



## ZASTOSOWANIE METOD NIENISZCZĄCYCH W OCENIE SKUTECZNOŚCI NAPRAW KONSTRUKCJI BETONOWYCH WG PN-EN 1504

ANDRZEJ GARBACZ, *a.garbacz@il.pw.edu.pl*

Zakład Inżynierii Materiałów Budowlanych, Politechnika Warszawska

**Streszczenie:** Zapewnienie skuteczności naprawy wymaga diagnozy stanu technicznego konstrukcji, opracowania właściwego sposobu naprawy oraz kontroli jakości przeprowadzonej naprawy. Najistotniejszym etapem kontroli jakości jest określenie stanu podłoża przed i po przygotowaniu. Właściwe przygotowanie powierzchni betonu jest jednym z najistotniejszych czynników umożliwiających uzyskanie wysokiej przyczepności materiału naprawczego do podkładu betonowego. Z kolei zapewnienie wysokiej przyczepności jest traktowane jako wyznacznik skutecznej naprawy. Przyczepność zależy od wielu czynników. Do najważniejszych zalicza się zwilżalność, chropowatość podłoża i stopień jego zarysowania w wyniku uprzednio zastosowanej obróbki powierzchniowej. Ta złożoność wpływa również na możliwość zastosowania metod nieniszczących do oceny skuteczności naprawy. Wiele parametrów, np. zbyt duża chropowatość powierzchni podkładu czy obecność mikropęknięć, może mieć istotny wpływ na propagację fali sprężystej w układzie naprawczym, utrudniając nie tylko ocenę przyczepności, ale nawet detekcję nieciągłości w płaszczyźnie zespolenia. W artykule poruszono zagadnienie oceny skuteczności napraw i ochrony powierzchniowej w świetle wymagań normy PN-EN 1504-10. Przeanalizowano możliwość zastosowania metod nieniszczących, w szczególności impact-echo i ultradźwiękowej, do oceny jakości połączenia oraz szacowania przyczepności. Omówiono też geometryczno-materiałowe warunki prowadzenia pomiarów ultradźwiękową metodą powierzchniową. W analizie tej uwzględniono wpływ materiału naprawy i jakości podłoża betonowego (chropowatość i mikrozarzysowanie podkładu) na propagację fali sprężystej.

**Słowa kluczowe:** naprawa i ochrona powierzchniowa konstrukcji, trwałość, przyczepność, kontrola jakości prac, metody nieniszczące, jakość podkładu betonowego.

### 1. Ocena skuteczności napraw w ujęciu normowym

Zapewnienie skuteczności naprawy i w konsekwencji trwałego przywrócenia stanu użytkowania obiektu jest zagadnieniem skomplikowanym, wymagającym diagnozy stanu technicznego konstrukcji, opracowania właściwego sposobu naprawy oraz kontroli skuteczności przeprowadzonej naprawy [1, 2]. Obecnie do praktyki inżynierskiej wprowadzana jest norma europejska o statusie normy polskiej EN 1504-1-10 pod ogólnym tytułem „Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji z betonu. Definicje, wymagania, sterowanie jakością i ocena zgodności” [3]. Dziesiąta część normy EN 1504 dotyczy praktycznych aspektów stosowania wyrobów i systemów naprawczych i ochronnych na placu budowy. Podano w niej wymagania dotyczące stanu podłoża przed i podczas prowadzenia robót, obejmujące również stabilność konstrukcyjną, a także wymagania związane z przechowywaniem, przygotowywaniem i stosowaniem materiałów. W normie PN-EN 1504-10 podkreśla się, że prace powinny być wykonywane zgodnie z planem jakości przygotowanym w ramach projektu. Kontrola jakości wykonanych prac dotyczy następujących czynników:

- stan podłoża przed i/lub po przygotowaniu;
- dopuszczenie wyrobów i systemów;
- warunki i wymagania przed i/lub podczas stosowania;
- właściwości końcowe w stanie utwardzonym.

Najistotniejszym etapem kontroli jakości jest określenie stanu podłoża. Przygotowanie podłoża betonowego ma na celu zapewnienie warunków dla właściwego zastosowania materiału do naprawy lub ochrony. Przygotowanie to obejmuje, w zależności od potrzeb, oczyszczenie i/lub uszorstnienie podłoża oraz ewentualne usunięcie uszkodzonych lub skażonych fragmentów betonu. Przygotowanie zbrojenia może obejmować czyszczenie, nakładanie powłoki ochronnej lub wymianę części zbrojenia. Właściwe przygotowanie powierzchni betonu i zbrojenia, a w konsekwencji uzyskanie wysokiej przyczepności materiału naprawczego do podkładu betonowego, jest od lat intuicyjnie określane jako jeden z głównych czynników wpływających na skuteczność napraw. Wysoka przyczepność w układzie naprawionym zwiększa tolerancję na niedostosowanie cech fizykomechanicznych (kompatybilność) materiału naprawczego i podłoża betonowego [4]. Przyczepność ta zależy od wielu czynników [5, 6]. Do najważniejszych z nich można zaliczyć: wytrzymałość mechaniczną i rozwinięcie powierzchni podłoża, mikrorysy i porowatość podłoża, zawartość w nim wilgoci i zanieczyszczeń, niejednorodność materiałów, defekty wewnętrzne. Według PN-EN 1504-10 przygotowanie powierzchni jest procesem zapewniającym spełnienie podstawowego wymagania jakim jest „osiągnięcie wymaganego stanu podłoża w zakresie czystości, szorstkości, zarysowania, wytrzymałości na rozciąganie i ściskanie, zanieczyszczenia chlorkami lub innymi szkodliwymi substancjami i głębokości ich wniknięcia, głębokości karbonatyzacji, zawilgocenia, temperatury i stopnia skorodowania zbrojenia”. W normie zaproponowano łącznie 19 cech które powinny być sprawdzane. Podobnie liczny jest zestaw cech służących ocenie właściwości końcowych w stanie utwardzonym (tab. 1). Do oznaczania tych cech przywołane są metody badań według norm EN i ISO. W przypadku braku stosownych norm sposób badania lub obserwacji zawarty jest Załączniku informacyjnym A do PN-EN1504. Z przedstawionej wyżej tabeli wynika, że zależnie od przyjętej metody, występuje zestaw cech układu po utwardzeniu oznaczanych „we wszystkich przypadkach”. Cechy te dotyczą przede wszystkim oceny przyczepności lub jakości połączenia. Należy zauważyć, że w ocenie skuteczności naprawy zalecane jest stosowanie metod nieniszczących. ACI Concrete Repair Manual [7] podaje szerszy zestaw zalecanych i uzupełniających metod przydatnych do nieniszczącej kontroli skuteczności naprawy (tab. 2).

Ocena skuteczności napraw ukierunkowana jest głównie na jakość połączenia między materiałem naprawy a podłożem betonowym. Najważniejszym parametrem tej oceny jest wartość przyczepności przy odrywaniu (przyczepność „pull-off”) oznaczonej zgodnie PN-EN 1542. W ocenie tej bierze się pod uwagę także typ zniszczenia (zniszczenie adhezyjne lub zniszczenie kohezyjne). Metoda ta jest metodą małoniszczącą, a jej zaletą jest możliwość porównywania wyników uzyskanych w laboratorium i na placu budowy. W normie PN-EN 1504-10, jak i Concrete Repair Manual [7], zaleca się stosowanie tej metody również do określania wytrzymałości powierzchniowej betonu, jako miary ewentualnego uszkodzenia podłoża w wyniku zastosowanej obróbki. Do zmniejszenia rozrzutu wyników i zwiększenia ich wiarygodności konieczne jest zachowanie warunków geometrycznych prowadzenia pomiarów przyczepności, a w szczególności właściwej głębokości nacięcia podkładu oraz zachowania prostopadłości obciążenia siłą odrywającą ( $90 \pm 1^\circ$ ). Nacięcie na głębokość 10 mm w głąb podkładu (w PN-EN 1542 zaleca się  $15 \pm 5$  mm) stabilizuje wartość oznaczanej przyczepności przy odrywaniu (rys. 1a) [8]. Wykazano również, że odchylenie od pionu nacięcia podkładu lub kierunku przyłożenia siły do  $4^\circ$  nie wpływa istotnie na wartość przyczepności (rys. 1b) [9].

Tabela 1. Zestawienie cech badanych podczas kontroli skuteczności wybranych metod naprawy (wg PN-EN 1504-10)

Nr badania lub obserwacji wg PN-EN 1504-10	Cecha *)	Metoda badania lub obserwacja	Metoda naprawy				Norma**)
			Nakładanie powłok ochronnych	Wypełnianie rys, pustek i szczelin	Nakładanie zapraw lub betonów do uzupełniania ubytków	Wzmocnianie płytami lub taśmami	
1	Rozwarstwienie	Ostukiwanie młotkiem (T)			X		A.9.2
15	Oporność elektryczna	Wenner test (T)			□		A.9.2
29	Grubość powłoki lub zaprawy po utwardzeniu	Wycięcie klina lub określenie zużycia (O)	X		X	◆	ISO 2808 EN12504-1
30	Zdolność krycia	Wizualnie (O)	X				ISO4628-1-6:2003-04
32	Przepuszczalność wody przez powłokę lub materiał naprawczy lub wypełnioną rysę	Metoda Karstena (T); Pomiar wnikania na rdzeniu (T)	◆	◆	◆		EN-12390-8 ISO-7031
33	Stopień wypełnienia rys	Wizualnie na rdzeniu (O) Metoda ultradźwiękowa (T)		◆			A.9.2
35	Przyczepność powłoki lub zaprawy	Siatka nacięć (T), Badanie „pull-off” (T)	X	X	X		EN ISO 2409-6, ISO 4624 EN 1542-1
36	Wytrzymałość na ściskanie	Oznaczenie wytrzymałości na próbkach walcowych wyciętych z podkładu (T) lub metoda sklerometryczna (T)			X		EN 12504-1 EN 12504-2
37	Gęstość po stwardnieniu	Metoda suszenia (T)			X		EN-12390-7
38	Rysy skurczowe	Wizualnie czujnikiem mechanicznym (O)			X		A.9.2
39	Pustki w warstwie materiału naprawczego i pod nią	Metoda ultradźwiękowa lub radiograficzna (T) Wizualnie na rdzeniu (T)			◆		EN 12504-4 ISO 8047 EN 12504-1
42	Obecność porów w warstwie płyt wzmacniających i pod nią	Metoda „impact-echo” Ostukiwanie młotkiem Metoda ultradźwiękowa (T)				X	EN 12504-4 ISO 8047
43	Nośność konstrukcji	Obciążanie próbne				◆	A.9.2
44	Przyczepność materiału wypełniającego rysę do podłoża	Wizualnie na rdzeniu (O) Próba ściskania rdzenia (T)		□			A.9.2
45	Kolor i tekstura powierzchni	Wizualnie (O)			◆		A.9.2

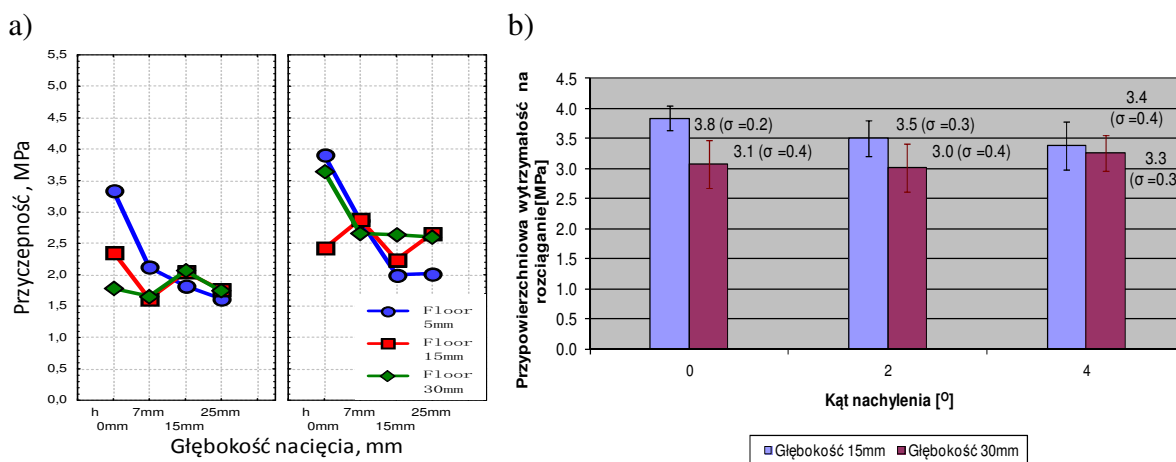
X – dla wszystkich przewidywanych zastosowań, ◆ - dla niektórych spośród przewidywanych zastosowań, □ – w zastosowaniach specjalnych, T – badanie, O – obserwacja.

\*) nie uwzględniono cech przewidzianych dla kontroli skuteczności takich metod naprawy, jak: impregnacja i hydrofobizacja, wzmocnianie dodatkowym zbrojeniem stalowym oraz zabezpieczanie zbrojenia powłokami.

\*\*\*) W przypadku braku stosownych norm opis badań lub obserwacji zawarto w Załączniku informacyjnym A.9.2.

Tabela 2. Metody nieniszczące do oceny skuteczności naprawy (wg ACI Concrete Repair Manual)

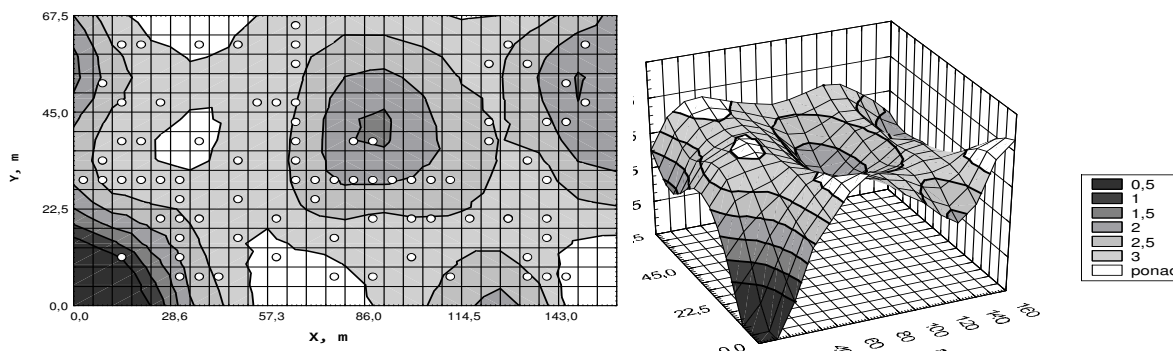
Właściwość	Metody		Oznaczenie i norma
	zalecane	uzupełniające	
Przyczepność	Pull-off	-----	pull-off – przyczepność przez odrywanie, ASTM 4541/ACI 503-30 I-E: impact-echo, ASTM C 1383 UPV – ultradźwiękowa metoda pomiaru czasu przejścia, ASTM C 1383C-597 I-RS – „Impulse-response”, wytyczne ACI 228.2R-98 SASW – spektralna analiza fal powierzchniowych, wytyczne ACI 228.2R-98
Jakość powierzchni zespolenia (brak defektów na powierzchni zespolenia)	Pull-off	I-E, SASW, I-RS	
Skuteczność iniekcji rys lub pustek	UPV, I-E	SASW	



Rys. 1. Wpływ a) głębokości nacięcia oraz b) odchylenia od pionu na wartość przyczepności przy odrywaniu (wg [8] i [9])

Oznaczanie przyczepności przez odrywanie powoduje powierzchniowe uszkodzenie naprawionej konstrukcji, które powinno zostać naprawiane. Obniża to często walory estetyczne naprawionej powierzchni. Z tego względu liczba miejsc pomiarowych jest zwykle ograniczona. Na rysunku 2 pokazano rozkład przyczepności przy odrywaniu w przypadku posadzki betonowej utwardzanej powierzchniowo [10]. Rozkład ten wyznaczono na podstawie wartości zmierzonych w miejscach, w których na podstawie zastosowania metody akustycznej (ostukiwanie prętem stalowym) podejrzewano występowanie odspojenia. Z przedstawionego rozkładu wynika, że w wielu „podejrzanych” miejscach przyczepność przy odrywaniu była wystarczająco wysoko. Z tego powodu poszukuje się bardziej wiarygodnych metod nieniszczących, które umożliwiałyby ocenę skuteczności naprawy bez ingerencji w strukturę utworzonego układu naprawczego i jednocześnie umożliwiały sporządzenie „mappingu” przyczepności na dużych powierzchniach.

Obecnie, obserwuje się znaczny postęp w obszarze metod nieniszczących do badań betonu a liczba handlowo dostępnych urządzeń do metod NDT stale rośnie [11, 12]. Obszerny opis metod stosowanych w diagnostyce konstrukcji żelbetowych można znaleźć w monografii „Diagnostyka konstrukcji żelbetowych” [13, 14], a także w licznej literaturze przedmiotu (obszerne omówienie tych metod można znaleźć w pracach [13–15]).



Rys. 2. Rozkład przyczepności przy odrywaniu posadzki mineralnej utwardzanej powierzchniowo uzyskany na podstawie pomiarów w miejscach (o) podejrzewanych o odspojenie posadzki (wg [10])

Klasyfikacja metod NDT może być różna zależnie od przyjętych kryteriów. Na przykład usystematyzowany podział NDT został ostatnio zaproponowany przez Hołę J. i in. [15]. Za najprostszy i jednocześnie obrazujący cel badań uważa się podział zaproponowany przez Carino N. [16] – tab. 3.

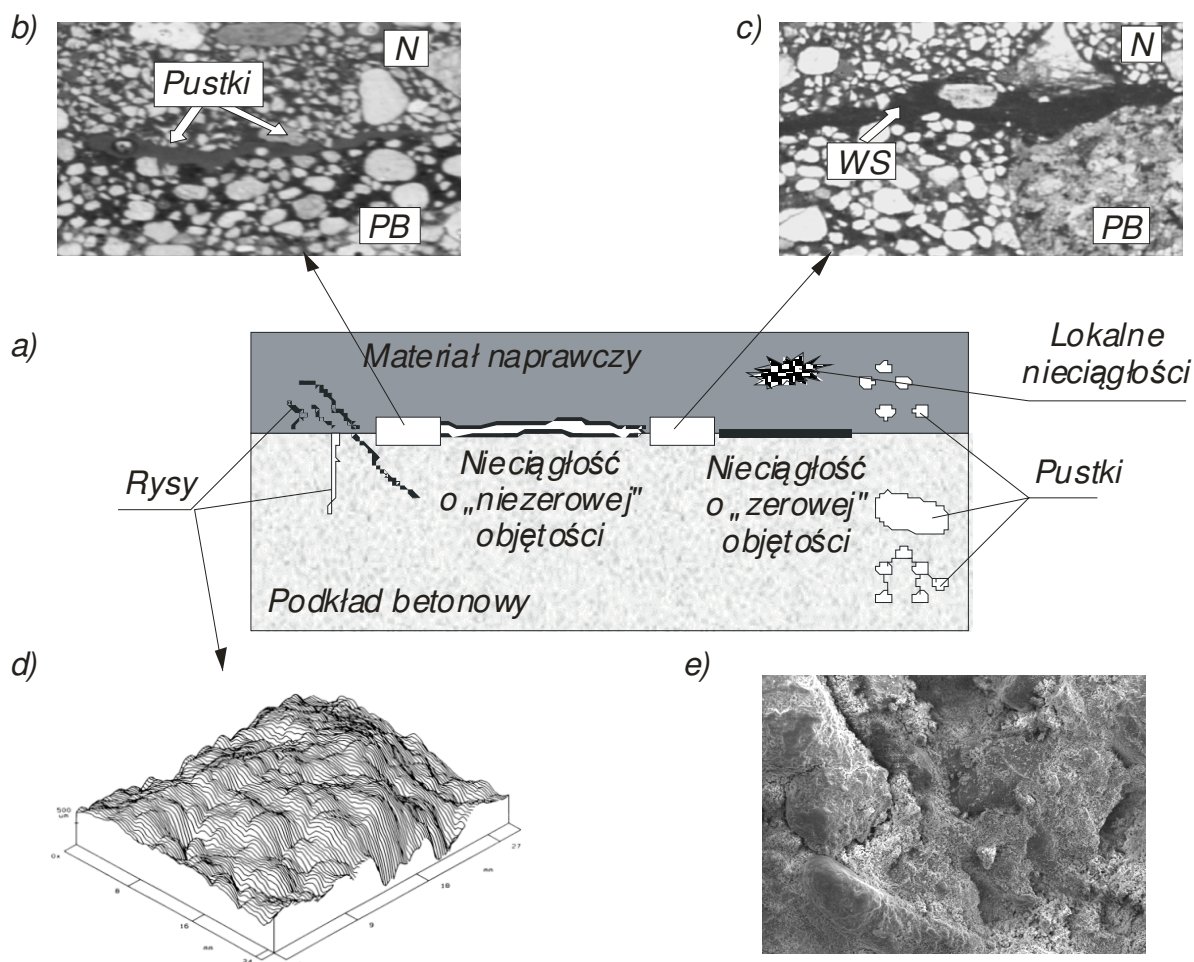
Tabela 3. Podział metod badań nieniszczących zależnie od celu badań wg Carino N. [16]

Ocena wytrzymałości betonu „in-situ”	Ocena jednorodności materiału w konstrukcji
Metoda sklerometryczna	Badania wizualne
Pomiar prędkość fali ultradźwiękowej	Metody akustyczne (ultradźwiękowe, impact-echo, impulse-response, emisja akustyczna, itp.)
Wstrzeliwanie stalowych sond	Metoda radarowa ( <i>Ground Penetrating Radar</i> )
Metoda „pull-out”	Metody elektryczno-magnetyczne
Metoda „break-off”	Metody radiologiczne
Metody służące ocenie wiązania betonu (maturity methods)	Termografia w podczerwieni

## 2. System naprawczy jako obiekt badań NDT

Do kontroli jakości wykonanych prac naprawczych w normie PN-EN 1504-10 zaleca się stosowanie przede wszystkim metody ultradźwiękowej i metody impact-echo. Opierają się one na zależności propagacji fali sprężystej od mikrostruktury materiału. Są one głównie wykorzystywane do oceny jakości połączenia z podłożem betonowym oraz jednorodności mikrostruktury materiału naprawczego. Metoda sklerometryczna zalecana jest natomiast do uzupełniającego szacowania wytrzymałości zaprawy naprawczej na ściskanie. Metoda radiologiczna może być stosowana do wykrywania pustek w warstwie materiału naprawczego lub pod nim. Do oceny skuteczności napraw można stosować również inne metody nieniszczące, np. te które rekomendowane są w ACI Concrete Repair Manual jako metody uzupełniające (por. tab. 2). W większości przypadków również w tych metodach wykorzystuje się propagację fal sprężystych.

Przyczepność zależy od wielu wcześniej wspomnianych czynników, które są wynikiem zastosowanej obróbki powierzchni przed naprawą. Do najważniejszych zalicza się zwilżalność, chropowatość podłoża i stopień jego zarysowania w wyniku uprzednio zastosowanej obróbki powierzchniowej. Zbyt duża chropowatość powierzchni podkładu czy obecność mikropęknięć, może też wpływać na propagację fali sprężystej w układzie naprawczym, utrudniając nie tylko ocenę przyczepności, ale nawet detekcję nieciągłości w płaszczyźnie zespolenia [12]. Na naturalną niejednorodność kompozytów tworzących układ nakłada się dodatkowy czynnik rozpraszający fale, tj. powierzchnia rozdziału materiał naprawczy – podkład betonowy (rys. 3).



Rys. 3. Możliwe defekty w układzie: kompozyt naprawczy-podkład betonowy (CS). Schemat (a) oraz przykłady różnej jakości powierzchni zespolenia: PCC-podkład betonowy: b) zawierająca pustki na powierzchni zespolenia oraz c) poprawa jakości zespolenia po zastosowaniu warstwy szepnej (WS); d) chropowatość i e) zarysowanie powierzchni podkładu betonowego po zastosowaniu obróbki

Zgodnie z klasyfikacją Adamsa i Drinkwata [17] w systemie naprawczym można wyróżnić następujące typy potencjalnych defektów:

- adhezyjne (na powierzchni zespolenia: materiał naprawczy-podkład betonowy), np. nieciągłości (rozwarstwienia) i obszary o obniżonej przyczepności (np. obecność pyłu, oleju na podkładzie);
- kohezyjne (w warstwie podkładu lub w materiale naprawczym): pustki, rysy, pęknięcia, efekty „plastra miodu”, miejsca niedotwardzonej żywicy w przypadku kompozytów polimerowych.

Nieniszcząca ocena stanu układu: materiał naprawczy-podkład betonowy jest zagadnieniem skomplikowanym z punktu widzenia metodyki badawczej i analizy uzyskiwanych wyników. Przy doborze metody NDT do oceny skuteczności napraw betonu (możliwość prowadzenia badań przy dostępie z jednej strony jej preferowana) należy uwzględnić:

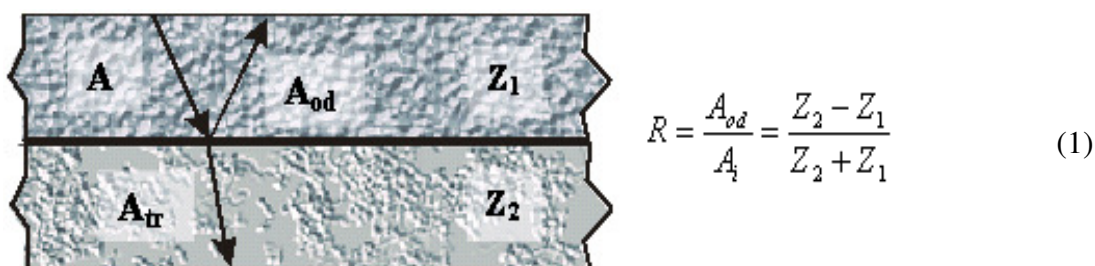
- rodzaj i wymiary defektów;
- grubość warstwy (lub warstw) materiału naprawczego;
- rodzaj materiału naprawczego (mineralny lub polimerowy);
- stan powierzchni podkładu betonowego, przede wszystkim jego chropowatość.

Rodzaj defektów oraz grubość uzależniona jest od rodzaju metody stosowanej w badaniach. Powstaje jednak pytanie czy obecność i jakość połączenia dwóch materiałów o różnych

właściwościach, w tym akustycznych, wpływa na możliwość zastosowania metod diagnostycznych stosowanych do badania obiektów monolitycznych.

### 3. Wpływ rodzaju materiału naprawczego oraz jakości połączenia na propagację fali sprężystej

Do napraw konstrukcji betonowych stosowane są przede wszystkim zaprawy i betony polimerowo-cementowe, rzadziej polimerowe. W obu przypadkach podstawowym problemem jest pytanie czy różnica impedancji nie wpływa istotnie na propagację fali sprężystej. Podatność na odbicie fali na granicy dwóch ośrodków jest charakteryzowana współczynnikiem odbicia  $R$  (rys. 4). Największe odbicie ( $R = 0,99$ ) obserwuje się w przypadku granicy z warstwą powietrza [18]. Dlatego metody wykorzystujące propagację fali sprężystej są skuteczne w przypadku obecności warstwy powietrza. Badania eksperymentalne, jak i symulacje komputerowe wskazują, że jeśli współczynnik odbicia jest większy niż  $R = 0,24$  połączenie materiału naprawczego i podłoża betonowego będzie „widoczne” i to nie zależnie od jakości połączenia [16].



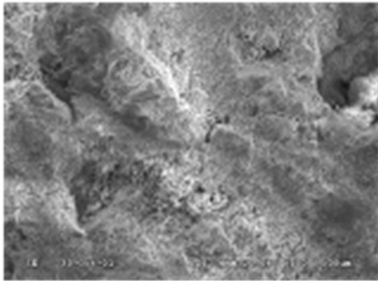
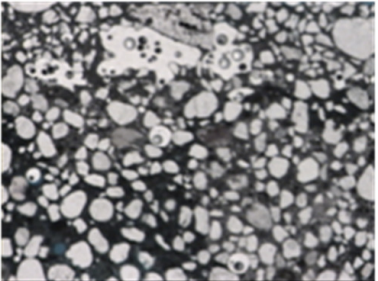
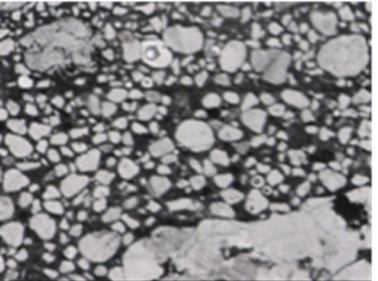
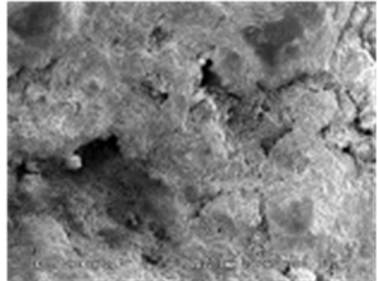
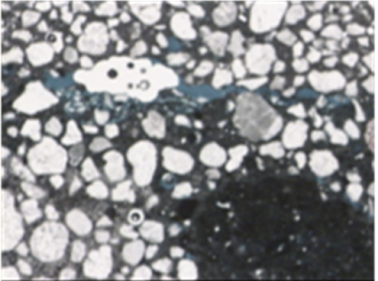
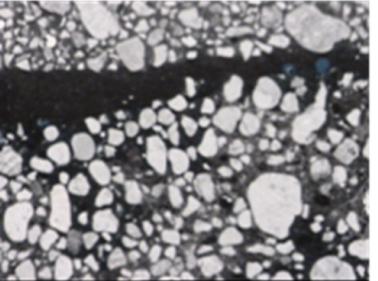
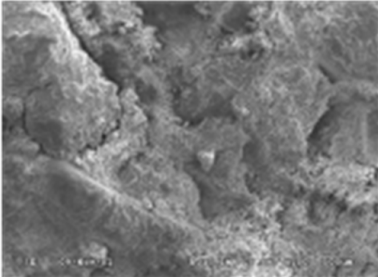
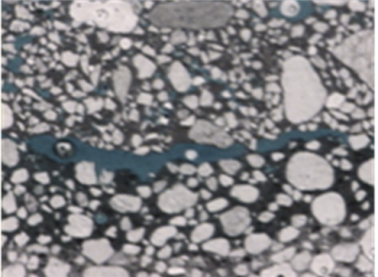
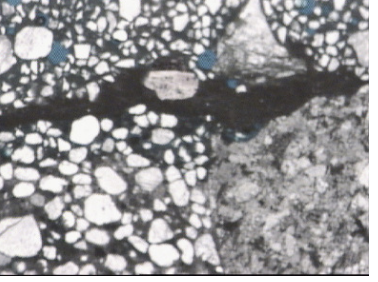
Rys. 4. Schemat odbicia fali sprężystej na granicy ośrodków o różnych impedancjach akustycznych:  $Z_1, Z_2$  (wg [16])

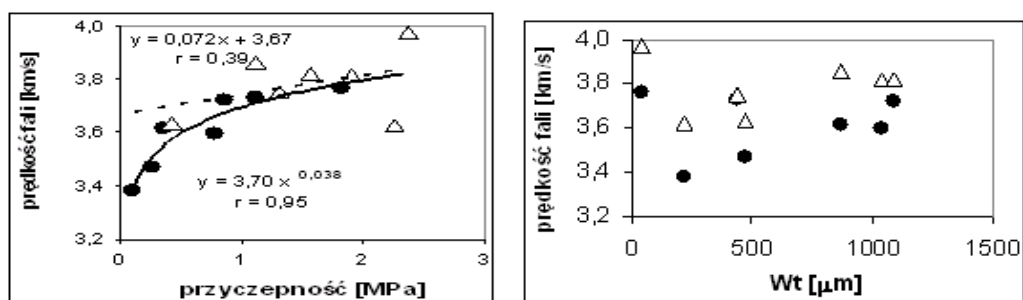
Badania propagacji fali ultradźwiękowej przeprowadzone w przypadku zapraw polimerowo-cementowych i polimerowych wskazują, że wpływ modyfikacji lub substytucji spoiwa cementowego nie powodują istotnych zmian prędkości fali i impedancji akustycznej. Wartość współczynnika odbicia nie przekraczała  $R = 0,18$ . Zjawisko odbicia fali sprężystej od granicy ośrodków powinien być uwzględniony w przypadku układów, które charakteryzują się wyższy współczynnikiem odbicia, np. „czyste” warstwy polimerowe, warstwy asfaltu na podłożu betonowym.

Badania wpływu jakości połączenia przeprowadzono łącznie dla 28 rodzajach systemów naprawczych zróżnicowanych pod względem stopnia rozwinięcia powierzchni oraz jakości połączenia [19] (tab. 4). Podkłady betonowe (C20/25) zostały poddane obróbkom o różnym stopniu agresywności. Na tak przygotowany podkład nałożono handlowo dostępną zaprawę polimerowo-cementową bez i z warstwą szepną. Stosowanie warstwy szepnej było zalecane przez producenta. W konsekwencji otrzymano układy o zróżnicowanym udziale pustek powietrznych w połączeniu (w przypadku systemów bez warstwy szepnej).

Wpływ pustek powietrznych w połączeniu w badanych układach był szczególnie widoczny w wynikach badań przyczepności. Generalnie dla układów bez warstwy szepnej wartości przyczepności są niższe niż w grupie z warstwą szepną. Statystycznie istotną zależność między przyczepnością i prędkością fali ( $r = 0,95$ ) uzyskano tylko w przypadku układów bez warstwy szepnej (rys. 5a). Dla układów z warstwą szepną podobnej zależności nie otrzymano. Zależność między prędkością fali nie była statystycznie istotna (rys. 5b). Oznacza to że chropowatość podkładu betonowego nie wpływa istotnie na propagację fal sprężystych stosowanych w badaniach betonu. Wpływ ten jest widoczny w przypadku obecności pustek powietrznych w połączeniu.

Tabela 4. Przykłady widoku powierzchni podkładu po obróbkach powierzchni o różnym stopniu agresywności oraz widoku połączenia w układach naprawczych bez i z warstwą szepną

Przykład widoku powierzchni (SEM, pow. 100×)	Przekrój poprzeczny (mikr. świetlny, pow. 10×)	
	bez warstwy szepnej	z warstwą szepną
Piaskowanie		
		
Śrutowanie		
		
Frezowanie		
		



Rys. 5. Zależność między prędkością fali i: a) przyczepnością dla pomiarów przyczepności „pull-off” w punkcie wykonania badania impact-echo oraz b) maksymalną wysokością profilu,  $W_t$ , charakteryzującego rozwinięcie powierzchni podkładu po obróbce powierzchniowej; układy: ● bez warstwy szepnej,  $\Delta$  z warstwą szepną (wg [19])

Powyższe wyniki dotyczyły betonów o stosunkowo niskiej wytrzymałości na ściskanie (C20/25). Badania wykonane dla betonów wyższych klas wytrzymałości (C20/25–C50/60)



potwierdziły wyżej sformułowany wniosek [20]. Również, symulacje komputerowe MES przeprowadzone dla modeli układu naprawczego o zróżnicowanej chropowatości powierzchni powietrznych nie wykazały istotnego wpływu chropowatości na propagację fali sprężystej [19, 21].

Uzyskane wyniki pozwalają stwierdzić, że zarówno rodzaj materiału naprawczego i chropowatość powierzchni podkładu nie wpływają istotnie na propagację fali sprężystej. Zmiany prędkości fali sprężystej oraz charakteru widma częstotliwości będą występowały w przypadku obecności pustek powietrznych w połączeniu. Oznacza to, że z punktu widzenia badań nieniszczących przy użyciu fal sprężystych układ naprawczy może być traktowany jako układ monolityczny, badania można przeprowadzać w oparciu o standardowe procedury badania konstrukcji betonowych. Wady połączenia materiał naprawczy – podkład betonowy mogą być traktowane jako wady wewnętrzne układu naprawionego.

#### **4. Ultradźwiękowa metoda pomiaru prędkości fali ultradźwiękowej**

Metoda pomiaru czasu przejścia należy do najstarszych i najprostszych metod badania materiałów. Literatura w tym zakresie jest niezwykle obszerna, zarówno w odniesieniu do badań betonów, jak i innych materiałów konstrukcyjnych. Zgodnie z nową normą PN-EN 12504-4 są trzy warianty lokalizacji głowic. Najczęściej dwie głowice: nadawczą i odbiorczą umieszcza się współosiowo po przeciwległych stronach badanego obiektu. W badaniach elementów betonowych stosowane są też inne konfiguracje głowic: głowice umieszczone na prostopadłych powierzchniach lub po jednej stronie badanego elementu. Do badań betonów zaleca się stosowanie metody bezpośredniej.

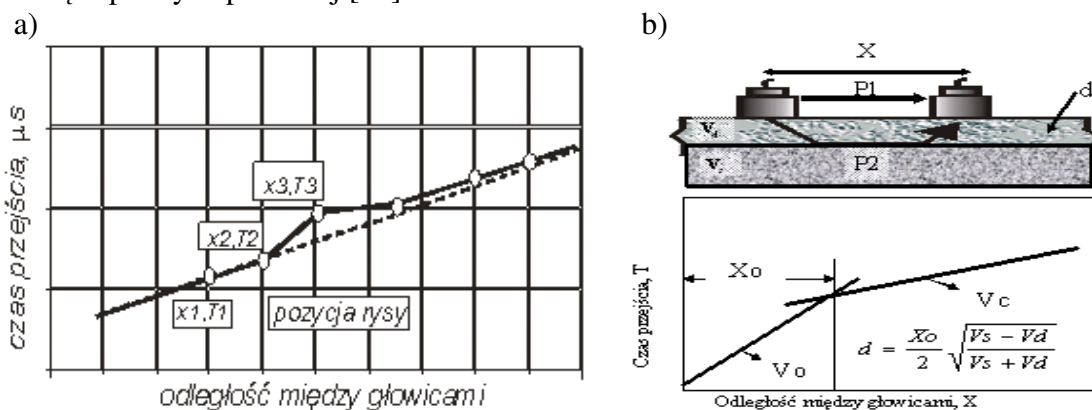
Zgodnie z PN-EN 12504-4 metoda pomiaru prędkości fali powinna być stosowana, przede wszystkim, do oceny jednorodności struktury betonu. Możliwość jej zastosowania do oceny wytrzymałości betonu na ściskanie i jej narastania w czasie uwarunkowana jest wyznaczeniem odpowiednich związków korelacyjnych. Ogólne zasady wyznaczania tych zależności podano ww. normie. Jednak, przy ocenie skuteczności napraw w badaniach konstrukcji in situ, można posłużyć się wytycznymi normy PN-EN 13791.

Do oceny jednorodności betonu wykorzystuje się zwykle metodę bezpośrednią przepuszczenia fali – głowice przyłożone po przeciwnych stronach badanego elementu. Ponieważ metoda pomiaru czasu przejścia jest metodą objętościową, daje ona tylko informacje o tym, że w badanej objętości występuje wada lub niejednorodność materiałowa. Nie można natomiast zlokalizować jej położenia lub wielkości.

Stosunkowo rzadkie wykorzystanie metody ultradźwiękowej w praktyce inżynierskiej, mimo jej zalet, wynika z konieczności uzyskania właściwego sprzężenia akustycznego z badaną powierzchnią oraz zachowania współosiowości głowicy nadawczej i odbiorczej, a także unikania prowadzenia pomiarów w miejscu występowania zbrojenia. Obecność zbrojenia jest czynnikiem silnie zakłócającym pomiar prędkości fali, dlatego w wielu wytycznych oraz w normie PN-EN 12504-4 zawarto zalecenie unikania pomiarów w miejscu występowania zbrojenia zlokalizowanego równoległe do wiązki fali ultradźwiękowej. W przypadku zbrojenia położonego prostopadle do kierunku rozchodzenia się fali ultradźwiękowej, jego wpływ jest o wiele mniejszy. Szerzej to zagadnienie przeanalizowano w monografii Kaszyńskiego J. [22]. Problem stosowania środków sprzęgających może być zmniejszony przez stosowanie głowic punktowych (eksponencyjnych). Przykłady badań z wykorzystaniem tego rodzaju głowic podane są w monografii Stawiskiego B. [23]. Umożliwiają one sporządzanie rozkładu prędkości wzdłuż wysokości rdzeni pobranych z konstrukcji. Wydaje się, że głowice punktowe mogłyby być przydatne, np. przy określaniu stopnia wypełniania rys (badanie nr 33 wg PN-EN 1504-10 – por. tab. 1).

Zastosowanie metody ultradźwiękowej na obiekcie naprawionym wymaga uwzględnienia wpływu wilgoci, temperatury, a także naprężeń w konstrukcji. W przypadku zawilgoconego stwardniałego materiału naprawczego wilgoć zawarta w porach może zwiększać prędkość fali. Różnica ta sięga ok. 5% między betonem w stanie nasyconym a betonem w stanie powietrzno-suchym. Można się jednak spodziewać, że wpływ ten będzie mniej istotny w przypadku zapraw i betonów naprawczych, gdyż są one z reguły szczelniejsze. Jeśli badania prowadzone są w temperaturze 5–30°C nie ma to istotnego wpływu na prędkość fali. Wykonywanie pomiarów w innej temperaturze wymaga wprowadzenia odpowiednich poprawek. W przypadku temperatury ujemnej, dochodzi efekt zamarzniętej wody – w lodzie ultradźwięki rozchodzą się szybciej niż w wodzie. Możliwość zastosowania metody ultradźwiękowej do oceny wytrzymałości betonu *in-situ* w obiektach naprawionych wymaga również uwzględnienia ewentualnych zmian prędkości fali pod wpływem przyłożonego obciążenia. Jest to szczególnie istotne w przypadku oceny stanu konstrukcji sprężonych. Popovits J. i in. [24] analizowali wpływ obciążenia na prędkość fali ultradźwiękowej. Na podstawie badań próbek zaczynu, zaprawy i betonu cementowego zauważyli ogólną tendencję: przy obciążeniach do ok. 20% nominalnej wytrzymałości na ściskanie obserwowano wzrost prędkości o ok. 5%. Po przekroczeniu tego poziomu obciążenia wartość prędkości stabilizowała się aż do ok. 70% nominalnej wytrzymałości. Po przekroczeniu tego poziomu naprężeń obserwowano gwałtowny spadek wartości prędkości aż do momentu zniszczenia próbki. Wpływ naprężeń na prędkość impulsu jest największy w przypadku, gdy droga impulsu jest prostopadła do dominującego kierunku płaszczyzn mikropęknięć.

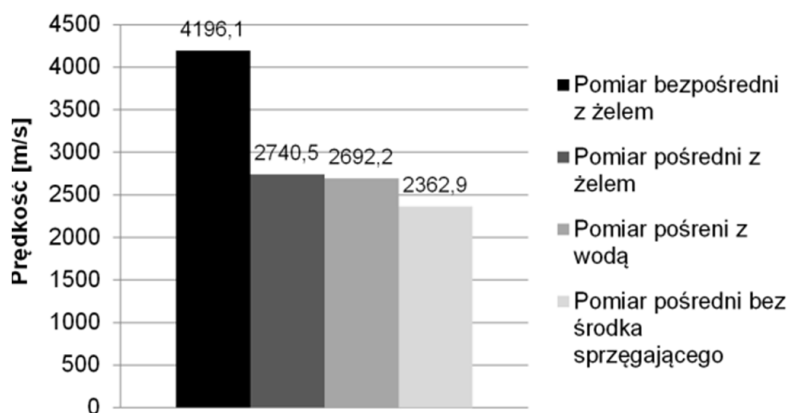
Ultradźwiękowa metoda pośrednia (metoda powierzchniowa) jest rzadziej stosowana. Wynika to z trudności dokładnego określenia drogi fali. Zgodnie z PN-EN 12504-4, wskazane jest prowadzenie pomiarów przy zmiennym rozstawie głowic. Prędkość fali wyznaczana jest z zależności czas przejścia od odległości między głowicami. Metoda ta może być wykorzystana do oceny głębokości rys powierzchniowych, a także szacowania grubości powierzchniowej uszkodzonej warstwy betonu. W obu przypadkach rejestrowana jest zmiana czasu przejścia (lub prędkości) w funkcji wzrastającej odległości między głowicami (rys. 6). Metoda powierzchniowa została również wykorzystana przez Czarneckiego L. i in. do szacowania przyczepności powłok polimerowych po betonie [10], Jaquerode'a i in. do wykrywania pęknięć pod warstwą zaprawy naprawczej [25].



Rys. 6. Zastosowanie metody powierzchniowej o zmiennym rozstawie głowic do: a) lokalizacji rysy (wg BS 1881:203) oraz b) wyznaczania grubości uszkodzonej warstwy betonu (wg [26])

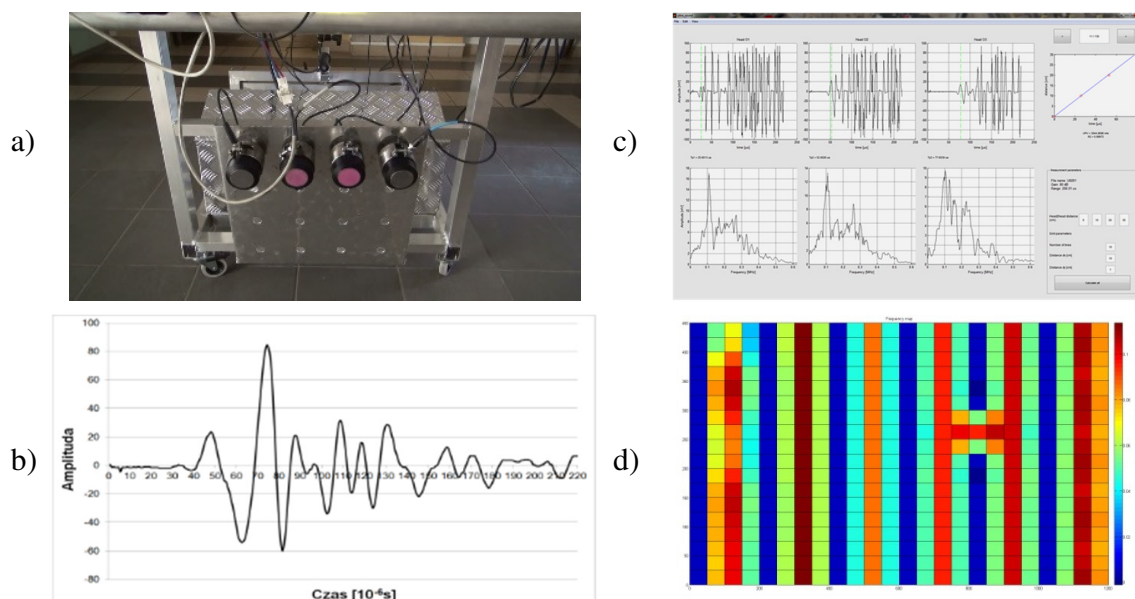
Jak już wspomniano trudność w oszacowaniu długości fali ultradźwiękowej w metodzie pośredniej może prowadzić do uzyskania błędnych wartości prędkości fali. Załęgowski K. i in. [27] pokazali, że wartości wyznaczone metodą bezpośrednią i pośrednią mogą się znacznie różnić (rys. 7). Prędkość fali w betonie wyznaczona metodą pośrednią była o około 35% niższa niż prędkość w metodzie bezpośredniej i osiągnęła wartość bardziej zbliżoną do prędkości fali

powierzchniowej niż fali podłużnej. Występujące różnice wynikały przede wszystkim z błędnego wyboru punktu sygnału uznawanego za początek fali. Wykazano, także że w pewnych przypadkach, np. posadzki przemysłowe, woda może spełniać rolę środka sprzęgającego.



Rys. 7. Prędkości fali ultradźwiękowej oszacowane metodą bezpośrednią z użyciem żeluz oraz metodą pośrednią bez środka sprzęgającego oraz z użyciem środka w postaci żeluz oraz wody (wg [27])

W celu uniknięcia wyżej opisanych problemów pomiarowych opracowano moduł do badań ultradźwiękowych metodą pośrednią. Składa się on z głowicy nadawczej oraz trzech głowicz odbiorczych, ustawione liniowo i oddalone między sobą o 10 cm (rys. 8a).



Rys. 8. Moduł UIR skanera do badań ultradźwiękowych metodą pośrednią (a), program do analizy sygnału zarejestrowanych równocześnie z trzech głowicz odbiorczych (b), przykładowy sygnały zarejestrowane na chropowatej posadzce betonowej użyciu środka sprzęgającego w postaci wody podkładek z pianki poliuretanowej o gr. 1 mm (c), oraz mapa prędkości na powierzchni 3x6 m (d)

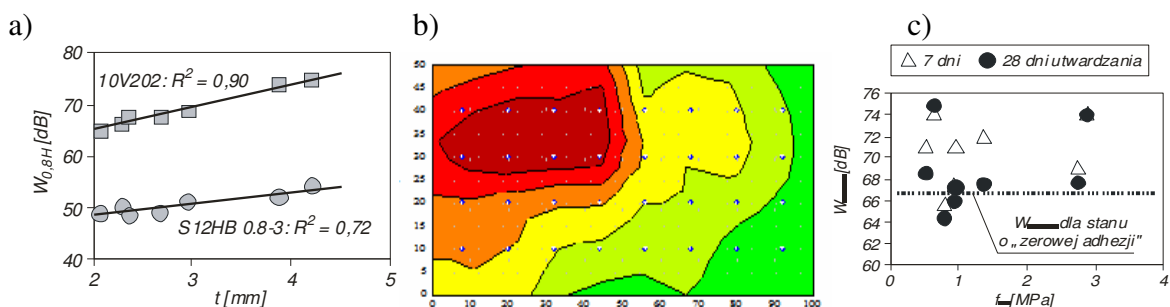
Głowice zamontowane są w specjalnym uchwycie zapewniającym stały rozstaw głowicz i równomierny ich docisk podczas pomiarów. Filtracja sygnału np. filtrem FFT (szybka transformata Fouriera), czy średnią ruchomą dodatkowo uwydatnia początek fali umożliwiając dokładne wyznaczenie prędkości w większości sytuacji (rys. 8b). Zainstalowany program do akwizycji danych umożliwia prowadzenie pomiarów bez konieczności kalibracji – określania czasu zerowego. Z kolei program do analizy i wizualizacji danych umożliwia korekcję

punktów sygnałów branych do obliczeń prędkości oraz sporządzanie map prędkości fali lub wybranego fragmentu widma częstotliwości (rys. 8c, d).

### 5. Ultradźwiękowa metoda echa

Ultradźwiękowa metoda echa (UP-E) należy do impulsowych metod echa. Polega ona na wysyłaniu krótkich impulsów fali ultradźwiękowej przez głowicę nadawczą, które po odbiciu od wady w strukturze materiału lub powierzchni ograniczającej rejestrowane są przez tę samą głowicę lub głowicę odbiorczą zlokalizowaną w sąsiedztwie. Próby zastosowania metody UE do badania betonu datują się lat sześćdziesiątych [16]. O pewnym sukcesie można mówić tylko w przypadku określania grubości elementu i wykrywania defektów w stosunkowo cienkich elementach, typu płyty, nawierzchnie, czy ściany. Wskazane jest stosowanie głowic o częstotliwości 100–200 kHz. Skonstruowanie tego typu głowic jest jednakże trudne, a przede wszystkim niepraktyczne ze względu na rozmiary głowicy i konieczność zapewnienia odpowiedniego sprzężenia akustycznego na dużym obszarze. Przy częstotliwości 100 kHz czas trwania impulsu nadawczego jest długi, co wywołuje w przypadku głowicy nadawczo-odbiorczej długą strefę martwą. Trudności w interpretacji sygnałów otrzymanych w przypadku ultradźwiękowej metody echa sprawiły, że była ona dotychczas rzadko wykorzystywana do oceny układów wielowarstwowych, w tym będących wynikiem naprawy, ochrony powierzchniowej lub wzmacniania betonu. Na przykład, Bastianini i in. [28], którzy zastosowali ultradźwiękową metodę echa do wykrywania defektów w układzie: kompozyt polimerowy zbrojony włóknami węglowymi (CFRP) – polimerowa zaprawa klejąca – podkład betonowy, powstałym w wyniku wzmacniania konstrukcji betonowych. Garbacz A. i Garboczi E. [29] wykorzystali tę metodę do szacowania grubości posadzek przemysłowych (rys. 9a). Natomiast, nie udało się tą metodą oszacować przyczepności tego rodzaju powłok do betonu (rys. 9b).

Ostatnio, zmodyfikowaną wersję techniki SAFT zaproponowali Shevaldykin V.G. i in. [30]. Użyli oni, w miejsce pary głowic skanujących, zestawu głowic generujących fale podłużne i poprzeczne. Obecnie na rynku dostępny są komercyjne zestawy do tzw. tomografii ultradźwiękowej. Metoda ta przez Taffe i in. [31] została z powodzeniem zastosowana do lokalizacji zbrojenia w konstrukcjach żelbetowych. Wyniki badań różnych elementów betonowych uzyskanych przez Hołę i Schabowicza potwierdzają duże możliwości tej metody [11, 32].



Rys. 9. a) Zależność między współczynnikiem wzmocnienia  $W_{0.8H}$  powłoki epoksydowej po 28 dniach utwardzania badanej za pomocą dwóch głowic handlowo dostępnych: S12HB0.8-3 i 10V202 i grubością rzeczywistą  $t$ ; b) rozkład grubości oszacowany metodą ultradźwiękową; c) wyniki pomiarów przyczepności oraz współczynnika wzmocnienia amplitudy bezwzględnej  $W_{0.8H}$  (głowica 10V202)

### 6. Metoda impact-echo

Metoda impact-echo (I-E) jest zaliczana do najbardziej obiecujących metod oceny stanu elementów betonowych i konstrukcji żelbetowych [16]. W metodzie I-E fale sprężyste generowane

są w wyniku uderzenia stalowej kulki o powierzchnię badanego elementu (rys. 10a, b). Ich częstotliwość jest niska, zwykle 1–60 kHz, i z tego względu charakteryzują się małą podatnością na rozpraszanie na elementach mikrostruktury betonu, takich jak ziarna kruszywa, pory, mikropęknięcia itp. Wyniki pomiarów prezentowane są w postaci rozkładu amplitudy w dziedzinie czasu, tzw. waveform (rys. 10c), oraz po przekształceniu za pomocą szybkiej transformaty Fouriera jako widmo częstotliwości (rys. 10b). Na podstawie wyznaczonej częstotliwości  $f_d$  oblicza się głębokość występowania wady lub grubość elementu wg wzoru:

$$d = \beta C_p / 2 f_d \text{ [mm]} \quad (2)$$

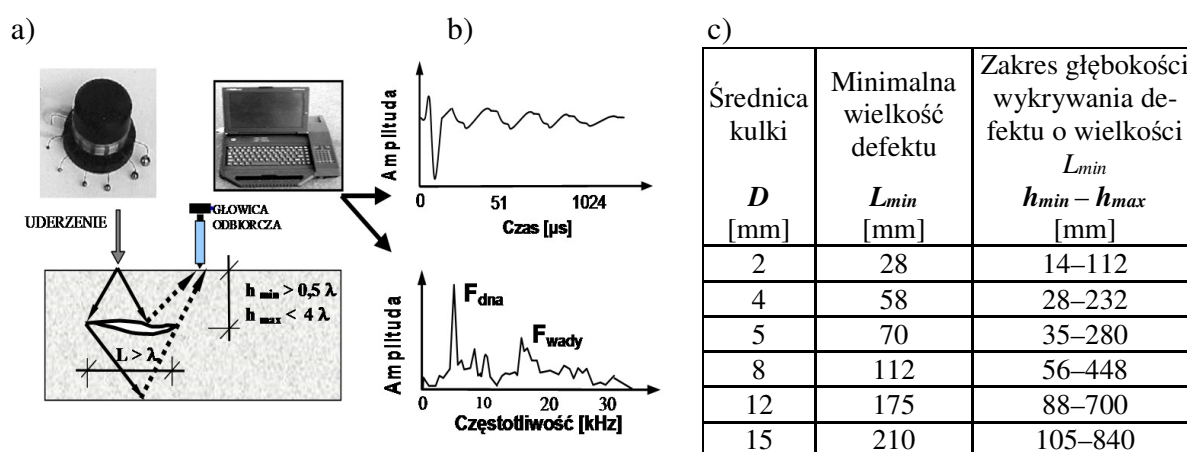
gdzie:  $f_d$  – częstotliwość dominująca w sygnale [kHz];  $c_p$  – prędkość fali w betonie [m/s];  $\beta$  – współczynnik korekcyjny (zależny od geometrii badanego obiektu; dla obiektów płytowych  $\beta = 0,96$ )

Wykorzystanie metody I-E w budownictwie jest szerokie. Za podstawowe można uznać następujące obszary zastosowań [12, 16, 33]:

- ocena grubości elementu konstrukcji betonowych przy dostępie z jednej strony;
- wykrywanie wszelkiego rodzaju nieciągłości wewnątrz betonu, takich jak rozwarstwienia, pustki, tzw. efekty „plastra miodu”, oraz lokalizacja zbrojenia;
- określanie głębokości rys powierzchniowych.

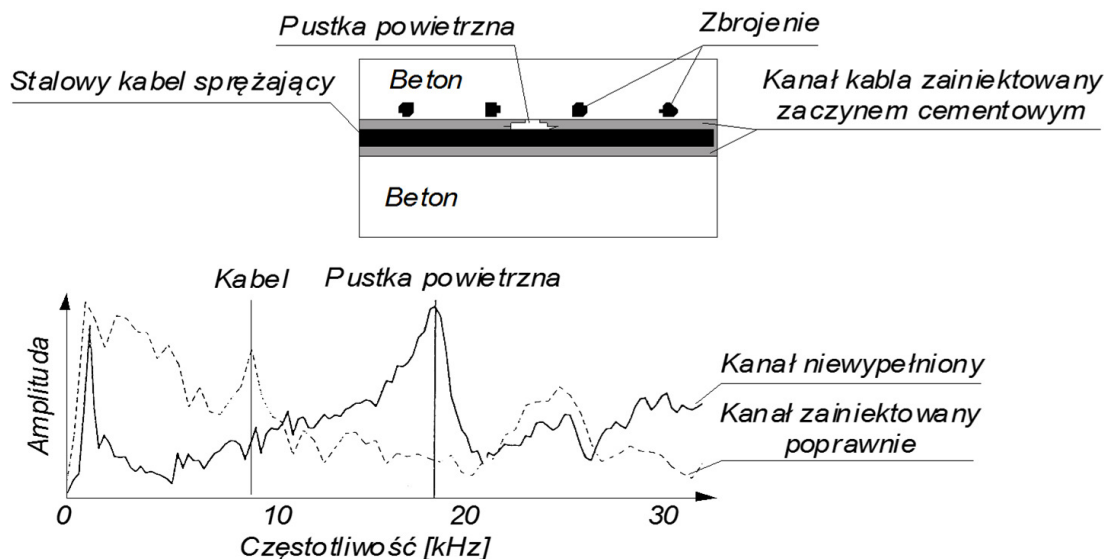
W dwóch pierwszych przypadkach procedura badawcza jest podobna. W otrzymanym widmie częstotliwości określa się częstotliwości dominujące,  $f_d$ , odpowiadające odbiciu od powierzchni rozdzielającej dwa ośrodki o różnej impedancji akustycznej. Może nią być powierzchnia przeciwna powierzchni elementu betonowego lub warstwa powietrza wewnątrz betonu. Dokładność oszacowania grubości była większa, niż błąd systematyczny metody I-E. Średni błąd wyznaczenia grubości oszacowano na 2,6% [33].

W przypadku obecności wad wewnętrznych w widmie częstotliwości powinien występować pik przy częstotliwościach wyższych niż częstotliwość odpowiadająca grubości elementu (rys. 10). Jeśli rozległa wada jest położona blisko powierzchni w widmie obserwuje się pik o niskiej częstotliwości, 2–3 kHz o dużej amplitudzie. Wymiary możliwej do zlokalizowania wady i głębokość jej występowania są uzależnione od średnicy impaktora (stalowej kulki) użytego do badań (rys. 10c).



Rys. 10. Schemat metody Impact-Echo: a) droga fali w miejscu wystąpienia wady, b) zarejestrowany przebieg czasowy oraz odpowiadające mu widmo częstotliwości z pikami częstotliwości dominujących, c) minimalna wielkość wady oraz minimalna i maksymalna głębokość jej położenia możliwa do wykrycia kulką o danej średnicy przy prędkości fali podłużnej 4000 m/s

Metoda I-E może być z powodzeniem wykorzystywana do oceny skuteczności napraw. Jednym z najczęściej spotykanych i udokumentowanych zastosowań jest ocena skuteczności iniekcji kanałów kablowych (np. [34]) – rys. 12. Sposób badań jest analogiczny do uprzednio opisanego lokalizowania wad w elementach monolitycznych.



Rys. 12. Przykład zastosowania metody impact-echo do oceny skuteczności iniekcji kabli sprężających: a) schemat układu, b) widma częstotliwości dla kanału zainiektowanego prawidłowo oraz kanału niezainiektowanego (wg [12])

Metoda I-E pozwala ona na oszacowanie grubości posadzek z dużą dokładnością przy dostępie z jednej strony [12]. Może być też z powodzeniem stosowana do oceny stanu technicznego posadzek o bardziej złożonej konstrukcji, tj. posadzek wielowarstwowych. Przykładem może być wykorzystanie metody I-E do oceny skuteczności naprawy posadzki mineralnej metodą iniekcji. Przedmiotem badań była posadzka mineralna typu lastriko w znajdującej się w trakcie użytkowania hali przemysłowej. Posadzka została ułożona na podkładzie z betonu klasy C16/20 o grubości 100 mm, zbrojonym siatką stalową. Po 6 miesiącach od wykonania posadzki i uruchomienia produkcji w hali stwierdzono objawy wystąpienia delaminacji między warstwą posadzki i podkładem, a w skrajnych przypadkach, w pobliżu dylatacji, „klawiszowanie” płyt posadzki. Jako metodę przywrócenia stanu użytkowania posadzki rozważano, zależnie od wielkości rozwarstwienia, wykonanie iniekcji cementowej lub żywicznej.

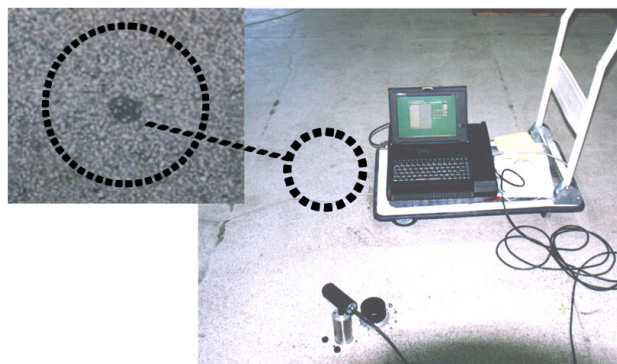
Celem badań metodą I-E było określenie obszaru występowania delaminacji, w szczególności określenie skuteczności wykonanych iniekcji próbnych. Na podstawie mappingu powierzchni wybranego obszaru posadzki (rys. 12) stwierdzono, że powierzchnia posadzki bez delaminacji stanowiła 28% całkowitej powierzchni posadzki. Obszary, w których wykryto delaminację stanowiły 25% obszaru. W przypadku pozostałej części posadzki – 47% można stwierdzić, że w połączeniu lastriko-beton występowały pustki powietrzne. Z opracowanej mapy stanu posadzki wynika, że obszary zlokalizowane w miejscach przeprowadzonych próbnich iniekcji cementowych i żywicznych nie wykazywały obecności delaminacji. Na obrzeżach tych obszarów stwierdzono natomiast możliwość występowania delaminacji wskutek niedoiniektowania.

Podobną ocenę można prowadzić również w przypadku posadzki żywicznej. Analiza zarejestrowanych widm częstotliwości wykazała, że mogą być one podzielone na trzy charakterystyczne typy odpowiadające różnym stanom technicznym posadzki (rys. 13):

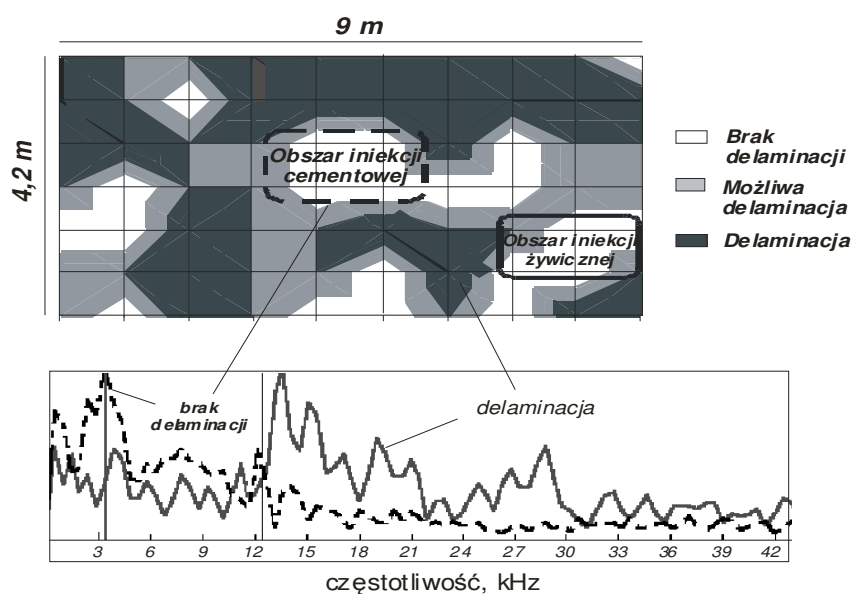
– typ A: widma wskazujące na integralność układu, bez wewnętrznych wad, o odpowiedniej jakości zespolenia poszczególnych elementów podłogi;

- typ B: widma złożone o skomplikowanym rozkładzie częstotliwości, obecność relatywnie małych wad występujących w okolicy górnej części płyty żelbetowej lub na granicy rozdziału warstwa wyrównawcza-płyta żelbetowa;
- typ C: widma zawierające wyraźne piki przy niskich częstotliwościach, obecność płytkich delaminacji.

a)



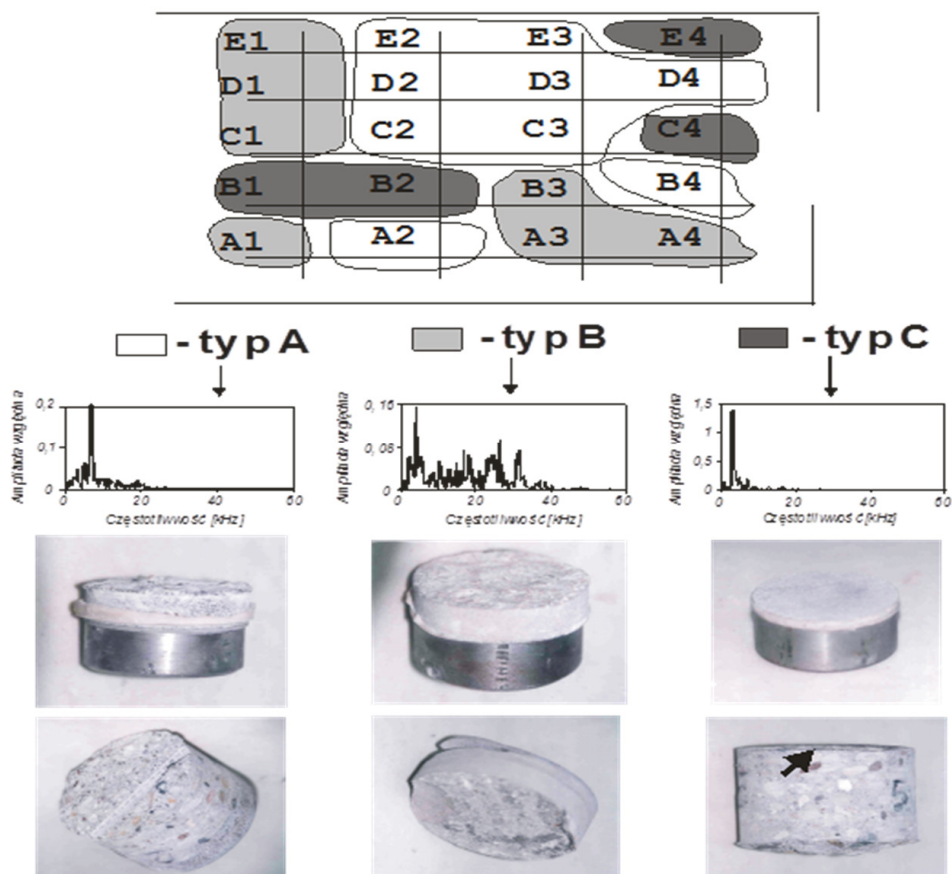
b)



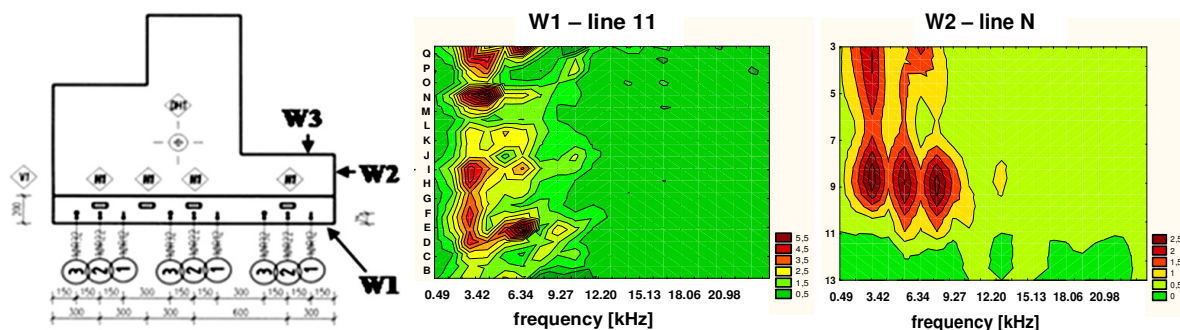
Rys. 12. Przykład zastosowania metody impact -echo do oceny skuteczności naprawy posadzki mineralnej metodą iniekcji: a) widok posadzki w miejscu wykonania iniekcji, b) mapa występowania delaminacji między warstwą lastriko a podkładem betonowym określona na podstawie na podstawie charakterystycznych widm częstotliwości (poniżej)

W celu weryfikacji wyników uzyskanych metodą I-E, oraz wyznaczenia rzeczywistej prędkości fali, w wybranych miejscach pobrano próbki walcowe oraz określono przyczepność przez odrywanie (rys. 13). W przypadku miejsc, w których występowały widma typu A posadzka odznaczała się największą przyczepnością do podłoża betonowego, a zniszczenie miało charakter kohezyjny w betonie. Próbka walcowa pobrana w pobliżu punktu potwierdziła integralność podłogi – brak wad wewnętrznych. Próbki z obszarów, w których występowały widma typu B wskazywały na niską przyczepność między warstwą wyrównawczą i płytą betonową – w czasie pobierania próbek walcowych nastąpiło odspojenie warstwy wyrównawczej od płyty betonowej. Próbka pobrana w miejscu występowania widma typu C charakteryzowała się bardzo niską przyczepnością przy odrywaniu (zniszczenie typu adhezyjnego), a w wyniku oględzin próbki walcowej pobranej w pobliżu miejsc oznaczania przyczepności stwierdzono odspojenie powłoki polimerowej od podkładu.

Metoda I-E jest szczególnie przydatna w badaniach elementów płytowych. Widma częstotliwości uzyskane dla elementów o innych kształtach są trudniejsze do interpretacji ze względu na istotny wpływ odbić fali od krawędzi elementu (rys. 14) [35]. Wzór określający głębokość ewentualnych defektów (rów. 2) powinien być zmodyfikowany przez wprowadzenie odpowiednich współczynników korekcyjnych  $\beta$  [33].



Rys. 13. Przykład mappingu podłogi betonowej z posadzką epoksydową z zaznaczeniem charakterystycznych typów widm częstotliwości oraz odpowiadający im sposób zniszczenia przy oznaczaniu przyczepności przez odrywanie oraz wygląd próbek walcowych: a) maksymalna przyczepność, b) liczne drobne rozwarstwienia między mineralną warstwą wyrównawczą a podkładem betonowym oraz c) rozległa delaminacja między powłoką polimerową a podkładem betonowym



Rys. 14. Przykładowe rozkłady widm częstotliwości wzdłuż linii siatki pomiarowej ścian W1 i W2 elementu betonowego o nieregularnym kształcie (na podstawie [35])



## 7. Inne metody

Omówione powyżej metody nieniszczące są zalecane w normie PN-EN 1504-10 do oceny skuteczności napraw i ochrony powierzchniowej. Postęp w obszarze metod nieniszczących sprawia, że można rozpatrywać przydatność innych metod [15]. Już w dokumentach amerykańskich do oceny skuteczności zaleca się również inne metody wykorzystujące fale sprężyste: „impulse-response” i spektralna analiza fal powierzchniowych [16] (por. tab. 2).

W metodzie „impulse-response” (metoda podobna do I-E) fala sprężysta generowana za pomocą specjalnego młotka z gumową końcówką umożliwiającą rejestrację siły i czasu uderzenia; geofon ulokowany blisko źródła fali rejestruje drgania powierzchni; sygnał przekształcony jest w tzw. wykres „mobility” (prędkość drgań geofonu/siła uderzenia) w funkcji częstotliwości. Służy do badania jednorodności betonowych konstrukcji masywnych, głównie pali i głębokich fundamentów, wykrywanie pustek pod płytami betonowymi na gruncie, wykrywanie defektów w układach wielowarstwowych. Do podstawowych wad zalicza się uzależnienie wyników od geometrii badanego obiektu. Obecnie metoda ta wykorzystywana jest do zgrubnego badania elementów, a następnie bardziej precyzyjne badania wykonuje się metodą IE.

Spektralna analiza fal powierzchniowych jest wariantem metody IE. Polega na analizie spektralnej widma częstotliwości fal powierzchniowych Rayleigha generowanych w systemie powłokowym. Rejestrowany sygnał jest analizowany w celu otrzymania zależności prędkości fazowej od częstotliwości. Jej przewidywane zastosowania to określanie profilu sztywności nawierzchni, pomiar zmian właściwości sprężystych płyt betonowych podczas dojrzewania, badanie jakości zespolenia w układach wielowarstwowych. Do podstawowych wad zalicza czasochłonną procedurę wynikającą z konieczności porównywania doświadczalnych krzywych dyspersji z krzywymi teoretycznymi oraz trudność interpretacji wyników.

Oprócz wymienionych powyżej metod coraz większe zainteresowanie w diagnostyce konstrukcji betonowych, w tym w ocenie skuteczności napraw budzą radar oraz termowizja [12, 36].

## 8. Wykrywanie niejednorodności o „zerowej objętości”

Celem projektu badawczego realizowanego we współpracy między Politechniką Warszawską i Uniwersytetem w Liege była ocena możliwości wykorzystania impact-echo i radaru do wykrywania defektów nie zawierających warstwy powietrza i zlokalizowanych na powierzchni zespolenia w układach naprawczych [37]. Wybór rodzajów elementów podyktowany był praktycznymi potrzebami lokalnego Ministerstwa Transportu i Robót Publicznych. Tego rodzaju defekty są trudniejsze do wykrycia szczególnie w przypadku metody impact-echo i innych metod wykorzystujących propagację fali sprężystej. Do badań przygotowano cztery podkłady betonowe o wymiarach 600×800×80 mm i klasie wytrzymałości betonu C20/25. Po 28 dniach dojrzewania powierzchnię podkładów poddano piaskowaniu. Na powierzchnię trzech kolejnych podkładów ułożono odpowiednio (rys. 15):

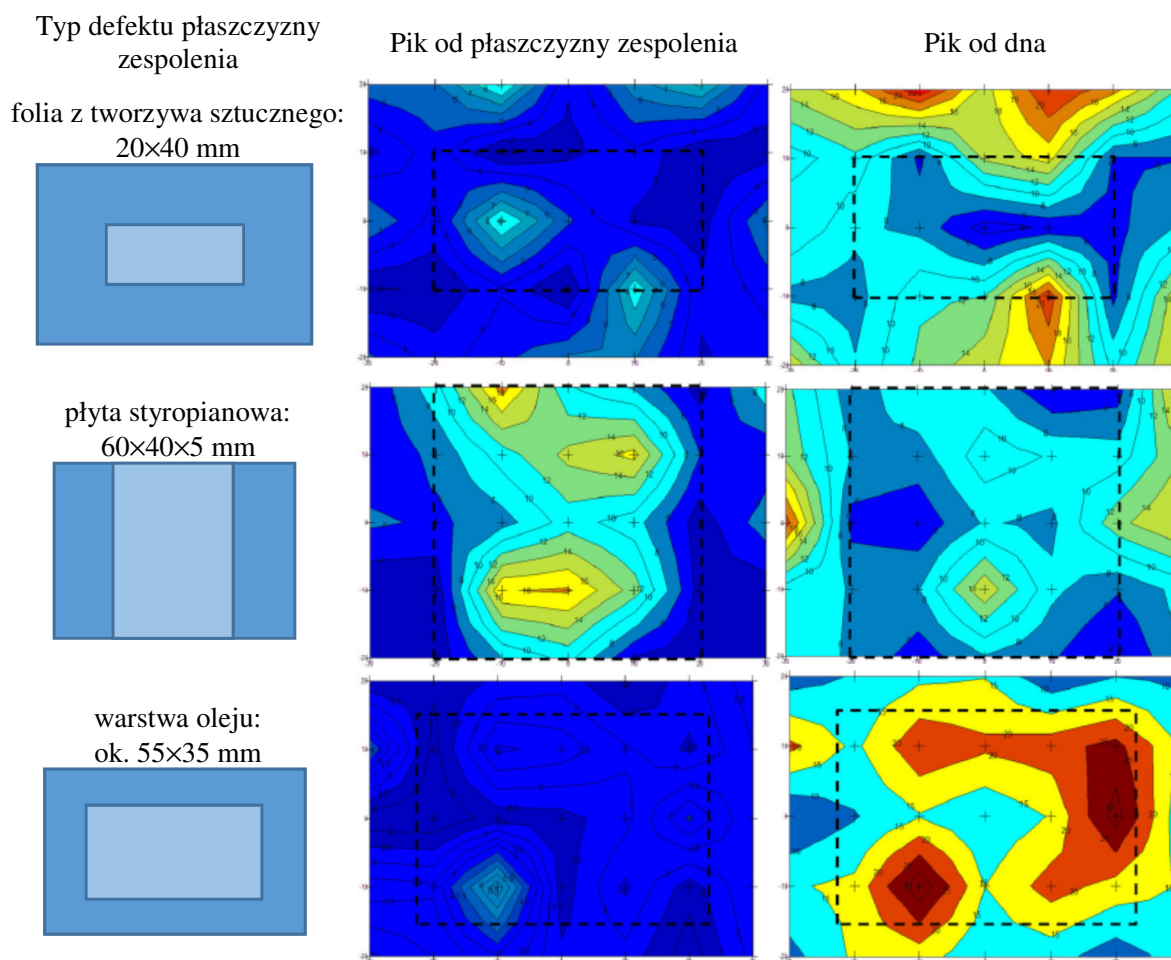
- folię z tworzywa sztucznego o wymiarach 20×40 mm;
- płytę styropianową o wymiarach 60×40×5 mm;
- warstwę oleju używanego przy deskowaniu na powierzchni o przybliżonych wymiarach 55×35 mm.

Na tak przygotowane podkłady nałożono warstwę handlowo dostępnej zaprawy naprawczej o grubości 80 mm. Wykonano również referencyjny układ naprawczy, z założenia bez defektów na powierzchni zespolenia. Po 28 dniach dojrzewania zaprawy wykonano badania impact-echo oraz radarem z anteną o częstotliwości 2,6 GHz.

W badaniach impact-echo jako wskaźnik występowania defektów przyjęto amplitudę pików częstotliwości odpowiadającej odbiciu fali od powierzchni zespolenia. Widma częstotliwości

dla miejsca bez defektu zawierały wyraźny pik odpowiadający odbiciu fali od przeciwległej powierzchni próbki i nie zawierały pików odpowiadających odbiciu fali od powierzchni zespolenia. Również badania radarem nie wskazywały obecności powierzchni zespolenia.

Badania próbek ze sztucznymi wadami wykazały odmienną czułość obu metod na ich obecność (por. rys. 15). W badaniach impact-echo odniesieniu do przypadku układu zawierającego folię z tworzywa sztucznego nie obserwowano w widmie częstotliwości pików od powierzchni zespolenia oraz od dna próbki. W układzie zawierającej styropian obserwowano wzrost amplitudy pików od powierzchni zespolenia i znaczny spadek amplitudy pików od dna. Badania wykonane radarem pozwoliły na dokładniejsze zlokalizowanie występowania płyty styropianowej. Natomiast, w badaniach impact-echo jak i za pomocą radaru nie wykryto obecności oleju na powierzchni zespolenia.



Rys. 15. Rozkład amplitud pików odbicia fali od powierzchni zespolenia i dna (ta sama skala wartości amplitudy) dla układów naprawczych zawierających różne typy defektów na powierzchni zespolenia

## 9. Podsumowanie

Zapewnienie skuteczności naprawy wymaga diagnozy stanu technicznego konstrukcji, opracowania właściwego sposobu naprawy oraz kontroli jakości przeprowadzonej naprawy. Ocena skuteczności napraw ukierunkowana jest głównie na jakość połączenia między materiałem naprawy a podłożem betonowym. Najważniejszym parametrem tej oceny jest wartość przyczepności przy odrywaniu. Oznaczanie przyczepności powoduje powierzchniowe uszkodzenie naprawionej konstrukcji, które powinno zostać naprawiane. Z tego względu

liczba miejsc pomiarowych jest zwykle ograniczona. Rośnie również zainteresowanie opracowaniem wiarygodnych metod nieniszczących.

W artykule przedyskutowano zastosowanie metod ultradźwiękowych oraz metody impact-echo do oceny skuteczności napraw. Zgodnie z PN-EN 1504-10 są one przede wszystkim zalecane do oceny jakości połączenia między materiałem naprawy a podłożem betonowym. Wykorzystują one przede wszystkim propagację fali sprężystej. Przytoczone w PN-EN 1504-10 normy dotyczące metod badawczych dotyczą ich wykorzystania do badania monolitycznych elementów betonowych. Wyniki systematycznych badań różnych typów układów naprawczych przeprowadzone na Politechnice Warszawskiej wskazują, że rodzaj materiału naprawczego, chropowatość i mikrozarysowanie podkładu betonowego w wyniku zastosowanych obróbek powierzchniowych nie wpływają istotnie na propagację fal sprężystych. Oznacza to, że z punktu widzenia badań nieniszczących przy użyciu fal sprężystych układ naprawczy może być traktowany jako układ monolityczny, badania można przeprowadzać w oparciu o standardowe procedury badania konstrukcji betonowych. Wady połączenia materiał naprawczy – podkład betonowy mogą być traktowane jako wady wewnętrzne układu naprawionego.

Aktualne trendy rozwoju nieniszczących metod badania betonu zmiierają w kierunku stosowania kilku uzupełniających się wzajemnie metod NDT. Korzystne jest, aby metody badawcze wykorzystywały różne zjawiska fizyczne, np. propagację fali sprężystej i elektromagnetycznej. Przykładem takiego rozwiązania jest zintegrowanego system pomiarowy UIR-skaner przewidziano do kompleksowej oceny jakości posadzek przemysłowych, płyt mostowych, nawierzchni drogowych oraz innych betonowych elementów płytowych, za pomocą trzech komplementarnych metod nieniszczących: ultradźwiękowej (U), impact-echo (I) i ground penetrating radar (R) opracowany na Politechnice Warszawskiej. Dodatkowym wyposażeniem skanera jest moduł do rejestracji obrazu badanej powierzchni i lokalizacji punktów pomiarowych [38]. Obecnie w Niemczech opracowano skaner Betoscan, który umożliwia prowadzenie badań kilkoma metodami [39]. Interesującym rozwiązaniem jest przenośne urządzenie do badań betonu metodą ultradźwiękową z głowicami typu "air-coupled" [40]. Należy przypuszczać, że dzięki zaawansowanym technikom komputerowym dalszy rozwój metod NDT stosowanych w badaniach betonu będzie zmierzał w tym kierunku. Zwiększają one prawdopodobieństwo właściwego wnioskowania o stanie obiektu (diagnozowanego przed naprawą jak i po naprawie).

W zakresie oceny skuteczności dalsze prace rozwojowe będą ukierunkowane na możliwość sporządzania map przyczepności w oparciu o wyniki badań nieniszczących. Aby zwiększyć precyzję pomiarów, konieczne będzie, zgodnie z ostatnimi trendami, zastosowanie zaawansowanych metod analizy sygnału (np. analiza falkowa) oraz analizy wyników (np. zastosowanie sztucznych sieci neuronowych, teorii zbiorów rozmytych, itp.), a także wykorzystanie parametrów charakteryzujących jakość podkładu betonowego. Pozwoli to na opracowanie takich systemów (skanerów), które podobnie jak w medycynie, pozwolą wypowiedzieć się specjalistom z budownictwa o stanie obiektu bez konieczności posiadania głębokiej wiedzy o zjawiskach fizycznych związanych z techniką badania (np. uwarunkowań propagacji fal sprężystych) co nabiera dodatkowego znaczenia podczas oceny jakości obszarów o dużej powierzchni, takich jak np. infrastruktura komunikacyjna czy podłogi przemysłowe w halach magazynowych i produkcyjnych.

#### Podziękowania

Autor dziękuje Panu Prof. Lechowi Czarneckiemu, sekretarzowi naukowemu ITB, za dyskusję i cenne uwagi przy przygotowywaniu niniejszego artykułu. Praca została przygotowana w ramach grantu NCBR nr NR04 0024 10 (2010-2014) pt. "UIR-skaner mobilny, zintegrowany skaner do diagnostyki elementów betonowych za pomocą metod nieniszczących". W pracy wykorzystano częściowo wyniki projektów realizowanych we współpracy z University of Liege w ramach umowy międzyrządowej między Polską (MNiSW) i Belgią (Wallonia-Brussels International).

## Literatura

1. Czarnecki L., Emmons P. Naprawa i ochrona konstrukcji betonowych, Polski Cement, Kraków 2002.
2. Czarnecki L., Łukowski P., Śliwiński J. *Materiałowe uwarunkowania awarii i napraw konstrukcji z betonu*. 25 Konferencja Naukowo-Techniczna „Awarie Budowlane”, Szczecin-Międzyzdroje, 2011.
3. Czarnecki L., Łukowski P., Garbacz A. *Materiały do naprawy konstrukcji żelbetowych oraz technologie ich stosowania*, w: Naprawy i wzmocnienia konstrukcji budowlanych. Konstrukcje żelbetowe, 2014.
4. Czarnecki L., Garbacz A., Łukowski P., Clifton J.R. Polymer Composites for Repairing of Portland Cement Concrete: Compatibility Project. Report no. NISTIR 6394, National Institute of Standards and Technology, 1999.
5. Czarnecki L., Chmielewska, B. Uwarunkowania adhezji w złączach budowlanych, Cement Wapno Beton 2005.
6. Garbacz A., Courard L., Bissonnette B. A surface engineering approach applicable to concrete repair engineering, Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences, 61/2013.
7. Concrete Repair Manual, ACI International, Farmington Hills, USA 2003.
8. Czarnecki L., Chmielewska B., Krupa P. *Influence of selected factors on the results of pull-off test for industrial floors*, Industrial Floors'03, 5<sup>th</sup> International Colloquium Industrial Floors'03, Technische Akademie Esslingen 2003.
9. Courard L., Bissonnette B., Garbacz A., Vaysburd A., Von Fay K., Moczulski G., Morency M. *Effect of Misalignment on Pulloff Test Results: Numerical and Experimental Assessments*, ACI Materials Journal, 111/2014.
10. Czarnecki L., Garbacz A., Krystosiak M. On the ultrasonic assessment of adhesion between polymer coating and concrete substrate, Cement Concrete Composites, 28/2006.
11. Hoła J. Schabowicz K. State-of-the-art non-destructive methods for diagnostic testing of building structures – anticipated development trends, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 10 (3) 2010.
12. Garbacz A. Nieniszczące badania betonopodobnych kompozytów polimerowych za pomocą fal sprężystych – ocena skuteczności napraw, Prace Naukowe, Budownictwo, z.147, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2007.
13. Drobiec Ł., Jasiński R., Piekarczyk A. Diagnostyka konstrukcji żelbetowych. Tom 1, PWN 2010.
14. Zybura A., Jaśniok M., Jaśniok T. Diagnostyka konstrukcji żelbetowych. Tom 1, PWN 2011.
15. Hoła J., Bień J., Sadowski Ł., Schabowicz K. Non-destructive and minor-destructive diagnostics of concrete structures in assessment of their durability, Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences, 63/2015.
16. Malhorta V.M., Carino N.J. Handbook on nondestructive testing of concrete, CRC Press, 2004.
17. Adams R.D., Drinkwater B.W. Nondestructive testing of adhesively bonded joints, NDT&E Int., 30/1997.
18. Lewińska-Romicka A. Badania nieniszczące. Podstawy defektoskopii, WNT, Warszawa, 2000.
19. Garbacz A. Stress wave propagation throughout an interface: PCC composites-concrete substrate in repair system, ACEE, 3/2010.
20. Garbacz A., Piotrowski T., Courard L. An analysis of stress wave propagation in repair systems using wavelet approach, RILEM PRO 51 Advances in Concrete through Science and Engineering, Canada 2006.
21. Santos P., Júlio E., Santos J. Towards the development of an in situ non-destructive method to control the quality of concrete-to-concrete interfaces, Eng.Struct., 32/2011.
22. Kaszyński J. Ultradźwiękowe badania betonu z uwzględnieniem strefy zbrojenia i zarysowania, Wyd. Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 2003.
23. Stawiski B. Ultradźwiękowe badania betonu i zapraw głowicami punktowymi, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, seria Monografie nr 39, 2009.
24. Popovits S., Rose J.L., Popovics J.S. The behaviour of ultrasonic pulses in concrete, Cement and Concrete Research, 20/1990.
25. Jaquerod C., Chippis Ch., Alou F., Houst Y.F., Nondestructive testing of repair mortars for concrete, Proc. of the 3rd Int. Colloquium Materials Science and Restoration, Esslingen, 1992.

26. Weizheng L., Yiyong Y., Ultrasonic detection of cement concrete pavement thickness, Proc. of the 14th World Conf. on Non Destructive Testing, New Delhi, 1996.
27. Załęgowski K., Piotrowski K., Garbacz A. *Diagnostyka konstrukcji betonowych metodą ultradźwiękową pośrednią*, Przegląd Spawalnictwa (Welding Technology Review), 11/2014.
28. Bastianini F., Tommaso A.Di., Paxcale G. Ultrasonic non-destructive assessment of bonding defects in composite structural strengthening, Composite Structures, 53/2001.
29. Garbacz A., Garboczi E.J. Ultrasonic evaluation methods applicable to polymer concrete composites, Report nr NISTIR 6975, National Institute of Standards and Technology, 2003.
30. Shevaldykin V.G., Samokrutov A.A., Kozlov V.N. Ultrasonic low-frequency short-pulse transducers with dry point contact. development and application, Proc. of the Int. Symp. Non-destructive Testing in Civil Engineering - NDT-CE 2003, Berlin 2003.
31. Taffe A., Krause M., Milmann B., Niederleithinger E., Assessment of foundation slabs with US-echo in the re-use process, CD Proc. of the Int. Conf. on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, ICCRRR 2005, Cape Tawn 2005.
32. Schabowicz K. Ultrasonic tomography – the latest non-destructive technique for testing concrete members – description, test methodology, application example, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 14/2014.
33. Sansalone M., Street W. B. Impact-echo. Nondestructive evaluation of concrete and masonry, Bulbrier Press, Ithaca NY, 1997.
34. Sansalone M., Carino N.J. Detecting honeycombing, the depth of surface-opening cracks and ungrouted ducts using the impact-echo methods, Concrete International, 4/1988.
35. Garbacz, Steinbruch J., Hlaváč Z., Hobst L., Anton O., Defect detection in concrete structures with NDT methods: impact-echo versus radar, the e-Journal of Nondestructive Testing, 2010 (www.ndt.net).
36. Adamczewski G., Garbacz A., Van der Wielen A., Piotrowski T., Courard L. *Zastosowanie metody GPR do oceny jakości zespolenia w układach naprawczych*, CD Proc. 41 Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących, Toruń, 2012.
37. Garbacz A., Harassek P., Van der Wielen A., Piotrowski T. Courard L., Nguyen F., *Diagnostyka konstrukcji betonowych za pomocą impact-echo i radaru*, Konferencja Dni Betonu, Wisła, 2010.
38. Garbacz A., Piotrowski T., Załęgowski, Adamczewski G., UIR-Scanner Potential to Defect Detection in Concrete, Advanced Materials Research 687 (2013), 359–365.
39. Reichling K., Raupach M., Wiggenhauser H., Stoppel M., Dobmann G., Kurz J., BETOSCAN-Robot controlled non-destructive diagnosis of reinforced concrete decks, 7th International Symposium on Non Destructive Testing in Civil Engineering, Nantes (2009). www.ndt.net
40. Piwakowski B., Safinowski P., Non destructive non contact air-coupled concrete evaluation by ultrasound using an automated device, 7th International Symposium on Non Destructive Testing in Civil Engineering, Nantes (2009), www.ndt.net
41. Stawiski B., *Ultradźwiękowe badania betonu i zapraw głowicami punktowymi*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, seria Monografie nr 39, 2009.
42. PN-EN 1504-10. Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych. Definicje, wymagania, sterowanie jakością i ocena zgodności. Stosowanie wyrobów i systemów na placu budowy oraz kontrola jakości prac.
43. PN-EN 1542:2000, Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych. Metody badań. Pomiar przyczepności przez odrywanie.
44. PN-EN 12504-4:2005. Badania betonu. Część 4: Oznaczanie prędkości fali ultradźwiękowej.

#### **APPLICATION OF NONDESTRUCTIVE METHOD FOR ASSESSMENT OF REPAIR EFFICIENCY ACCORDING TO PN-EN 1504**

The European Standard EN 1504-10 gives some guidelines for repair efficiency assessment. According to the standard, the bond strength and quality of bond are the main features of the repair system necessary to be assessed. The pull-off test is commonly used to evaluate bond strength. The use of pull-off test, due to its semi-destructive character, is restricted by owners and managers. Therefore, the elaboration of reliable

nondestructive method for an adhesion mapping could provide a quite advantageous alternative. A majority of NDT methods mentioned in EN 1504-10 for repair efficiency assessment are based on propagation of stress waves. Particularly, ultrasonic methods and impact echo method are recommended. Repair system is difficult to test with NDT methods, because of the many factors influencing the stress wave propagation.

In this paper, the influence of the repair material type (polymer-cement or polymer) and quality of the concrete substrate (roughness, microcracking, not cleaned surface) upon propagation of stress waves in a repair system was discussed in view of application of ultrasonic methods and impact-echo method for a reliable NDT assessment of bond quality in concrete repairs on site.