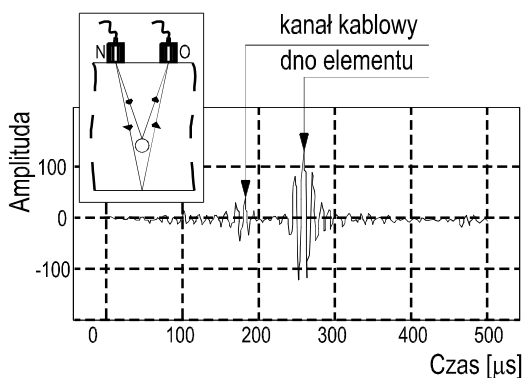
Rys. 7. Przykłady współpracujących z betonoskopami głowic: a) walcowych [M-1], b) z koncentratorami [M-2], c) rolkowych [M-2]



Rys. 8. Badania grubości elementu betonowego przy dostępie jednostronnym: a) amplituda odebranego sygnału, b) energia sygnału [11]



Rys. 9. Badania stanu przerwy roboczej w płycie fundamentowej [11]



Rys. 10. Badania elementów kablobetonowych [11]

4. Wybrane przykłady zastosowania badań betonu defektoskopami ultradźwiękowymi

4.1. Badania grubości i rozwarstwienia płyt

Badania elementów betonowych o nominalnej grubości 50 cm przy dostępie jednostronnym i z wykorzystaniem głowic ultradźwiękowych niskich częstotliwości (od 30 do 400 kHz) opisano w pracy [11]. Do pomiaru grubości użyto metody echa, gdzie dwie głowice (nadawczą i odbiorczą) umieszczono na dostępnej powierzchni konstrukcji w rozstawie od 150 do 300 mm. Na rysunku 8 pokazano amplitudę odebranego sygnału przy rozstawie głowic 300 mm.

wych niskich częstotliwości (od 30 do 400 kHz) opisano w pracy [11]. Do pomiaru grubości użyto metody echa, gdzie dwie głowice (nadawczą i odbiorczą) umieszczono na dostępnej powierzchni konstrukcji w rozstawie od 150 do 300 mm. Na rysunku 8 pokazano amplitudę odebranego sygnału przy rozstawie głowic 300 mm.

Uzyskano czas przejścia sygnału $t_0 = 242 \mu s$, co dla ustalonej wcześniej prędkości propagacji ultradźwięków w badanym elemencie i przy znanym rozstawie głowic pozwala na obliczenie grubości konstrukcji wynoszącej $d = 49 \text{ cm}$.

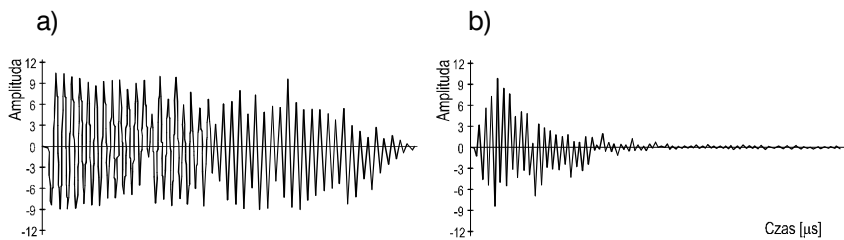
Autorzy wspomnianej pracy [11] przeprowadzili także badania płyty fundamentowej o zakładanej grubości 1,35 m. Celem badań było zbadanie poprawności zespolenia betonu w płaszczyźnie przerwy roboczej w betonowaniu. Na podstawie analizy odebranego sygnału stwierdzono rozwarstwienie betonu na głębokości 65 cm od górnej, dostępnej płaszczyzny płyty (rys. 9). W miejscu, gdzie stwierdzono powstanie rozwarstwienia wykonano kontrolny odwiert, który potwierdził wyniki badań nieniszczących.

4.2. Lokalizacja wad iniekcji kanałów kablowych

Autorzy pracy [11] przeprowadzili również badania, których celem było sprawdzenie przydatności metody echa do wykrywania niewypełnionych iniektem kanałów kablowych. Do badań użyto elementów o grubości 50 cm, w których puste kanały kablowe znajdowały się na głębokości 35 cm. Na zobrazowaniu odebranego sygnału ultradźwiękowego, przedstawionego na rysunku 10, zaobserwować można dwa charakterystyczne ekstrema wartości amplitud. Za ich powstanie odpowiedzialne jest odbicie fali ultradźwiękowej od dna elementu oraz powietrza zawartego w pustym kanale kablowym.

4.3. Badania przyczepności posadzek polimerowych

Pomiaru przyczepności powłok polimerowych do betonowego podkładu dokonuje się najczęściej przy pomocy małoniszczącej metody „pull-off”, która polega na określeniu siły z jaką odrywany jest fragment powłoki. Ze względu na lokalne uszkodzenia posadzek,



Rys. 11. Sygnał rejestrowany przy badaniu posadzki: a) o dużej przyczepności, b) bez przyczepności [6]

liczba miejsc, w których wykonuje się takie badania, jest zwykle ograniczona.

Możliwość wykorzystania metody ultradźwiękowej do szacowania przyczepności powłok zaprezentowano w pracy [6]. Do analizy stopnia zespolenia powłok wykorzystano założenie, że w miejscach o obniżonej przyczepności powłoki do podłoża, sygnał ultradźwiękowy będzie ulegał większemu tłumieniu, co pokazano na rysunku 11.

Do badań użyto betonoskopu z zestawem głowic umieszczonych w rozstawie 80 mm. Częstotliwość generowanych ultradźwięków wynosiła 100 kHz. Propagację fal przez granicę ośrodków posadzka – podkład betonowy określano rozkładem wartości średniokwadratowej MS(t) w dziedzinie czasu opisującym wariancję amplitudy

sygnału i reprezentującym uśrednione tłumienie impulsu fali ultradźwiękowej. W obszarach o mniejszej przyczepności wartości rozkładu średniokwadratowego będą szybciej malały niż w obszarach o dużej przyczepności.

Przeprowadzone badania pozwoliły na określenie zależności pomiędzy wartością MS(t), a przyczepnością różnego rodzaju powłok, co pokazano na rysunku 12.

Rozkład wartości MS(t) określonych dla samego podkładu betonowego (bez powłoki) przebiegał między rozkładami otrzymanymi dla powłok o maksymalnej przyczepności i o przyczepności zerowej. Prędkość ultradźwięków w posadzkach o dużej przyczepności była około 1 k/s wyższa od posadzek bez przyczepności. Badania wykazały, że prędkość fal

w posadzkach bez przyczepności była bliska uzyskanej w próbkach z żywicy epoksydowej, co świadczy o propagacji fal jedynie w warstwie polimeru. W badaniach zaobserwowano ponadto wpływ grubości powłoki i stanu podłoża betonowego (stopnia oczyszczenia, wilgotności, obecności środków gruntujących) na prędkość ultradźwięków.

Omawiana metoda oceny stopnia przyczepności posadzki do podkładu wymaga określania rozkładu średniokwadratowego MS(t), przez co jest pracochłonna. Istnieją znacznie prostsze metody oszacowania przyczepności powłok na zasadzie oceny jakościowej „jest – brak”. Bardzo przydatne z praktycznego punktu widzenia, uogólnienie wyników obserwacji odbieranego sygnału ultradźwiękowego połączenia powłoki z podłożem przedstawiono w pracy [6] i zilustrowano w tabeli 1.

5. Podsumowanie

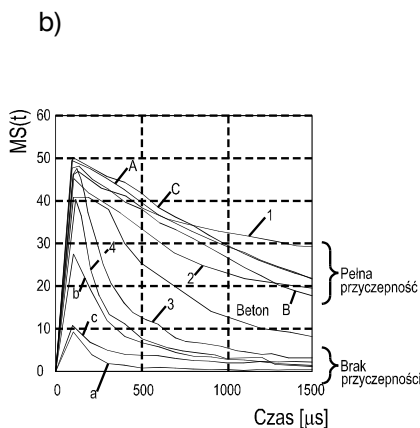
Omówiona metoda ultradźwiękowa jest z powodzeniem stosowana w nieniszczących badaniach diagnostycznych konstrukcji betonowych. Metoda jest stosunkowo prosta i dokładna, choć wymaga pewnego teoretycznego i praktycznego przygotowania oraz doświadczenia niezbędnego do poprawnej analizy uzyskanych wyników badań.

Wraz z szybkim rozwojem aparatury pomiarowej obserwuje się tendencje ukierunkowane na coraz niezawodniejszą i dokładniejszą lokalizację nieciągłości struktury betonu, ich położenia, wymiarów, orientacji i charakteru. Stosuje się lepsze systemy wizualizacji wykrytych wad obiektu z wykorzystaniem dwu-, a nawet trójwymiarowej, rekonstrukcji ich obrazu.

Metod ultradźwiękowych, o czym nie mówiono szczegółowo w niniejszym opracowaniu, używa się także do pośredniego szacowania parametrów betonu takich jak wytrzymałość, jednorodność,

a)

Rodzaj powłoki	Prędkość fali (km/s)	Przyczepność [MPa]	Symbol rys. 10b
Pełna przyczepność			
EP-1	3,94	3,15	A
EP-2	4,10	2,10	B
PUR	4,59	3,20	C
EP*	4,46	3,23	1
PUR**	4,42	2,10	2
Brak przyczepności			
EP-1	2,96	-	a
EP-2	2,79	-	b
PUR	3,06	-	c
EP*	2,63	-	3
PUR**	2,33	-	4
Podkład betonowy: prędkość 4,908 km/s			Beton
gdzie: EP-1 – wodna dyspersja żywicy epoksydowej, EP-2 – żywica epoksydowa, PUR – żywica poliuretanowa, EP* – żywica epoksydowa 3 mm, PUR** – żywica poliuretanowa 3 mm.			



Rys. 12. Wyniki badań przyczepności powłoki polimerowej do betonu: a) prędkość fali ultradźwiękowej i przyczepność, b) rozkład MS(t) w dziedzinie czasu [6]

Tabela 1. Sposoby ultradźwiękowej jakościowej oceny połączenia adhezyjnego powłok [6]

Lp.	Sposób oceny	Schemat pomiaru	Wizualizacja	Interpretacja	
1	Metoda echa	Pomiar od strony powłoki			dobra przyczepność
					słaba przyczepność
					brak przyczepności
	Pomiar od strony podłoża			dobra przyczepność	
				słaba przyczepność	
				brak przyczepności	
2	Metoda cienia			dobra przyczepność	
				słaba przyczepność	
				brak przyczepności	
3	Metoda absorpcji			dobra przyczepność	
				słaba przyczepność	
				brak przyczepności	

czy porowatość. W tych przypadkach niezbędne jest jednak określenie zależności pomiędzy poszukiwanymi cechami betonu, a wartością prędkości i tłumieniem fal ultradźwiękowych. Poszukuje się wciąż nowych zależności i modyfikuje istniejące, co nie jest zadaniem łatwym z uwagi na fakt, że relacje te są inne w betonach różnych typów i uwarunkowane są zwykle wieloma czynnikami.

Coraz częstsze są również próby wykorzystywania badań ultradźwiękowych do wykrywania, lokalizacji i szacowania średnicy stali zbrojeniowej w konstrukcjach żelbetowych.

BIBLIOGRAFIA

[1] Brunarski L., Runkiewicz L., Instrukcja stosowania młotków Schmidta do nieniszczącej kontroli jakości betonu w konstrukcji. Instrukcja ITB Nr 210. ITB, Warszawa 1977
 [2] Runkiewicz L., Diagnostyka i wzmacnia-

nie konstrukcji żelbetowych. Politechnika Świętokrzyska. Materiały Pomocnicze i Informacyjne nr 93. Kielce 1999

[3] Lewicki B., Wiarygodność metod stosowanych w diagnostyce konstrukcji z betonu i murowych. VII Konferencja Naukowo-Techniczna Problemy Rzeczoznawstwa Budowlanego. Cedzyna 13-15 maja 2002
 [4] Brunarski L., Określanie klasy betonu na podstawie diagnostycznych badań konstrukcji. XIII Ogólnopolska Konferencja Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji. Ustroń 26-28 lutego 1998 r. Naprawy i Wzmocnienia Naziemnych Konstrukcji Żelbetowych. Tom I, s. 7-20
 [5] Brunarski L., Określanie wytrzymałości betonu na podstawie diagnostycznych badań konstrukcji. XXI Ogólnopolska Konferencja Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji. Szczyrk 8-11 marca 2006 r. Naprawy i Wzmocnienia Konstrukcji Budowlanych. Konstrukcje Żelbetowe. Tom I, s. 39-54
 [6] Garbacz A., Krystosiak M., Ultradźwiękowa ocena przyczepności między powłoką polimerową a podkładem betonowym. 31 Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących, Szczyrk 2002, s. 125-130
 [7] Joško M., Procedura i dokładność ultradźwiękowej metody oceny stanu połączenie

powłoki z podłożem. 30 Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących, Szczyrk 2001, s. 53-56

[8] Kaszyński J., Ultradźwiękowe badania betonu z uwzględnieniem strefy zbrojenia i zarysowania. Prace Naukowe Politechniki Szczecińskiej. Katedra Konstrukcji Żelbetowych i Technologii Betonu. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 2003
 [9] Drobiec Ł., Jasiński R., Piekarczyk A., Lokalizacja wad konstrukcji i stali zbrojeniowej - metody. XXI Ogólnopolska Konferencja Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji. Szczyrk, 8-11 marca 2006, t. I, s. 133-208
 [10] Krause M., Wiggenhauser H., Ultrasonic pulse echo technique for concrete elements using synthetic aperture. UOnline Application Workshop in May '97
 [11] Stawski B., Zastosowanie metody ultradźwiękowej do badania wytrzymałości betonu na rozciąganie. 31 Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących, Szczyrk 2002, s. 115-118
 [12] Hoła J., Stawski B., Badania przydatności metody ultradźwiękowej do szybkiej oceny jakości konstrukcji wykonanych z betonu. 32 Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących, Międzyzdroje 2003, s. 111-114
 [13] Matkowski Z., Badania wytrzymałości betonu na ściskanie w masywnych fundamentach pod wentylatory. 32 Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących, Międzyzdroje 2003
 [14] Budownictwo Betonowe. Tom VIII. Badanie materiałów, elementów i konstrukcji. Praca zbiorowa pod kierunkiem prof. R. Kozaka. Arkady, Warszawa 1970
 [15] Lewińska-Romicka A., Badania nieniszczące. Podstawy defektoskopii. WNT Warszawa 2001
 [16] Brunarski L., Runkiewicz L., Instrukcja stosowania metody ultradźwiękowej do nieniszczącej kontroli betonu w konstrukcji. Instrukcja ITB Nr 209. ITB, Warszawa 1977
 [17] PN-EN 12504-4:2005: Badania betonu. Część 4. Oznaczenie prędkości fali ultradźwiękowej
 [18] Kaszyński J., Transmisja impulsu ultradźwiękowego przez szczelinę w betonie wzdłuż zbrojenia. 31 Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących, Szczyrk 2002, s. 179-184
 [19] Ranachowski J., Problemy współczesnej akustyki. Wydawnictwo IPPT PAN, Warszawa, 1991
 [20] Stawski B., Stawski M., Badania kierunkowości głowic ultradźwiękowych z koncentratorami. 28 Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących, Zakopane 1999, s. 83-86
 [21] Stawski B.: Analiza możliwości pomiarowych metody ultradźwiękowej w badaniach betonu. 30 Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących, Szczyrk 2001, s. 81-86

MATERIAŁY REKLAMOWE

[M-1] Materiały reklamowe firmy UNIPRO
 [M-2] Materiały reklamowe firmy NDT JAMES INSTRUMENTS INC
 [M-3] Materiały reklamowe firmy PROCEQ