

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

Wydział Inżynierii Lądowej

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Tomasz Piotrowski

**Zastosowanie analizy sygnału *impact-echo*
do oceny jakości zespolenia w układach naprawczych betonu**

Promotor
dr hab. inż. Andrzej Garbacz

Warszawa, 2009

SPIS TREŚCI

STRESZCZENIE	5
SUMMARY.....	6
WYKAZ SYMBOLI.....	7
1. WPROWADZENIE; GENEZA, TEZA I ZAKRES PRACY	9
1.1. Geneza pracy.....	9
1.2. Teza pracy	12
1.3. Cel pracy	12
2. JAKOŚĆ ZESPOLENIA W UKŁADACH NAPRAWCZYCH.....	14
2.1. Definicja jakości zespolenia.....	14
2.2. Czynniki wpływające na jakość zespolenia w układach naprawczych.....	14
2.3. Metody oceny jakości podłoża betonowego	18
2.4. Przyczepność przy odrywaniu jako miara jakości zespolenia	25
3. METODA <i>IMPACT-ECHO</i> W DIAGNOSTYCE BETONU	29
3.1. Ogólna charakterystyka metody <i>impact-echo</i>	29
3.2. Uwarunkowania detekcji defektów metodą <i>impact-echo</i>	34
3.3. Metody analizy sygnału <i>impact-echo</i>	38
4. PROGRAM I METODA BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH.....	51
4.1. Przedmiot badań.....	51
4.2. Ocena chropowatości podłoża betonowego	54
4.3. Ocena stopnia mikrozarysowania w warstwie przypowierzchniowej podłoża betonowego	55
4.4. Przypowierzchniowa wytrzymałość na rozciąganie podłoża betonowego i przyczepność przez odrywanie	56
4.5. Badanie integralności betonu metodą <i>impact-echo</i>	57
4.6. Statystyczna analiza wyników badań.....	61
5. WYNIKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH.....	66
5.1. Chropowatość podłoża betonowego	66
5.2. Stopień mikrozarysowania w warstwie przypowierzchniowej podłoża betonowego	66
5.3. Wytrzymałość na rozciąganie w warstwie przypowierzchniowej podłoża betonowego	67
5.4. Przyczepność materiału naprawczego do podłoża betonowego	70

5.5. Wpływ jakości podłoża betonowego na przyczepność warstwy naprawczej	73
5.6. Wyniki badań metodą <i>impact-echo</i>	77
5.6.1. Charakterystyka widm częstotliwości.....	77
5.6.2. Analiza falkowa sygnałów <i>impact-echo</i>	84
5.7. Analiza falkowa wyników symulacji komputerowej układów z chropowatą powierzchnią podkładu.....	91
6. ANALIZA ZALEŻOŚCI MIĘDZY PRZYCZEPNOŚCIĄ A PARAMETRAMI OPISUJĄCYMI JAKOŚĆ PODŁOŻA BETONOWEGO I PROPAGACJĘ FALI SPREŻYSTEJ W METODZIE <i>IMPACT-ECHO</i>.....	96
6.1. Amplitudy charakterystycznych pików w widmie częstotliwości.....	96
6.2. Parametry amplitudowe rozkładu amplitudy widm częstotliwości	98
6.3. Parametry rozkładu współczynników falkowych detali	99
6.4. Energia detali	103
6.5. Szacowanie przyczepności w układach naprawczych	106
7. METODA OCENY JAKOŚCI ZESPOLENIA W UKŁADACH NAPRAWCZYCH BETONU PRZY ZASTOSOWANIU ANALIZY SYGNAŁU <i>IMPACT-ECHO</i>.....	117
7.1. Zasada metody	117
7.2. Terminy i definicje.....	117
7.3. Warianty metody.....	118
7.4. Opis metody	119
8. PODSUMOWANIE I WNIOSKI.....	121
LITERATURA	123
ZAŁĄCZNIKI.....	130

STRESZCZENIE

Jakość zespolenia uważana jest za podstawową cechę podlegającą ocenie podczas kontroli jakości naprawy. Wynika to z faktu, że uzyskanie właściwego poziomu adhezji między materiałem naprawczym i podłożem betonowym jest traktowana jako wyznacznik skuteczności naprawy. Ocenę adhezji w układzie naprawczym prowadzi się najczęściej za pomocą seminiszczącej metody oznaczania przyczepności przez odrywanie (*pull-off*). Ostatnio obserwuje się znaczny wzrost zainteresowania badaniami nieniszczącymi betonu. Jedną z najbardziej obiecujących metod tego typu jest metoda *impact-echo*.

W pracy postawiono tezę, że analiza sygnału *impact-echo*, po uwzględnieniu cech podłoża betonowego, pozwala na ocenę jakości zespolenia układu naprawczego i oszacowanie przyczepności warstwy naprawczej do podkładu.

Przeprowadzono badania eksperymentalne na dwóch grupach układów naprawczych, różniących się rodzajem podłoża betonowego oraz stopniem rozwinięcia powierzchni i stopniem mikrozarzysowania warstwy przypowierzchniowej wynikających z zastosowania obróbek powierzchniowych o różnej agresywności. Zróżnicowanie jakości podłoża betonowego potwierdziły przeprowadzone badania przypowierzchniowej wytrzymałości na rozciąganie. Na przygotowane podkłady betonowe nałożono materiały naprawcze i po 28 dniach określono wartość przyczepności materiału naprawczego do podłoża betonowego wykonując badanie *pull-off*. Następnie przeprowadzono badanie metodą *impact-echo* i uzyskane wyniki poddano szczegółowej analizie. Wykorzystano w tym celu zaawansowaną analizę sygnału obejmującą nie tylko uwzględnienie występowania, częstotliwości i amplitudy pików dominujących w widmie częstotliwości, ale także analizę profilu widma częstotliwości i analizę falkową sygnału. Uzyskane wyniki poddano analizie statystycznej, której celem było wyznaczenie parametrów charakteryzujących jakość podłoża betonowego oraz propagację fali sprężystej w układzie naprawczym, niezbędnych do oszacowania przyczepności i określenie ich statystycznej istotności.

Na podstawie przeprowadzonych badań wykazano przydatność w szacowaniu przyczepności w układzie naprawczym, parametrów statystycznych rozkładu amplitudy oraz energii wybranych detali z analizy falkowej sygnału *impact-echo*. Zaproponowano także metodę takiego szacowania. Potwierdzono, że uwzględnienie w analizie sygnału *impact-echo* cech podłoża betonowego wyrażonych takimi parametrami, jak: wskaźnik chropowatości powierzchni i wytrzymałość na rozciąganie w warstwie przypowierzchniowej pozwala na dokładniejszą ocenę jakości zespolenia w układzie naprawczym.

SUMMARY

Bond quality is the main feature of repair system necessary to be assessed. It is due to the fact, that the proper level of adhesion between repair material and concrete substrate is treated as an indicator of repair efficiency. *Pull-off* test is most commonly used for adhesion assessment in repair systems but growing interest in nondestructive techniques in concrete diagnosis is recently noted. *Impact-echo* method is treated as the one of the most promising for this purpose.

The aim of this doctor's thesis is to prove that *impact-echo* signal analysis, after taking into account the concrete substrate quality, is useful in evaluation of repair system bond quality and estimation of bond strength between repair material and concrete substrate.

The experimental program was performed on two groups of repair systems, that were differ in properties, from concrete substrate quality point of view. It was an effect of different classes of compressive strength of concrete substrate and application of different surface preparation methods, influencing on profile development and level of microcracking. The differences in concrete substrate quality were confirmed by surface tensile strength test. On prepared concrete substrates, a repair material was applied and after 28 days, *pull-off* bond strength was measured. Next, the *impact-echo* tests were conducted. Results were analyzed in detail, including not only the presence, frequency and amplitude of dominant peaks in frequency spectrum but also an analysis of frequency profile and wavelet analysis of the signal. The outcomes were statistically analyzed to determine and define the statistical significance of parameters describing quality of concrete substrate and propagation of stress wave in repair system, that are useful in bond strength estimation using *impact-echo* method.

Based on the obtained results, there was stated the usability of statistical parameters describing distribution and energy of details, obtained by *impact-echo* signal wavelet analysis, in bond strength estimation in repair system. The procedure of bond strength estimation using *impact-echo* method was proposed. It was also confirmed, that taking into account the quality of concrete substrate characterized by surface roughness index and surface tensile strength increases the accuracy of bond quality estimation in repair systems.

WYKAZ SYMBOLI

a	- skala w transformacji falkowej
$A, A/B, B$	- oznaczenie typu zniszczenia w badaniu f_h
A_1, A_2	- odległości w zespolonym czujniku dwugłowicowym między: głowicą, miejscem uderzenia i rysą powierzchniową [mm]
$A1, A2, An$	- oznaczenie aproksymacji w DWT
$A1, A2, A3$	- oznaczenie typu zniszczenia w badaniu f_{hs}
Ab	- amplituda charakterystycznego piksu od dna (dolnej płaszczyzny próbki) w widmie częstotliwości
Ai	- amplituda charakterystycznego piksu od powierzchni rozdziału innej niż dno w widmie częstotliwości
β	- współczynnik uwzględniający geometrię próbki w badaniu <i>impact-echo</i> - standaryzowany współczynnik regresji wielorakiej
BSE	- błąd standardowy estymacji
$C(a, b)$	- współczynniki falkowe odpowiadające skali (a) i przesunięciu (b)
CSP	- wzorzec profilu powierzchni betonowej (ang. <i>Concrete Surface Profile</i>)
CWT	- ciągła transformacja falkowa (ang. <i>Continuous Wavelet Transform</i>)
c_p	- prędkość fali podłużnej [m/s]
d	- głębokość występowania powierzchni odbicia fali powierzchniowej (w zależności od kontekstu: powierzchni zespolenia, wady itp.)
d_d	- grubość warstwy zaprawy [mm]
$\bar{d}_{m(n)}$	- wartość średnia odległości punktów pomiarowych od podstawowej linii regresji dla n par wyników
d_i	- całkowita głębokość wiercenia w metodzie <i>pull-off</i> [mm]
d_{max}	- maksymalna głębokość występowania defektu możliwego do wykrycia [mm]
d_{min}	- minimalną głębokość występowania defektu możliwego do wykrycia [mm]
d_{MTD}	- średnica koła w badaniu chropowatości metodą objętościową [mm]
d_{SRI}	- średnica koła w badaniu chropowatości metodą płamy piaskowej [mm]
d_x	- głębokość rysy powierzchniowej [mm]
$D1, D2, Dn$	- oznaczenie detali w DWT
D_f	- średnica próbki w badaniu <i>pull-off</i> [mm]
D_{max}	- maksymalny wymiar ziarna [mm]
DFT	- dyskretna transformacja Fouriera (ang. <i>Discrete Fourier Transform</i>)
DWT	- dyskretna transformacja falkowa (ang. <i>Discrete Wavelet Transform</i>)
D_i, D_{i1}, D_{i2}	- średnica impaktora [mm]
Δ	- częstość próbkowania [s]
Δf_h	- przesunięcie podstawowej krzywej regresji
Δt	- interwał czasu dojścia fali do głowic w zespolonym czujniku dwugłowicowym
EN	- energia
f	- częstotliwość fali [kHz]
f_a	- pseudoczęstotliwość falki [kHz]
f_c	- częstotliwość środkowa falki [kHz]
f_{ck}	- wytrzymałość charakterystyczna betonu na ściskanie [MPa]
f_k	- charakterystyczna wytrzymałość materiałów [MPa]
f_m	- estymator wytrzymałości średniej [MPa]
f_{max}	- maksymalna częstotliwość fali o użytecznej energii [kHz]
f_d	- częstotliwość dominującego piksu w widmie częstotliwości [kHz]
f_h	- zmierzona przyczepność przy odrywaniu [MPa]
$f_{h,IE}$	- przewidywana (oszacowana na podstawie badania <i>impact-echo</i>) przyczepność przy odrywaniu [MPa]

$f_{h,IEmin}$	- przewidywana (oszacowana na podstawie badania <i>impact-echo</i>) minimalna przyczepność przy odrywaniu [MPa]
f_{hs}	- wytrzymałość na rozciąganie w warstwie przypowierzchniowej [MPa]
fb	- częstotliwość charakterystycznego piksu od dna w widmie częstotliwości
fi	- częstotliwość charakterystycznego piksu od powierzchni rozdziału innej niż dno w widmie częstotliwości
F_h	- obciążenie przy zniszczeniu w badaniu f_h [N]
F_{hs}	- obciążenie przy zniszczeniu w badaniu f_{hs} [N]
FFT	- szybka transformacja Fouriera (ang. <i>Fast Fourier Transform</i>)
$IDWT$	- odwrotna transformacja falkowa (ang. <i>Inverse Discrete Wavelet Transform</i>)
k_n	- współczynnik statystyczny
L_{min}	- minimalny wymiar podłużny defektu [m]
L_A	- gęstość rys [mm/mm ²]
λ	- długość fali [m]
λ_{min}	- minimalna długość fali [m]
n_l	- liczba rys na jednostkę powierzchni [liczba/cm ²]
MAD	- średnie odchylenie bezwzględne (ang. <i>Mean Absolute Deviation</i>)
MES	- metoda elementów skończonych
MTD	- średnia głębokość tekstury (ang. <i>Mean Texture Depth</i>)
NDT	- badania nieniszczące (ang. <i>Nondestructive Test</i>)
p	- wartość prawdopodobieństwa w regresji wielorakiej
r	- współczynnik korelacji regresji liniowej
R	- współczynnik korelacji regresji wielorakiej
\bar{R}	- współczynnik odbicia fali sprężystej
R_a	- wytrzymałość średnia [MPa]
R_l	- średnia arytmetyczna odchylenia profilu [mm]
R_L	- współczynnik orientacji rys
R_L	- współczynnik rozwinięcia linii profilu
R_{min}	- wytrzymałość minimalna [MPa]
R_p	- wysokość najwyższego wzniesienia profilu [mm]
R_q	- średnie kwadratowe odchylenie profilu [mm]
R_S	- współczynnik rozwinięcia pola powierzchni przełomu
R_t	- całkowita wysokość profilu [mm]
R_v	- głębokość najniższego wgłębienia profilu [mm]
RG	- zakres (ang. <i>Range</i>)
SD	- odchylenie standardowe (ang. <i>Standard Deviation</i>)
SRI	- wskaźnik chropowatości powierzchni (ang. <i>Surface Roughness Index</i>) [mm]
$STFT$	- okienkowa transformacja Fouriera (ang. <i>Short Time Fourier Transform</i>)
t_{α}, t_{min}	- współczynnik rozkładu t-Studenta dla danego poziomu istotności α
t_c	- czas kontaktu impaktora z powierzchnią
U, u	- użyteczność całkowita i składowa dla danej wielkości wyjściowej
V_{MTD}	- objętość piasku w badaniu chropowatości metodą objętościową [mm ³]
V_{SRI}	- objętość piasku w badaniu chropowatości metodą płamy piaskowej [ml]
Wa	- średnia arytmetyczna rozkładu amplitud widm częstotliwości
Wm	- minimalna wartość rozkładu amplitud widm częstotliwości
Wp	- maksymalna wartość rozkładu amplitud widm częstotliwości
Wt	- maksymalny zakres rozkładu amplitud widm częstotliwości
WFT	- okienkowa transformacja Fouriera (ang. <i>Window Fourier Transform</i>)
X_{lx}	- udział długości projekcji rys w całkowitej szerokości przekroju [mm/cm]
Z	- impedancja akustyczna materiału

1. WPROWADZENIE; GENEZA, TEZA I ZAKRES PRACY

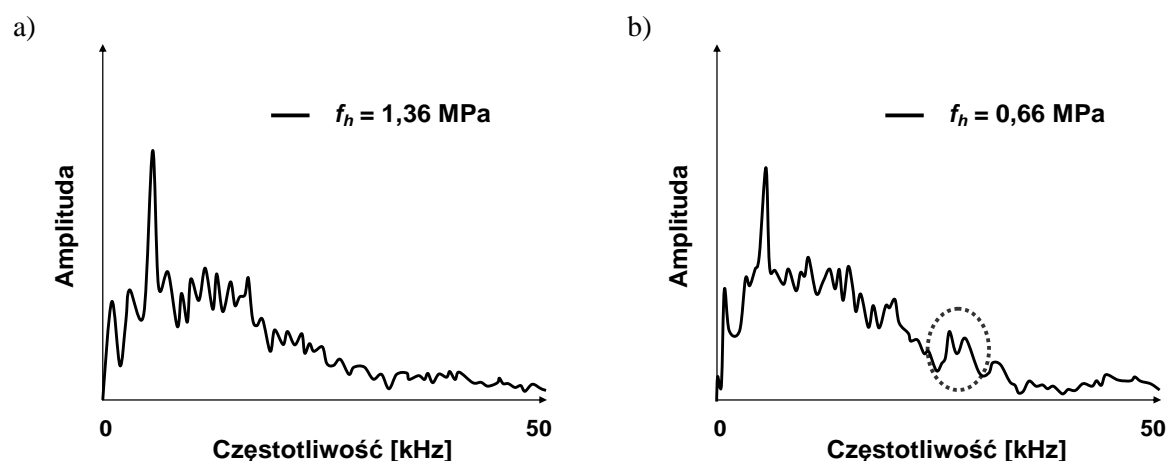
1.1. Geneza pracy

Rozwój technik badawczych oraz informatycznych, umożliwiających analizę dużych zbiorów danych w czasie rzeczywistym sprawia, że ostatnio obserwuje się znaczny wzrost zainteresowania badaniami nieniszczącymi (ang. *Nondestructive Test, NDT*) konstrukcji betonowych [84,88,108], w tym konstrukcji naprawianych [46]. Obserwowany do niedawna stosunkowo niewielki postęp w rozwoju nieniszczących metod badań betonu, wynikał ponadto z większej niejednorodności betonu w porównaniu z takimi materiałami konstrukcyjnymi, jak na przykład stal [62]. Konsekwencją tej niejednorodności jest większa niejednoznaczność interpretacji wyników badań *NDT* betonu, niż ma to miejsce w przypadku metali, czy nawet kompozytów polimerowych zbrojonych włóknem [2]. Z tego względu też bezpośrednie wykorzystanie do badań betonu procedur opracowanych dla innych materiałów jest trudne i nie efektywne. Obecnie trwają zatem poszukiwania alternatywnych metod badań nieniszczących oraz sposobów interpretacji wyników.

We wprowadzonej w 2005 normie europejskiej o statusie normy polskiej PN-EN 1504 10 jakość zespolenia uważana jest za podstawową cechę podlegającą kontroli jakości niezależnie od stosowanej metody naprawy. Wynika to z faktu, że uzyskanie właściwego poziomu adhezji między materiałem naprawczym i podłożem betonowym jest traktowana jako wyznacznik skutecznej naprawy [35]. Ocenę adhezji w układzie naprawczym prowadzi się najczęściej za pomocą semi-niszczącej metody oznaczania przyczepności przez odrywanie (powszechnie znanej jako metoda *pull-off*). Na obiekcie metoda ta stosowana jest zwykle w ograniczonym zakresie, gdyż powoduje konieczność lokalnej naprawy w miejscu badania. Utrata ciągłości warstwy naprawczej po badaniu niszczącym może również niekorzystnie wpływać na trwałość naprawy. Z tego względu w wielu ośrodkach rozpoczęto badania ukierunkowane na opracowanie nieniszczącej metody oceny jakości zespolenia.

Prace badawcze nad nieniszczącymi metodami oceny skuteczności napraw prowadzone w Katedrze Inżynierii Materiałów Budowlanych można zaliczyć do prekursorskich w tym zakresie [37]. Jedną z najbardziej obiecujących metod w dziedzinie badań nieniszczących betonu jest metoda *impact-echo*. Została ona opracowana przez Sansalone i Carino w 1986 roku [92]. W wydanej w 1997 roku monografii pt. *Impact-echo – Nondestructive evaluation of concrete and masonry* autorstwa Sansalone i Streett [97], zebrano doświadczenia z dziesięciu lat stosowania tej metody w diagnostyce betonu. Jeden z rozdziałów poświęcony jest ocenie jakości zespolenia (*Bond quality at internal interfaces*). We wstępie stwierdzono,

że numeryczne i eksperymentalne badania dowodzą, iż metoda *impact-echo* jest efektywną metodą identyfikacji powierzchni rozdziału między materiałami o współczynniku odbicia $R < 0,24$ (gdy $R \geq 0,24$ powierzchnię rozdziału można wykryć niezależnie od jakości zespolenia) oraz delaminacji przekraczających swoimi wymiarami pewną wielkość, zależną od długości fali, ale **nie niesie ona żadnej informacji o przyczepności warstwy naprawczej do podłoża betonowego***. Stwierdzenie to oparto na wynikach badań prowadzonych przez Lin i in. [65], którzy analizowali zależność między przyczepnością a wynikami *impact-echo*. Na podstawie analizy widm częstotliwości stwierdzili oni, że widma otrzymane w badaniu w miejscach o zróżnicowanej przyczepności nie wykazują istotnych różnic, zarówno w przypadku badań próbek laboratoryjnych (Rys.1), jak i badań na rzeczywistym obiekcie. Podobieństwo to dotyczy przede wszystkim obecności i częstotliwości dominującego pików w widmie częstotliwości, odpowiadającego odbiciu fali sprężystej od przeciwległej powierzchni elementu. Dokładniejsza obserwacja pozostałego zakresu widma w zakresie wyższych częstotliwości, odpowiadających ewentualnemu oddziaływaniu fali z powierzchnią rozdziału, wskazuje jednak na pewne różnice. W przypadku prowadzenia badań *impact-echo* w punktach, gdzie uzyskano mniejszą przyczepność warstwy naprawczej do podłoża, można zaobserwować bardziej nieregularne widmo częstotliwości oraz obecność dodatkowych pików w obszarze wyższych częstotliwości (Rys.1b), które mogą być związane z odbiciem fali od powierzchni zespolenia. Ponadto, może to świadczyć o wpływie takich czynników jak chropowatość i mikrozarysowanie warstwy przypowierzchniowej, np. będących efektem stosowania „agresywnych” obróbek powierzchniowych [36,101,102] nie tylko na przyczepność, ale także na propagację fali sprężystej.



Rys.1. Widma częstotliwości w przypadku badań próbek o zróżnicowanej przyczepności, f_h wykonanych w laboratorium wg [65]

* podkreślenie autora rozprawy

Rozpatrując przydatność metody *impact-echo* do oceny jakości zespolenia układu naprawczego istotne jest przeanalizowanie jak czynniki wpływające na jakość zespolenia (por. rozdział 2.2) wpływają na propagację fali sprężystej (Tab.1). Analiza tej zależności stanowi jeden z głównych celów tej pracy.

Tab.1. Zestawienie analizowanych w pracy czynników odnoszących się do charakterystyki podłoża betonowego wpływających na jakość zespolenia i na propagację fali sprężystej

lp.	Czynnik	Wpływ na jakość zespolenia	Istotność wg [102]	Wpływ na propagację fali sprężystej	Istotność wg autora rozprawy
1	Mikrozarysowanie	Generalnie obniża jakość zespolenia; w przypadku gdy możliwa jest penetracja materiału naprawczego w podłoże ten niekorzystny wpływ może być zminimalizowany	3	Pojedyncze rysy o wymiarach poniżej granicy wykrywalności danej metody (zależność od długości fali) nie wpływają na propagację fali, natomiast ich skumulowanie może objawiać się rozpraszaniem lub odbiciem fali od powierzchni rozdziału między warstwą bez rys, a warstwą silnie mikrozarzysowaną	2 (por. rozdział 5.5)
2	Chropowatość	Jest czynnikiem wzmacniającym efekt mechanicznego łączenia warstw układu, co wpływa pozytywnie na jakość zespolenia, jednak zbyt duże rozwinięcie powierzchni może utrudniać penetrację materiału naprawczego i powodować powstawanie pustek powietrznych oraz obniżyć jakość zespolenia	1	Generalnie chropowatość powoduje rozproszenie fali sprężystej; jeśli dodatkowo występują pustki powietrzne między materiałem naprawczym a podłożem, np. przy dużej chropowatości, efektem może być nawet odbicie fali	3 (por. rozdział 5.5)
3	Wytrzymałość na ściskanie podłoża betonowego	Podnosi przyczepność pod warunkiem odpowiedniego przygotowania podłoża i doboru materiału naprawczego	1	Wzrost prędkości fali ze wzrostem wytrzymałości	1 (por. rozdział 5.6)

Skala istotności: 1 – mało istotne, 2 – średnio istotne, 3- bardzo istotne

1.2. Teza pracy

W pracy postawiono następującą tezę:
analiza sygnału *impact-echo*, po uwzględnieniu cech podłoża betonowego, pozwala na ocenę jakości zespolenia układu naprawczego i oszacowanie przyczepności warstwy naprawczej do podkładu.

1.3. Cel pracy

Celem pracy było opracowanie metody interpretacji sygnałów rejestrowanych w metodzie *impact-echo* i wykazanie skuteczności tej metody w ocenie jakości zespolenia układów naprawczych i szacowaniu przyczepności warstw do podłoża betonowego. Wykorzystano w tym celu zaawansowaną analizę sygnału obejmującą nie tylko uwzględnienie występowania, częstotliwości i amplitudy pików dominujących w widmie częstotliwości, ale także analizę profilu widma częstotliwości i analizę falkową sygnału. Uzyskane wyniki poddano analizie statystycznej, której celem było wyznaczenie parametrów charakteryzujących jakość podłoża betonowego oraz propagację fali sprężystej w układzie naprawczym, niezbędnych do oszacowania przyczepności i określenie ich statystycznej istotności. Inspiracją do podjęcia tego tematu były wyniki pracy magisterskiej autora niniejszej rozprawy pt. *Effect of concrete substrate quality on stress wave propagation in repair systems*, powstałej w ramach projektu badawczego realizowanego w latach 2000-2005 w Instytucie GEOMAC na Uniwersytecie w Liege pod kierunkiem Luc Courard wpisanego do umowy między Rządami Polski i Walonii (Belgia), pt. *Characterization of adhesion of repairs systems on concrete*. Głównym celem tego projektu była analiza wpływu na przyczepność parametrów charakteryzujących jakość podłoża betonowego, a w szczególności chropowatości, mikrozarzysowania i wytrzymałości na ściskanie. Na podstawie przeprowadzonych badań metodą *impact-echo* modelowych układów naprawczych stwierdzono występowanie pewnych różnic w parametrach opisujących propagację fali sprężystej w zależności od jakości podłoża betonowego. Przeprowadzona wówczas analiza statystyczna nie wykazała jednak istnienia statystycznie istotnych zależności między jakością zespolenia wyrażoną przyczepnością przez odrywanie, a poszczególnymi parametrami opisującymi jakość podkładu betonowego oraz propagacją fali sprężystej. Na tej podstawie stwierdzono, że do szacowania poziomu przyczepności należy zastosować bardziej zaawansowaną analizę sygnału niż dotychczas stosowana standardowa analiza widm częstotliwości.

Idea ta była rozwijana w realizowanym w Katedrze Inżynierii Materiałów Budowlanych Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej w latach 2004-2006 grantie MNiI pt. *Wykorzystanie analizy falkowej do oceny przyczepności w układach naprawczych* (kierownik projektu Andrzej Garbacz). Autor rozprawy był jednym z jego wykonawców oraz współautorem raportu końcowego [49], w którym potwierdzono możliwość wykorzystania analizy falkowej do nieniszczącej oceny jakości zespolenia. Niniejsza rozprawa doktorska stanowi podsumowanie prac badawczych autora rozprawy w tym zakresie.

Oryginalność proponowanego rozwiązania wynika z zastosowania do interpretacji wyników badań nieniszczących zaawansowanych metod analizy sygnałów, ukierunkowanych na ocenę jakości zespolenia i oszacowanie przyczepności warstwy naprawczej do pokładu betonowego. W literaturze, oprócz wspomnianej we wprowadzeniu publikacji Sansalone i Street [97], brak jest prac na temat zastosowania metody *impact-echo* do oceny poziomu przyczepności warstwy naprawczej do podłoża betonowego jako wyznacznika skuteczności napraw. Opracowana w rozprawie metoda szacowania przyczepności może zostać zastosowana w diagnostyce jakości zespolenia układów naprawczych.

2. JAKOŚĆ ZESPOLENIA W UKŁADACH NAPRAWCZYCH

2.1. Definicja jakości zespolenia

Jakość można zdefiniować jako pewien stopień doskonałości, czyli zespół cech charakteryzujących przydatność danego wyrobu do spełnienia przeznaczenia użytkowego, zgodnie z wymaganiami stawianymi przez odbiorców, np. niezawodność, sprawność, trwałość [73]. Również w serii norm ISO 9000 dotyczących systemów zarządzania jakością jest ona opisana jako stopień, w jakim zbiór inherentnych właściwości spełnia wymagania. W ocenie jakości uwzględnia się cechy obiektywne - mierzalne (ocena ilościowa) oraz subiektywne - niemierzalne (ocena jakościowa). Opis ilościowy polega na przyporządkowaniu cechom obiektu wyników pomiaru, wyrażających się iloczynem obiektywnej jednostki miary przez liczbę określającą, ile razy ta jednostka miary mieści się w mierzonej wielkości. Ocena jakościowa polega na oszacowaniu pewnej właściwości w skali względnej i jest stosowana, kiedy wiedza wynika z doświadczenia trudnego do liczbowego oszacowania, np. w opiniach eksperckich. Często ocena jakościowa jest wstępnym etapem przed przeprowadzeniem badań eksperymentalnych i dokonaniem oceny ilościowej na podstawie uzyskanych wyników. Koncepcję jakościowej i ilościowej oceny zespolenia w odniesieniu do napraw betonu dobrze odzwierciedla podejście prezentowane przez Sansalone i Street [92]. Założyli oni, że jakość zespolenia (*bond quality*) opisują dwie ważne charakterystyki:

- wskazanie obszaru, gdzie warstwy układu naprawczego nie są zespolone (ocena jakościowa),
- wartość przyczepności przez odrywanie (ocena ilościowa).

2.2. Czynniki wpływające na jakość zespolenia w układach naprawczych

Naprawa budowli lub jej elementu to złożony, wieloetapowy sposób postępowania mający na celu skuteczne, całkowite lub częściowe przywrócenie wyjściowego lub wymaganego projektem stanu użytkowania, zakłóconego na skutek złego wykonania (usterki) lub uszkodzenia fragmentów konstrukcji podczas jej użytkowania [35]. Czarnecki i Emmons w monografii *Naprawy i ochrony konstrukcji betonowych* [35] wskazują szereg czynników warunkujących skuteczność i trwałość naprawy. Jednym z najistotniejszych jest odpowiedni dobór materiału naprawczego. Powinien on zapewnić dobrą współpracę wszystkich komponentów układu. Podstawę stanowi sformułowana przez Czarneckiego [39] zasada kompatybilności, czyli taki *dobór, pod względem właściwości chemicznych i fizycznych,*

elektrochemicznych oraz cech barierowych elementów układu naprawianego, aby zapewniał on nie przekraczanie dopuszczalnych naprężeń i/lub odkształceń w żadnej części układu, w przewidywanym czasie i warunkach użytkowania. Prowadzi to do konieczności analizy wielowymiarowej przestrzeni dobrej współpracy w układzie naprawczym [39]. Lepsza jakość zespolenia i wynikające z niej zwiększenie przyczepności warstwy naprawczej do podłoża betonowego traktowane jest jako czynnik zwiększający tolerancję na pewną niekompatybilność układu naprawczego [25,38]. Zapewnienie właściwej jakości zespolenia jest więc podstawowym wymaganiem przy wykonywaniu naprawy.

Jakość zespolenia jest często utożsamiana z adhezją, zjawiskiem polegającym na przywieraniu (przyleganiu) różnych materiałów do siebie [20,32]. Wyróżnia się [21,42,98]:

- adhezję związaną z oddziaływaniami chemicznymi i fizykochemicznymi (tzw. adhezja właściwa), w przypadku podłoża betonowych siły te mają najczęściej charakter wiązań chemicznych drugiego rzędu (wiązania wodorowe i van der Waalsa);
- adhezję mechaniczną związaną z mechanicznym zakotwieniem materiału naprawczego w porach i nierównościach podłoża betonowego; tego rodzaju adhezja ma największe znaczenie w odniesieniu do najczęściej stosowanych materiałów naprawczych do betonu.

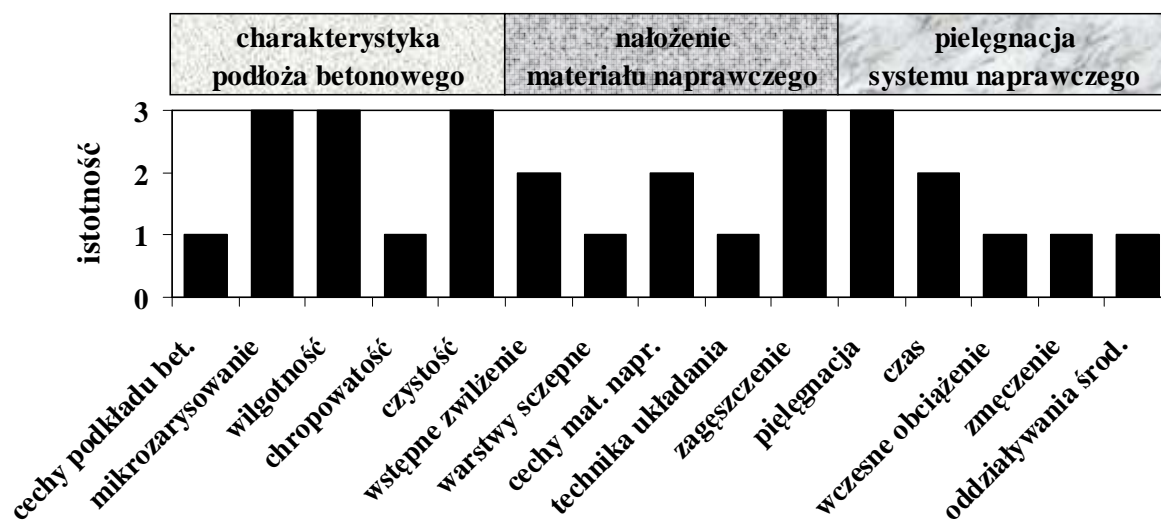
Do najważniejszych czynników kształtujących poziom adhezji (właściwej i mechanicznej) w układach naprawczych można zaliczyć [26,32,34,50,69,101]:

- wytrzymałość mechaniczną podłoża, zawartość w nim wilgoci i zanieczyszczeń;
- stopień rozwinięcia powierzchni, mikrorysy, porowatość podłoża;
- właściwości fizyczne łączonych materiałów (lepkość, zwilżalność, skurcz wiązania, rozszerzalność cieplna, moduł sprężystości, pełzanie);
- niejednorodność materiałów, defekty wewnętrzne;
- mechanizmy transportu w obszarze warstwy przejściowej (osmoza, dyfuzja);
- fluktuacje temperatury wywołujące zmiany właściwości materiałów i powodujące powstawanie naprężeń w obszarze przejściowym pomiędzy warstwami;
- zjawiska związane z destrukcją materiałów np. starzenie powłok, zmydlanie polimerów.

Proces naprawy można podzielić na trzy etapy: przygotowanie powierzchni podłoża betonowego, nałożenie materiału naprawczego i pielęgnację po naprawie. Dążenie do stworzenia warunków do uzyskania możliwie największej przyczepności między materiałem

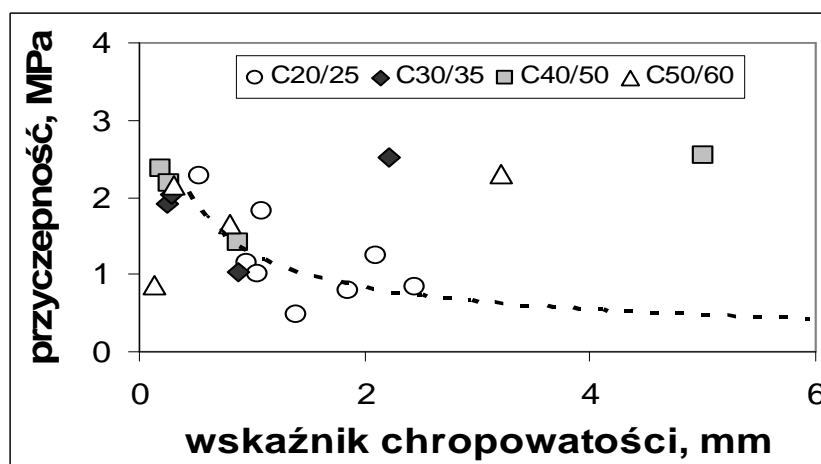
naprawczym, a podłożem betonowym znajduje odzwierciedlenie zarówno we wspomnianej normie PN-EN 1504-10, jak i w wytycznych producentów systemów naprawczych odnośnie przygotowania podłoża betonowego przed nakładaniem materiału naprawczego. W celu uzyskania jakości powierzchni podłoża betonowego właściwej dla danego rodzaju materiału naprawczego zalecane jest stosowanie odpowiedniej obróbki powierzchniowej [20,22,70,101].

Na każdym z etapów naprawy różnorodne czynniki mogą w istotny sposób wpływać na jakość zespolenia. Silfwerbrand przyporządkował te czynniki do poszczególnych etapów i przypisał im kategorie ważności w skali od 1 do 3 [102]. Według niego, aż trzy z pięciu najistotniejszych czynników dotyczy charakterystyki podłoża betonowego (Rys.2), będącej głównie wynikiem jego przygotowania. Jako pozostałe dwa czynniki o najwyższym stopniu istotności wskazał on zagęszczenie materiału naprawczego w trakcie nakładania oraz jego późniejszą pielęgnację.



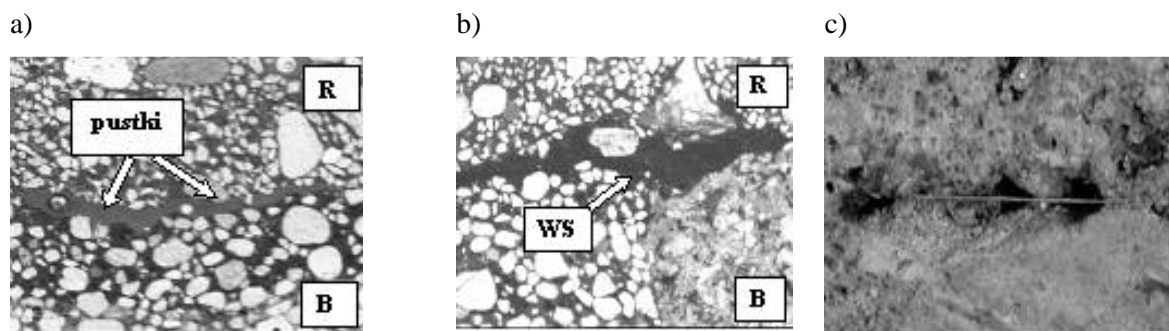
Rys.2. Kategorie istotności czynników wpływających na przyczepność materiału naprawczego do podkładu betonowego wg Sifwerbrand [102]

Wpływ stopnia rozwinięcia, wynikający z zastosowanej obróbki powierzchni betonu, na przyczepność jest niejednoznaczny [50,103]. Tekstura powierzchni może zależeć od takich czynników jak: wytrzymałość podłoża betonowego [29,99], czy wielkość i rodzaj kruszywa [100]. Badania prowadzone m.in. na Politechnice Warszawskiej we współpracy z Uniwersytetem w Liege, a także na Politechnice Poznańskiej (Rys.3) wskazują, że wzrost chropowatości powierzchni jest korzystny w przypadku podkładów wykonanych z betonów wyższych klas wytrzymałości [29,99]. Przeciwną tendencję obserwuje się w przypadku betonów niższych klas wytrzymałości, gdyż obróbki dające większą chropowatość powodują jednocześnie większe uszkodzenie przypowierzchniowej warstwy betonu (mikrozarysowanie) [19].



Rys.3. Zmiana przyczepności ze wzrostem wskaźnika chropowatości podkładów betonowych różnych klas wytrzymałości poddanych obróbkom powierzchniowym o zróżnicowanej agresywności [52]

Chropowatość powierzchni po obróbce powinna być wzięta pod uwagę przy doborze materiału naprawczego. Zbyt mała urabialność zaprawy może powodować niecałkowite wypełnienie przez nią nierówności powierzchni powodując spadek przyczepności (Rys.4a). Mała urabialność zapraw jest często wynikiem obecności zbrojenia rozproszonego (np. mikrowłókien szklanych) jako dodatku obniżającego ich skurcz utwardzania. Jeśli odległość między pikami profilu jest mniejsza niż długość włókien obserwuje się blokowanie ich na nierównościach powierzchni, utrudniające wypełnienie tych miejsc zaprawą (Rys.4c), i w konsekwencji obniżenie jakości zespolenia. W takim przypadku często zaleca się stosowanie warstwy szepnej wypełniającej nierówności powierzchni i zwiększającej adhezję mechaniczną (mechaniczne klinowanie) [36,80]. Dodatkowo zmniejsza ona skutki stosowania agresywnych obróbek wypełniając większe pęknięcia i wiążąc fragmenty betonu luźno związane z podkładem (Rys.4b). Nierzadkie są jednak opinie (np. Silfwerbrand i Paulson [103]), że należy unikać stosowania warstw szepnych ze względu na tworzenie dodatkowej „słabej” powierzchni rozdziału, a także trudność w dotrzymaniu czasów technologicznych, przewidywanych dla danego systemu naprawczego, w warunkach budowy.



Rys.4. Przykładowe widoki płaszczyzny zespolenia dla układu naprawczego (a) bez warstwy szepnej i (b) z warstwą szepną, w których podkład betonowy poddano frezowaniu mechanicznemu; (c) przykład pustek powstających w wyniku blokowania mikrowłókien szklanych na nierównościach powierzchni podkładu betonowego poddanego piaskowaniu; R- materiał naprawczy, B – podkład betonowy, WS – warstwa szepna [48]

Wielość czynników wpływających na przyczepność w układach naprawczych sprawia, że w wyjaśnianiu ich roli stosuje się coraz częściej narzędzia inżynierii powierzchni betonu, umożliwiającymi znalezienie miarodajnych wskaźników opisujących jakość podłoża betonowego [24,26,54].

2.3. Metody oceny jakości podłoża betonowego

Kompleksowe ujęcie zagadnienia napraw i ochrony konstrukcji betonowych – od definicji do wykorzystania materiałów i systemów na placu budowy - zawarto w serii 10-ciu norm PN-EN 1504 pod ogólnym tytułem *Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji z betonu*. Prezentują one stan wiedzy i techniki w zakresie napraw konstrukcji betonowych [40] i mogą być traktowane jako wytyczne postępowania przy naprawach konstrukcji betonowych. W wielu ośrodkach kontynuowane są prace w tym obszarze. Wynika to z wdrażania do praktyki nowych rodzajów materiałów naprawczych, a także różnorodności naprawianego betonu, np. naprawy konstrukcji z betonów wysokowartościowych [30].

Ogólne zasady stosowania materiałów i systemów do napraw i ochrony betonu przedstawiono w normie ENV 1504-9. Wiele z tych zasad realizowane jest metodami związanymi z nakładaniem zaprawy i/lub betonu (Tab.2).

Tab.2. Zasady i metody naprawy odnoszące się do napraw konstrukcyjnych i niekonstrukcyjnych oraz ochrony powierzchniowej wg EN 1504-9

Zasada naprawy		Metoda naprawy	
Nr	Opis	Nr	Opis
3.	Odbudowanie elementu betonowego	3.1.	Ręczne nakładanie zaprawy naprawczej
		3.2.	Nadłożenie warstwy betonu
		3.3.	Natryskiwanie betonu lub zaprawy
4.	Wzmacnianie konstrukcji	4.4.	Dodanie warstwy zaprawy lub betonu
5.	Odporność fizyczna/ wzmacnianie powierzchni	5.1.	Warstwy lub powłoki ochronne
6.	Odporność chemiczna	6.1.	Warstwy lub powłoki ochronne
7.	Utrzymanie/przywrócenie stanu pasywnego	7.1.	Zwiększenie grubości otuliny przez dodanie zaprawy lub betonu
		7.2.	Wymiana skażonego betonu

W tych metodach przygotowanie naprawianego podłoża jest podstawową operacją technologiczną naprawy warunkującą jej skuteczność. Znaczenie właściwej jakości podłoża podkreślono w normie PN-EN 1504-10, gdzie stwierdzono, że przygotowanie powierzchni (Tab.3) 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.*

Tab.3. Metody oczyszczania, uszorstniania i usuwania betonu wg PN-EN 1504-10

	Metoda	Cel
Oczyszczanie	<ul style="list-style-type: none"> – mechaniczne, przez młotkowanie i ścieranie – oczyszczanie strumieniowo-ściernie – oczyszczanie strumieniem wody o niskim ciśnieniu, do ok. 18 MPa lub do ok. 60 MPa w przypadku ograniczeń w ilości wody 	<p>Podłoże powinno być wolne od pyłu, luźnych fragmentów materiału, zanieczyszczeń oraz materiałów zmniejszających przyczepność lub uniemożliwiających zwilżanie przez materiały naprawcze;</p> <p>Oczyszczony podkład należy chronić przed dalszym zanieczyszczeniem</p>
Uszorstnienie	<ul style="list-style-type: none"> – mechaniczne, przez młotkowanie i ścieranie – oczyszczanie strumieniowo-ściernie – oczyszczanie strumieniem wody o wysokim ciśnieniu, do ok. 60 MPa 	<p>Uzyskanie tekstury uszorstnionej powierzchni odpowiedniej dla stosowanych wyrobów i systemów</p> <p>Należy określić teksturę uszorstnionej powierzchni zgodnej wymaganiami producenta wyrobów</p>
Usuwanie	<ul style="list-style-type: none"> – Mechaniczne, przez młotkowanie – Oczyszczanie strumieniem wody o wysokim ciśnieniu, do ok. 60 MPa i o bardzo wysokim ciśnieniu, do 110 MPa 	<p>Słaby, uszkodzony i zniszczony beton, a tam, gdzie to konieczne, także beton nieuszkodzony powinien być usunięty zgodnie z zasadą i metodą wybraną według normy ENV 1504-9.</p>

Wybór metody obróbki powierzchni przed naprawą powinien być zawsze powiązany z uwzględnieniem zarówno efektów pozytywnych (uzyskanie właściwej chropowatości), jaki i negatywnych (wzrost mikrozarysowania warstwy przypowierzchniowej). Z tego też względu kontrola jakości podłoża betonowego przed i po przygotowaniu jest istotnym elementem kontroli jakości prac związanych ze stosowaniem wyrobów i systemów na placu budowy (Tab.4).

Tab.4. Badania i obserwacje w ramach kontroli stanu podłoża przed i/lub po przygotowaniu dla metod naprawy związanych z nakładaniem zaprawy i betonu wg PN-EN 1504-10

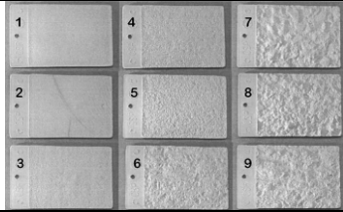

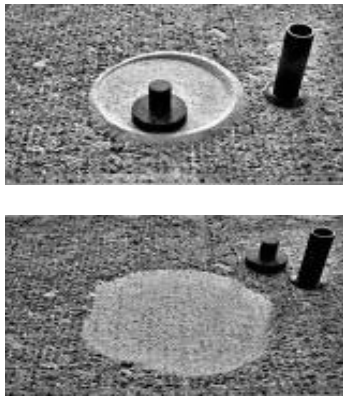
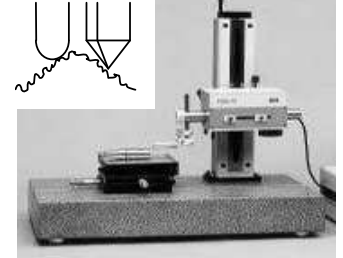
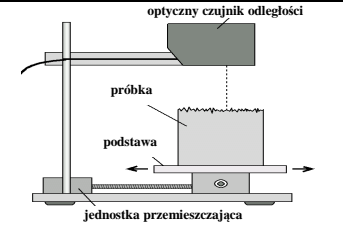
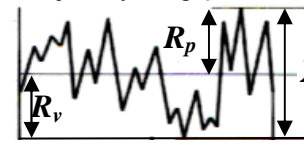
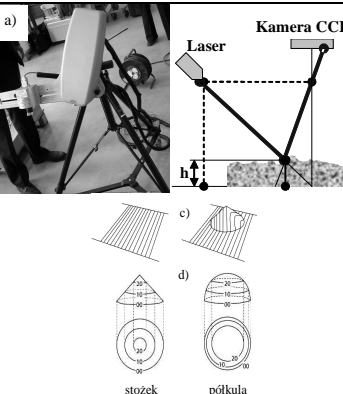
Nr badania /obserwacji	Cecha	Metoda badania lub obserwacja	Wymaganie	Norma
1	Odspojenia	Uderzanie młotkiem (T)	■	
2	Czystość	Wizualnie (O) Badanie wycierania (T)	■	
4	Szorstkość	Wizualnie (O) Metoda piaskowa (T) Badanie profilometrem (T)	◆	PN- EN 1766 PN-EN ISO 3274 PN-EN ISO 4288
5	Przypowierzchniowa wytrzymałość na rozciąganie podłoża	Badanie <i>pull-off</i> (T)	◆	PN-EN 1542
7	Odkształcenia rysy	Czujnik mechaniczny lub elektryczny (O)	□	
8	Zakres drgań	Akcelerometr (O)	□	
10	Temperatura podłoża	Termometr (O)	■	
11	Skarbonatyzowanie	Pomiar wskaźnikiem fenoloftaleinowym (T)	□	PN-EN 14630
12	Zawartość chlorków	Pobranie próbki i analiza chemiczna (T)	□	PN-EN 14629
13	Zawartość innych zanieczyszczeń	Pobranie próbki i analiza chemiczna (T)	□	
15	Oporność elektryczna	Metoda Wennera (T)	□	
36	Wytrzymałość na ściskanie	Badanie mechaniczne rdzenia (T) Pomiar liczby odbicia (T)	◆	PN-EN 12504-1 PN- EN 12504-2

■ - dla wszystkich przewidywanych zastosowań; ◆ - dla niektórych spośród przewidywanych zastosowań, jeśli wymagają tego warunki stosowania; □ - dla zastosowań specjalnych.
T: badanie O: obserwacja

Norma PN-EN 1504-10 w części dotyczącej uszorstnienia zamieszcza dodatkowe wymaganie dotyczące określenia tekstury powierzchni, która powinna być odpowiednia dla stosowanych wyrobów i systemów. Przywołuje ona trzy metody oceny szorstkości powierzchni: wizualną, profilometrię i metodę piaskową.

Do niedawna metoda wizualna, umożliwiająca ocenę jakościową tekstury powierzchni, była najpowszechniej stosowana na placu budowy. Celem ograniczenia subiektywności tej metody *International Concrete Repair Institute* (Tab.5) wprowadził wzorce profilu powierzchni betonu (ang. *Concrete Surface Profile – CSP*). Stanowią one obraz odniesienia powierzchni betonowej poddawanej mechanicznej obróbce powierzchniowej. Ocenę ilościową powierzchni można uzyskać stosując metodę piaskową lub profilometrię.

Tab.5. Metody oceny szorstkości powierzchni podłoża betonowego przed naprawą [28,83]

Metoda	Szczegóły		Wynik
Ocena wizualna	<p>Metoda porównawcza wg ICRI odniesienie do wzorców profilu dla różnych obróbek powierzchniowych</p>		<p>Profile Powierzchni Betonu (Concrete Surface Profiles) CSP 1 do 9</p>
	Metody piaskowe	<p>Metoda płamy piaskowej wg PN-EN 1766 pomiar średnicy d_{SRI} [mm] płamy piasku o określonej objętości V_{SRI} [ml]</p>	
<p>Pomiar głębokości makrotekstury metodą objętościową wg PN-EN 13036-1 pomiar średnicy koła d_{MTD} [mm] pokrytego materiałem ziarnistym (kulki szklane $0,18 \div 0,25$ mm) o określonej objętości V_{MTD} [mm³]</p>			$SRI = \frac{V_{SRI}}{d_{SRI}^2} \cdot 1272 [mm]$ <p>lub</p> $SRI = \frac{31800}{d_{SRI}^2},$ <p>gdzie $V_{SRI} = 25ml$</p>
Profilometria	<p>Profilometria mechaniczna rejestrwanie zmiany położenia w pionie i poziomie przesuwanego się po powierzchni rysika, czułość tej metody zależy od średnicy główki rysika – im mniejsza średnica tym większa dokładność</p>		<p>Parametry profilu chropowatości wg PN-EN ISO 4287</p>
	<p>Profilometria laserowa pomiar odległości między badaną powierzchnią a emitorem wiązki laserowej na podstawie różnicy czasu emisji wiązki i jej rejestracji</p>		<p>R_p - wysokość najwyższego wzniesienia profilu R_v - głębokość najniższego wgłębienia profilu R_t - całkowita wysokość profilu (między szczytem najwyższego wzniesienia a najniższym wgłębieniem)</p> 
	<p>Optomorfologia odmiana techniki laserowej, wykorzystująca projekcję prążków Moire'a, emitowana wiązka promieni lasera jest rejestrowana za pomocą kamery CCD i z reguły podobieństwa trójkątów obliczana jest wysokość punkcie</p>		<p>R_a - średnie arytmetyczne odchylenie profilu</p> $R_a = \frac{1}{l} \int_0^l y(x) dx$ <p>R_q - średnie kwadratowe odchylenie profilu</p> $R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l y^2(x) dx}$

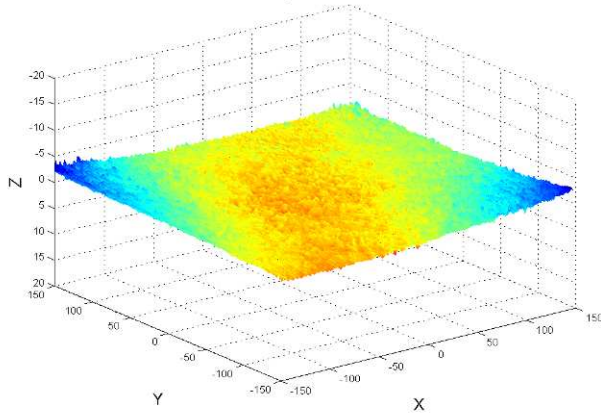
Metoda piaskowa oparta jest na pomiarze głębokości makrotekstury powierzchni metodą objętościową. Polega ona na ostrożnym rozprowadzeniu znanej objętości materiału ziarnistego na nawierzchni i obliczeniu całkowitej powierzchni nim pokrytej. W podobny sposób ocenia się chropowatość powierzchni nawierzchni drogowych i lotniskowych. Metoda ta nie dostarcza natomiast informacji o innych parametrach profilu, które mogą być istotne przy opracowaniu projektu naprawy, np. oszacowania objętości materiału naprawczego.

Drugą metodą pomiaru chropowatości jest profilometria. Wyróżniamy profilometrię mechaniczną [50] i optyczną [43,47,68]. Profilometr mechaniczny składa się z rysika, który jest przesuwany po powierzchni, a jego zmiana położenia w pionie i w poziomie jest rejestrowana przez komputer tworząc profil powierzchni. Zasada działania profilometru optycznego opiera się na pomiarze odległości między emitерem wiązki laserowej lub światła białego a powierzchnią na podstawie różnicy czasu wyjścia i przyjścia, a w niektórych rozwiązaniach także kąta padania (optomorfologia) [28,99]. Skanowanie powierzchni wzdłuż linii równoległych oddalonych od siebie o stałą odległość pozwala uzyskać jej trójwymiarową wizualizację. Obecnie opracowano profilometry umożliwiające uzyskanie obrazu powierzchni na placu budowy [99].

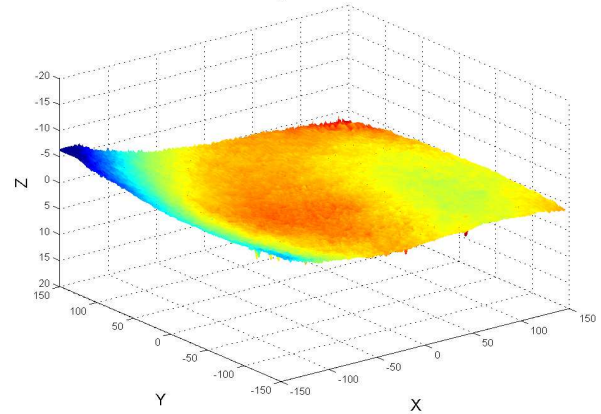
Do opisu cech geometrycznych obrazu zarejestrowanej powierzchni (por. Tab.5) stosuje się parametry amplitudowe [27,99], które ujęto w normie PN-EN ISO 4287. Stosowane są również parametry faktograficzne, takie jak współczynniki rozwinięcia powierzchni, R_S lub profilu, R_L [36]. Badania Siewczyńskiej [99] wskazują, że ze względu na znaczny rozrzut wartości, parametry amplitudowe są mniej przydatne do charakteryzowania stopnia rozwinięcia powierzchni betonu niż parametry faktograficzne.

Badania przeprowadzone na Politechnice Warszawskiej we współpracy z Uniwersytetem w Liege [47] wskazują jednak, że istnieje korelacja między parametrami amplitudowymi i parametrami wyznaczonymi innymi metodami. Dotyczy to przede wszystkim parametrów charakteryzujących średnie odchylenie od linii profilu. Między innymi stwierdzono, że rekomendowany w normie PN-EN 1504-10 test piaskowy daje dobre oszacowanie uśrednionego profilu chropowatości. Podobną zależność uzyskał autor rozprawy. Dla trójwymiarowych obrazów powierzchni próbek podłoży betonowych C40/50 po obróbce (Rys.5), które uzyskano w wyniku pomiaru chropowatości za pomocą optomorfologicznego profilometru laserowego, obliczono wg PN-EN ISO 4287 amplitudowe parametry struktury geometrycznej powierzchni [28], a następnie porównano je z wynikami testu piaskowego (Rys.6).

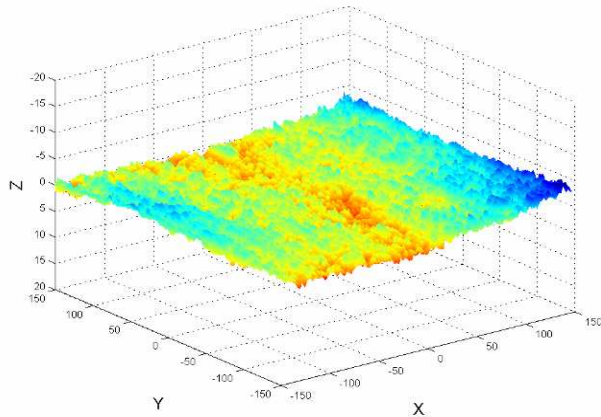
a) C40-PL



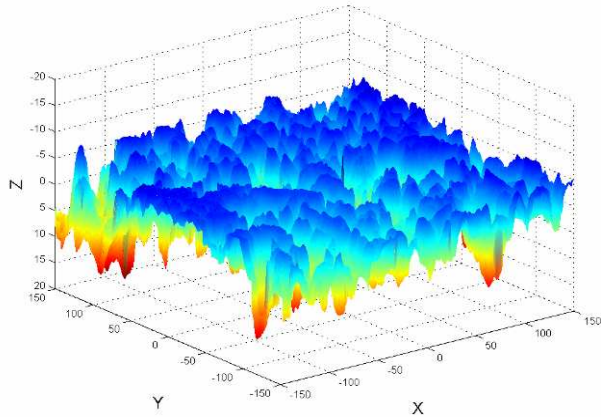
b) C40-SB-D



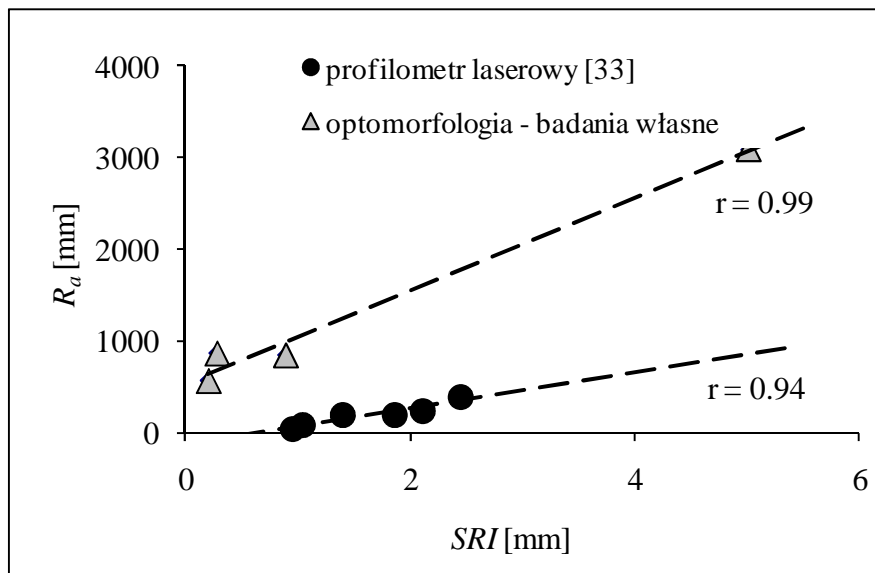
c) C40-JH



d) C40-HD



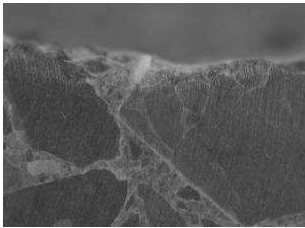
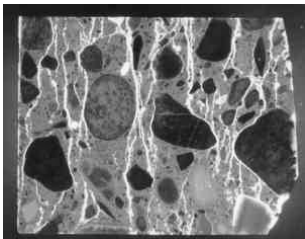
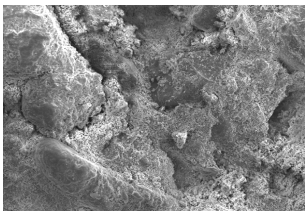

Rys.5. Obraz powierzchni podłoża betonowego po obróbce powierzchniowej: polerowanie (a), piaskowanie (b) groszkowanie (c) i obróbka hydrodynamiczna (d) – badania własne



Rys.6. Zależność między średnią arytmetyczną odchylenia profilu, R_a i wskaźnikiem chropowatości, SRI

We wspomnianej normie PN-EN 1504-10 wymienia się także odkształcenie rysy, jako cechę sprawdzaną podczas kontroli jakości, ale dotyczy to tylko stosunkowo dużych rys powierzchniowych. Nie podaje się jednak żadnej metody do oceny stopnia mikrozarzysowania w warstwie przypowierzchniowej. Można tego dokonać na podstawie obrazu obserwacji mikroskopowych, ale obecnie rozważa się także wykorzystanie do tego celu metod pośrednich, np. oznaczenia powierzchniowej chłonności wody (Tab.6) [24,77,107]. Wydaje się, że ocenę stanu podłoża betonowego przed naprawą, która uwzględnia również m.in. rozwarstwienia, ukryte odspojenia i rysy w warstwie przypowierzchniowej oraz klasę wytrzymałości na ściskanie podłoża, można w pewnym stopniu przeprowadzić na podstawie wartości przypowierzchniowej wytrzymałości na rozciąganie, oznaczanej metod *pull-off* (por. rozdział 2.4) zgodnie z PN-EN 1542.

Tab.6. Metody oceny stopnia mikrozarzysowania warstwy przypowierzchniowej podłoża betonowego przed naprawą

Metoda	Szczegóły		Wynik
Obserwacje mikroskopowe	Mikroskop optyczny [77]		<p>Ocena jakościowa obecność mikrorys w warstwie przypowierzchniowej</p> <p>Ocena ilościowa obliczenie parametrów charakteryzujących rozkład rys: liczba, całkowita długość, szerokość rys, projekcja na oś poziomą, orientacja układu rys (róża kierunków rys), odległość między rysami, gęstość rozkładu rys</p>
	Mikroskop fluorescencyjny [57]		
	Mikroskop skaningowy [36]		
Chłonności wody	Pomiar powierzchniowej chłonności wody wg procedury RILEM [107] uproszczona wersja metody ISAT		<p>Ocena ilościowa odczyt objętość wody wchłoniętej przy stałym ciśnieniu przez powierzchnię koła o średnicy 5 cm równą dnie szklanego cylindra pomiarowego z menzurką pomiarową [cm³]</p>

2.4. Przyczepność przy odrywaniu jako miara jakości zespolenia

Norma PN-EN 1504-10 zaleca tzw. badanie *pull-off* wg PN-EN 1542, zarówno do oceny przypowierzchniowej wytrzymałości na rozciąganie podłoża, jak i oznaczania przyczepności materiału naprawczego. Metoda *pull-off* polega na bezpośrednim odrywaniu krążków przyklejonych do powierzchni wyrobu lub systemu do napraw. W normie opisano pomiar przyczepności przez odrywanie wyrobów i systemów do napraw, nakładanych na znormalizowane próbki betonu, przygotowanego zgodnie z PN-EN 1766.

Obszar badania jest wyznaczany przez odpowiednie nawiercenie powierzchni przy pomocy ustawionego pod kątem $90 \pm 1^\circ$ wiertła koronowego diamentowego o średnicy 50 ± 1 mm. Badania przeprowadzone przez Cleland i in. [18] oraz Courard i in. [23] wskazują, że odchylenie od pionu o 5% nie powoduje istotnych zmian w wyznaczonej wartości przyczepności. Kolejnym czynnikiem wpływającym na wartość przyczepności przy odrywaniu jest głębokość nacięcia podłoża betonowego. Badania Czarneckiego i in. [33] wykazały, że przy głębokościach nacięcia podłoża betonowego większej niż 10 mm wartość wyznaczonej przyczepności stabilizuje się zarówno w przypadku powłok polimerowych jak i mineralnych. Wyniki te są zbieżne z zaleceniami zawartymi w normie PN-EN 1542, w której podaje się głębokość wiercenia w systemie naprawczym (Rys.7b) jako:

$$d_i = d_d + (15 \pm 5) [mm], \quad (1)$$

gdzie d_i – całkowita głębokość wiercenia [mm], d_d – grubość warstwy zaprawy [mm].

W przypadku określania przypowierzchniowej wytrzymałości na rozciąganie całkowita głębokość wiercenia, d_i wynosi 15 ± 5 mm (Rys.7c). Na tak przygotowaną próbkę nakleja się stalowe krążki o średnicy $50 \pm 0,5$ mm i grubości co najmniej 20 mm z płaską powierzchnią klejenia. Krążki umieszcza się na próbce, tak, aby środek krążka pokrywał się ze środkiem nawierconego cylindra. Krążek połączony jest z przyrządem odrywającym przez kuliste gniazdo, aby zapewnić przyłożenie obciążenia prostopadle do badanej powierzchni, nie powodując zginania ani powstawania sił ścinających. Przyrząd należy zabezpieczyć przed zmianą pozycji w czasie badania (Rys.7a). Przyłożone obciążenia wzrasta w sposób ciągły i równomierny, z szybkością $0,05 \pm 0,01$ MPa/s, aż do wystąpienia zniszczenia.

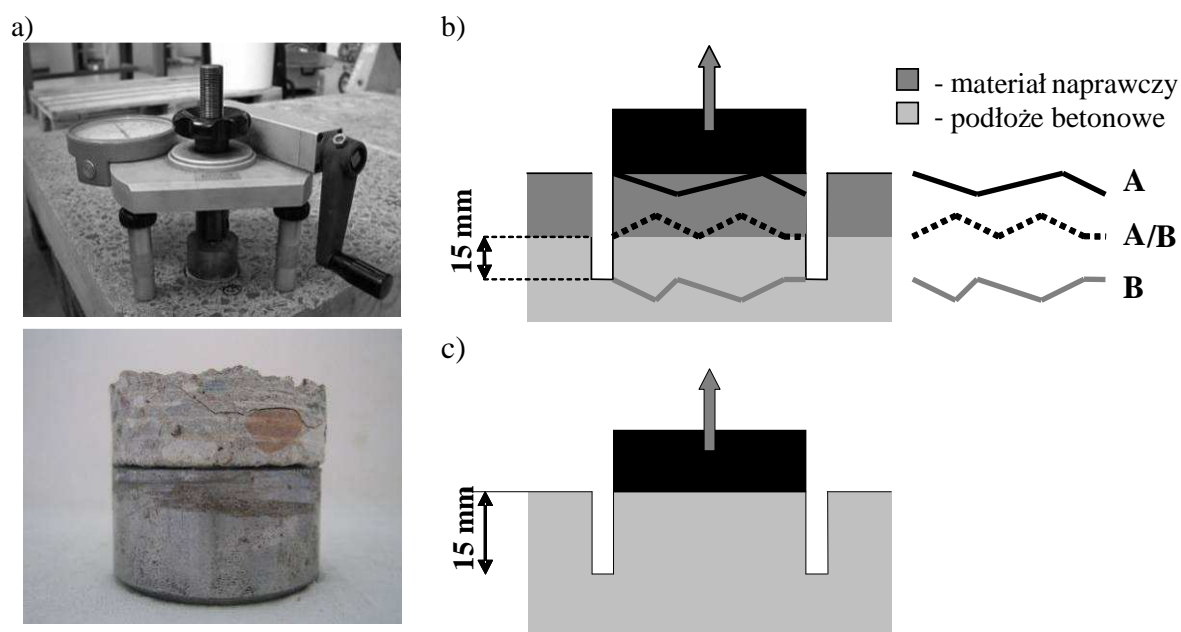
Wynikiem badania jest wartość przyczepności, f_h (2) lub wytrzymałości na rozciąganie, f_{hs} (3) z dokładnością do 0,1 MPa.

$$f_h = \frac{4F_h}{\pi D_f^2}, \quad (2)$$

$$f_{hs} = \frac{4F_{hs}}{\pi D_f^2} \quad (3)$$

gdzie: f_h - przyczepność warstwy naprawczej do podkładu [MPa], f_{hs} - przypowierzchniowa wytrzymałość na rozciąganie [MPa], F_h lub F_{hs} - obciążenie przy zniszczeniu [N], D_f - średni wymiar średnicy próbki [mm].

Przyczepność średnią należy oznaczać z co najmniej trzech miarodajnych wyników badania przy standardowym zniszczeniu. Przez zniszczenie niestandardowe rozumie się zniszczenie następujące w warstwie kleju. Obok wartości przyczepności należy wizualnie ocenić typ zniszczenia: A – zniszczenie kohezyjne w podłożu betonowym, A/B – zniszczenie adhezyjne na powierzchni rozdziału pomiędzy podkładem a materiałem naprawczym, B - zniszczenie kohezyjne w warstwie naprawczej (Rys.7b).



Rys.7. Przyrząd do badania *pull-off* (a) i schemat badania przyczepności przez odrywanie warstwy naprawczej do podłoża betonowego z zaznaczonymi typami zniszczenia (b) oraz oznaczenia wytrzymałości na rozciąganie przypowierzchniowej warstwy podłoża betonowego (c)

Właściwe oznaczenie adhezji w takiej próbie otrzymuje się wtedy, gdy zniszczenie nastąpi na granicy materiałów – w złączu. W innych przypadkach wyznaczone naprężenie będzie opisywać siłę oporu adhezyjno-kohezyjnego lub w granicznym przypadku, gdy niszczenie nastąpi w podłożu lub w warstwie naprawczej, siłę kohezji. O wyniku próby decyduje zatem nie tylko adhezja, ale także wzajemne relacje cech komponentów układu

naprawczego, a w szczególności właściwości mechaniczne, takie jak wytrzymałość na rozciąganie czy ścinanie.

Generalnie możemy traktować pomiar przyczepności warstwy naprawczej do podkładu jako miarodajną metodę kontroli jakości zespolenia, a także skuteczności naprawy, gdyż po przekroczeniu naprężenia niszczącego, niezależnie od rodzaju zniszczenia, naprawa nie spełnia swojej podstawowej roli, a więc nie przywraca wymaganego stanu użytkowania [20,32,101]. Założenie to znajduje odzwierciedlenie w zaleceniach normowych, które to umiejscawiają przyczepność materiału naprawczego do podkładu wśród wymaganych cech do kontroli jakości robót z wykorzystaniem normowych badań i obserwacji wymienionych w PN-EN 1504-10 (Tab.7), a także wśród pięciu podstawowych właściwości wymaganych dla wszystkich zamierzonych zastosowań.

Tab.7. Badania i obserwacje właściwości końcowych w stanie utwardzonym w ramach kontroli jakości dla metod naprawy związanych z nakładaniem zaprawy i betonu wg PN-EN 1504-10

Nr badania /obserwacji	Cecha	Metoda badania lub obserwacja	Wymaganie	Norma
1	Odspojenie	Ostukiwanie młotkiem (T)	■	
15	Oporność elektryczna	Metoda Wennera (T)	□	
32	Przepuszczalność wody przez materiał naprawczy	Pomiar wnikania na rdzeniu (T)	◆	ISO 7031
34	Grubość otuliny	Wizualnie (O) Grubościomierzem na rdzeniu (T)	■	PN-EN 12504-1
35	Przyczepność materiału naprawczego	Badanie <i>pull-off</i> (T)	■	ISO 4624 PN-EN 1542
36	Wytrzymałość na ściskanie	Próba ściskania na rdzeniu (T) Pomiar liczby odbicia (T)	■	PN-EN 12504-1 PN-EN 12504-2
37	Gęstość stwardniałego betonu	Metoda suszenia (T)	■	PN-EN-12390-7
38	Rysy skurczowe w zaprawie i betonie naprawczym	Wizualnie lub czujnikiem mechanicznym (O)	■	
39	Pustki w i za utwardzonym materiałem naprawczym	Metoda ultradźwiękowa (T) Metoda radiograficzna (T) Wizualnie na rdzeniu (T)	◆	PN-EN 12504-4 ISO 8047 PN-EN 12504-1
45	Barwa i tekstura wykończonych powierzchni	Wizualnie (O)	◆	

■ – dla wszystkich przewidywanych zastosowań; ◆ - dla niektórych spośród przewidywanych zastosowań, jeśli wymagają tego warunki stosowania; □ - dla zastosowań specjalnych.

T: badanie

O: obserwacja

Wymaganie użytkowe odnośnie przyczepności do podkładu kontrolnego jest wymienione w normie PN-EN 1504-3. Określana w badaniu *pull-off* wartość przyczepności przez odrywanie warstwy naprawczej do podłoża przygotowanego wg PN-EN 1766 MC(0,40)

w warunkach laboratoryjnych dla wyrobów do napraw konstrukcyjnych powinna wynosić minimum 2,0 MPa dla klasy R4 i 1,5 MPa dla klasy R3. Dla napraw niekonstrukcyjnych minimalna wartość przyczepności powinna być większa niż 0,8 MPa lub, gdy występuje zniszczenie kohezyjne w materiale naprawczym, 0,5 MPa. Na placu budowy dopuszcza się uzyskane wartości w zakresie 1,2÷1,5 MPa przy naprawach konstrukcyjnych oraz minimalną wartość 0,7 MPa przy naprawach niekonstrukcyjnych.

Niewątpliwą zaletą badania *pull-off* jest możliwość stosowania jej zarówno w laboratorium jak i na rzeczywistej konstrukcji. W ostatnim czasie w praktyce inżynierskiej pojawiły się inne metody i aparaty do określania przyczepności warstwy naprawczej do podłoża betonowego. Przykładem może być urządzenie typu *torq-test*, pozwalające na określenie przyczepności przy ścinaniu, która to lepiej opisuje trwałość układu naprawczego w przypadku występowania naprężeń spowodowanych przez skurcz lub efekty cieplne. W literaturze prezentowany jest ponadto szeroki wachlarz laboratoryjnych metod oznaczania przyczepności [17].

3. METODA *IMPACT-ECHO* W DIAGNOSTYCE BETONU

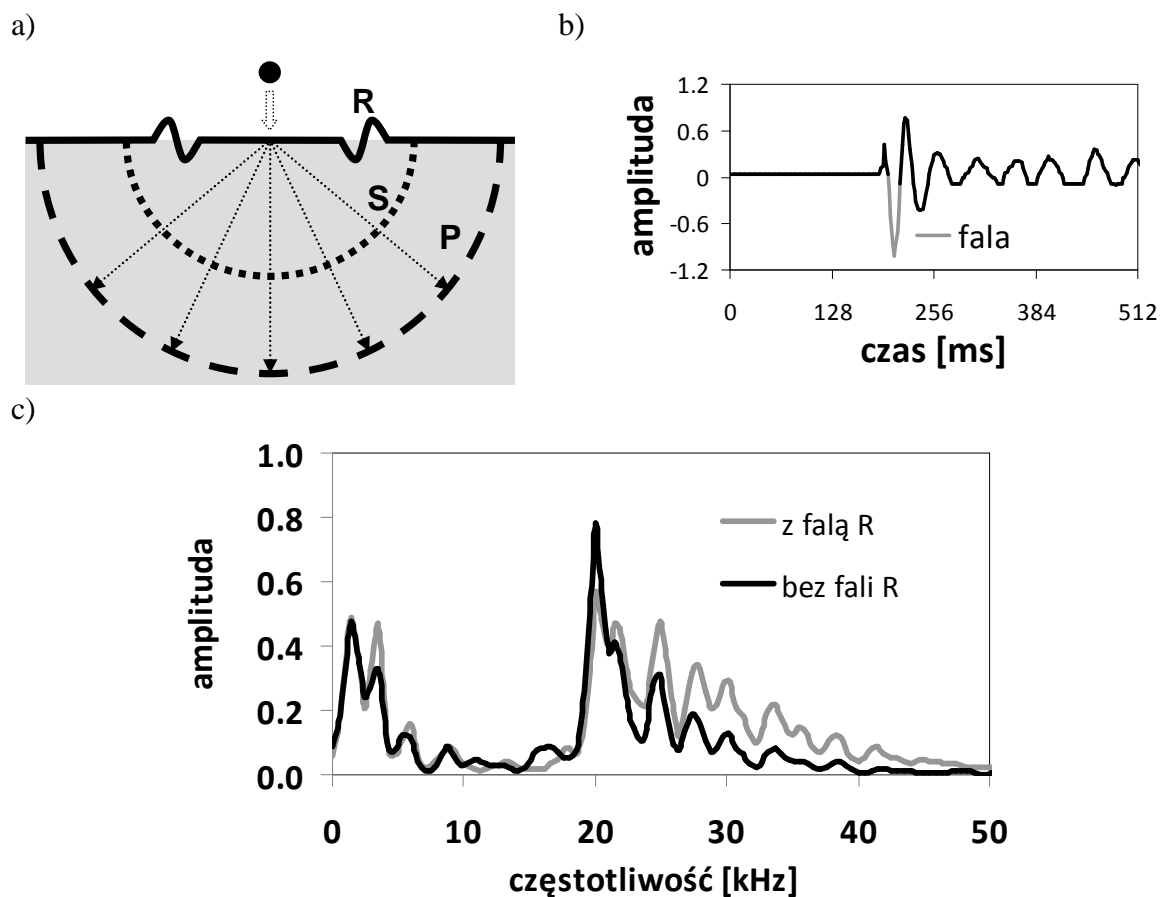
3.1. Ogólna charakterystyka metody *impact-echo*

Interpretacja wyników przyczepności przez odrywanie jako miary jakości zespolenia metodą *pull-off* jest łatwa i intuicyjna. W ostatnich latach odnotowano natomiast znaczny wzrost zainteresowania metodami nieniszczącymi *NDT*, co wynika głównie z zalety, jaką jest brak konieczności miejscowej naprawy w punkcie pomiarowym, a także możliwość ciągłego monitorowania zmian przyczepności w czasie znacznie większej liczby punktów pomiarowych, niż ma to miejsce w przypadku oznaczania przyczepności metodą *pull-off*. Wśród nieniszczących metod diagnostyki betonu w zależności od mierzonej wielkości pośredniej możemy wyróżnić m.in. metodę sklerometryczną, metody akustyczne, radiologiczne, elektromagnetyczne, elektrochemiczne, termograficzne i inne pomiary takie jak np. przepuszczalność powietrza, wody czy pomiar wilgotności [11,71,88,89,128]. Spośród tego zbioru, jako metody właściwe do kontroli skuteczności napraw w normie PN-EN 1504-10 wymienione są: metoda sklerometryczna oraz metody akustyczne (ostukiwanie młotkiem, metoda ultradźwiękowa, metoda *impact-echo*), radiograficzne oraz test Wennera (pomiar przewodności elektrycznej) i Karstena (pomiar przepuszczalności wody).

Najprostszą i najczęściej stosowaną metodą akustyczną wykorzystującą propagację fal sprężystych, jest ostukiwanie młotkiem. Metodę tą stosuje się do sprawdzania, czy występuje odspojenie w podłożu betonowym i w układzie naprawczym, a także czy obecne są pustki między przyklejaną płytą a podłożem (wzmacnianie konstrukcji). Zgodnie z PN-EN 1504-10 obecność pustek można wykryć także metodą *impact-echo* czy pośrednią metodą ultradźwiękową. Należy dodać, że możliwości wykorzystania metod *NDT* do oceny jakości układu naprawczego są znacznie szersze niż to opisano w normie [122].

Metoda ultradźwiękowa, oprócz podstawowego zastosowania do szacowania wytrzymałości betonu na ściskanie może służyć również do oceny jakości betonu [58], w tym np. do badania stopnia destrukcji w wyniku korozji [44,105], czy pożaru [16]. Niedogodnością metody ultradźwiękowej jest fakt, iż równocześnie z większą czułością fali o wysokich częstotliwościach zwiększa się jej wrażliwość na niejednorodność struktury samego betonu, co znacznie utrudnia interpretację sygnału. Metoda *impact-echo* opracowana przez naukowców z Cornell University i US National Bureau of Standards (USA) [92] jest mniej wrażliwa na naturalną niejednorodność betonu. W metodzie tej, źródłem fal sprężystych jest mechaniczne uderzenie stalowej kulki o powierzchnię badanego elementu. Generowane fale

mają częstotliwość rzędu $1 \div 150$ kHz i z tego względu są mniej podatne na rozpraszanie na elementach struktury samego betonu niż ultradźwięki. Przesunięcia cząstek powierzchni badanego elementu, spowodowane powrotem fal odbitych, rejestrowane są za pomocą piezoelektrycznego przetwornika drgań, umieszczonego w bliskim sąsiedztwie miejsca wzbudzenia. Odbiornik rejestruje głównie fale płaskie podłużne P i powierzchniowe R (Rayleigha), bez składowej poprzecznej S (Rys.8a). Pozwala to na analizę propagacji fali sprężystej w oparciu o stosunkowo prosty aparat matematyczny. Fale powierzchniowe R docierają do głowicy odbiorczej zaraz po pierwszym impulsie fali P (Rys.8b). Obok rozkładu amplitudy w dziedzinie czasu analizowane jest jednocześnie widmo częstotliwości uzyskiwane w wyniku zastosowania transformaty Fouriera (patrz rozdział 3.3). Fale R są zawsze obecne w sygnale i często w istotny sposób wpływają na charakter widma częstotliwości. W większości przypadków wskazane jest usunięcie ich z zarejestrowanego widma przed dalszą analizą (Rys.8c).



Rys.8. Schematyczne przedstawienie fal generowanych w metodzie *impact-echo* (a), rejestrowany rozkład amplitudy w dziedzinie czasu (b) oraz widmo częstotliwości przed usunięciem fali R i po jej usunięciu (c)

Odbicie fali w metodzie *impact-echo*, jak we wszystkich metodach akustycznych, wynika z różnych własności akustycznych składników układu. Podatność na odbicie fali na granicy ośrodków opisuje współczynnik odbicia, R zdefiniowany jako:

$$R = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}, \quad (4)$$

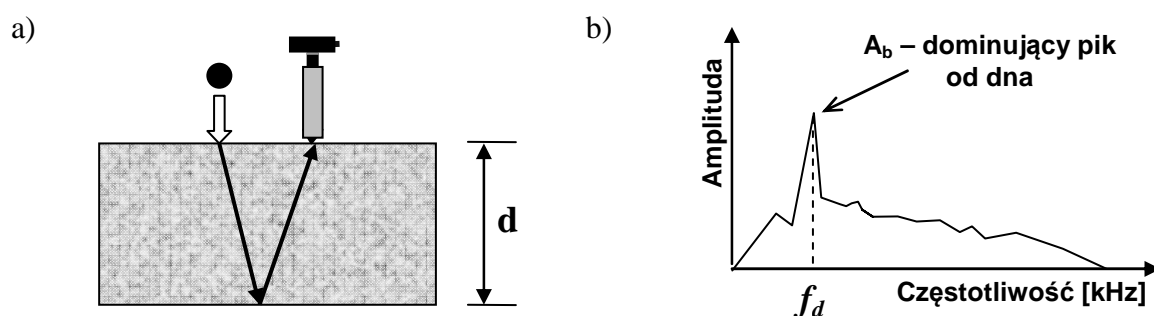
gdzie Z_1 i Z_2 to odpowiednio impedancje akustyczne materiału naprawczego i podłoża betonowego, a impedancja akustyczna, Z to iloczyn prędkości fali podłużnej w ośrodku nieograniczonym i jego gęstości objętościowej.

Wyniki badań doświadczalnych i obliczeń *MES* wskazują, że powierzchnia rozdziału może być wykryta w przypadku słabej jakości zespolenia, jeżeli współczynnik odbicia, R jest mniejszy niż 0,24 [97]. Jeśli R jest większe niż 0,24, w widmie częstotliwości będzie widoczny pik odpowiadający odbiciu od powierzchni rozdziału niezależnie od jakości zespolenia. Tego rodzaju zależność została potwierdzona również w odniesieniu do układów naprawczych [51].

Najprostszym przykładem zastosowania metody *impact-echo* jest pomiar grubości płyt betonowych (Rys.9) przy dostępie z jednej strony [14,97,114]. Podstawą do obliczenia grubości d jest zależność łącząca prędkość fali podłużnej, c_p , częstotliwość dominującego pik w widmie częstotliwości, f_d , oraz drogę przebytą przez falę. Grubość elementu oblicza się ze wzoru:

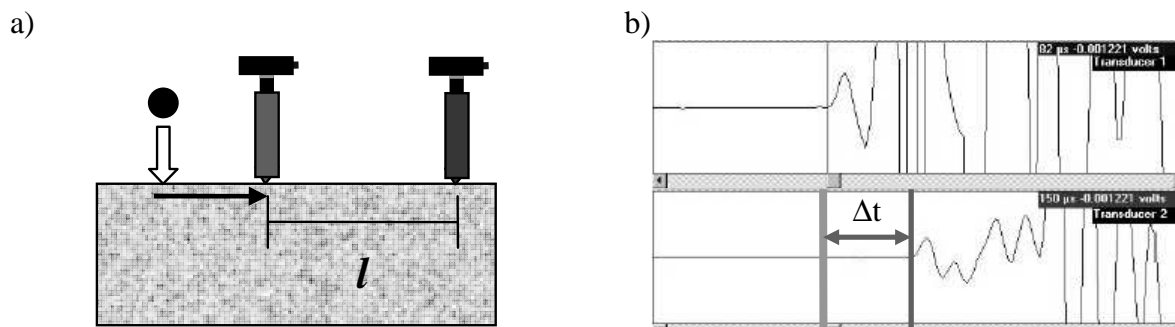
$$d = \frac{\beta c_p}{2f_d}, \quad (5)$$

gdzie współczynnik β zależy od geometrii próbki (dla płyty $\beta=0,96$) [97]



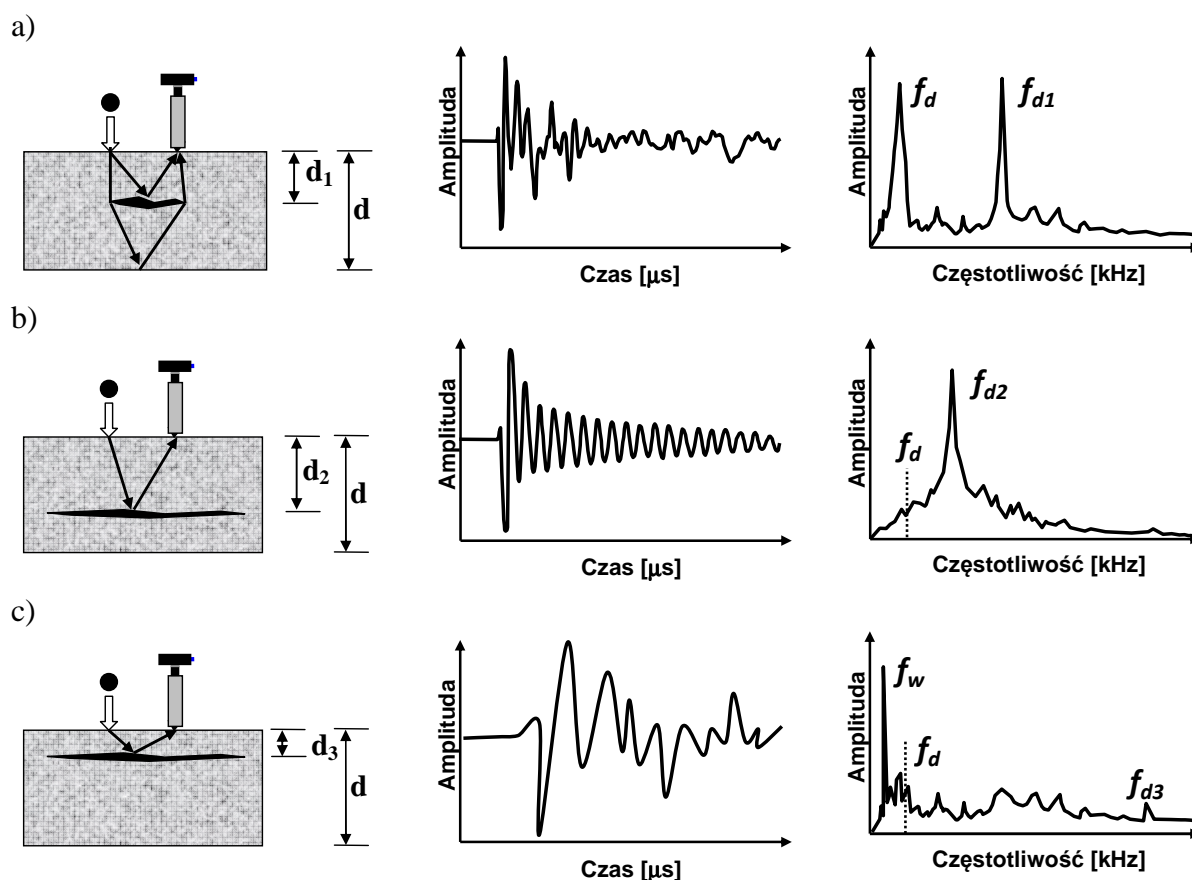
Rys.9. Propagacja fali w betonie (a) i widmo częstotliwości z widocznym pikiem od dna (b)

Do określenia grubości elementu niezbędna jest znajomość wartości prędkości fali P w materiale. Można ją wyznaczyć metodą pośrednią, obliczając prędkość na podstawie częstotliwości dominującej z badania na elemencie referencyjnym o znanej grubości lub bezpośrednio, polegającą na pomiarze czasu przejścia fali P na odcinku o znanej długości, l .



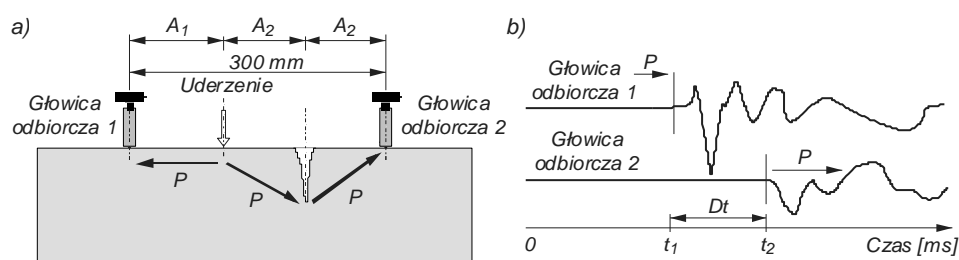
Rys.10. Schemat określania prędkości fali P metodą pośrednią (a) i przykładowy wynik z zaznaczonym czasem przejścia fali na odcinku znanej długości (b)

Standardowa procedura analizy widma częstotliwości przewiduje także wykrywanie wad wewnętrznych elementu [13,66,106,109,111], jeśli ich lokalizacja i rozmiary mieszczą się w granicach detekcyjnych metody (por. rozdział 3.2). Gdy w strukturze występuje defekt, w widmie powinien występować pik przy częstotliwościach wyższych (f_{d1}, f_{d2}) niż częstotliwość odpowiadająca grubości elementu, d (Rys.11a,b). Jeśli rozległa wada jest położona blisko powierzchni (t_3), to wygenerowana fala ulegnie całkowitemu odbiciu od powierzchni wady. W takim przypadku w widmie obserwuje się pik o niskiej częstotliwości i o dużej amplitudzie (Rys.11 c).



Rys.11. Schematy propagacji fali, sygnały i widma częstotliwości w przypadku występowania w badanym elemencie wad na różnej głębokości i o różnych rozmiarach

Inny obszarem zastosowań metody *impact-echo* jest szacowanie głębokości rys powierzchniowych. Badanie wykonuje się za pomocą zespolonego czujnika dwugłowicowego ustawionego tak, aby badana rysa była między składowymi głowicami odbiorczymi [46].



Rys.12. Schemat pomiaru głębokości rys powierzchniowych: układ pomiarowy (a), zarejestrowane sygnały (b) [46]

Głębokość rysy d_x określa się na podstawie interwału czasów Δt dojścia fali do poszczególnych głowic ze wzoru

$$d_x = \sqrt{\frac{(c_p \Delta t + A_1)^2}{4} - A_2^2}, \quad (6)$$

gdzie: A_1 i A_2 jak na Rys.12

Lin i in. [67] zaproponował modyfikację tej procedury polegającą na zastąpieniu jednej z głowic aparatem do pomiaru czasu kontaktu impaktora z powierzchnią podczas uderzenia.

Oprócz wyżej wymienionych w literaturze można znaleźć szereg innych zastosowań metody *impact-echo*, takich jak:

- wykrywanie płytkich delaminacji, w tym pod warstwą płytek ceramicznych [13];
- określanie obszarów gdzie beton jest nieskonsolidowany [45,92];
- wykrywanie pustek pod płytami ułożonymi na gruncie [63,97];
- określanie grubości powłoki o charakterystyce innej niż podkład [92,96];
- lokalizowanie głęboko usytuowanego zbrojenia [15,64];
- lokalizowanie i badanie wypełnienia kanałów w kablobetonie [4-6,41,61,74,75,79];
- ocena wypełnienia przestrzeni między betonowym poszyciem tunelu a gruntem [1];
- ocena jakości zespolenia betonu natryskowego z podłożem kamiennym [60];
- ocena właściwości betonu i mieszanki mineralno asfaltowej [7];
- ocena jakości zespolenia między murowaną elewacją a rdzeniem ściany [90];
- sprawdzanie jakości elementów prefabrykowanych np. bloków kamiennych [91] lub betonowych [59];

- sprawdzanie integralności wielowarstwowych elementów konstrukcyjnych np. kolejowych podkładów betonowych [19];
- detekcja stopnia skorodowania prętów zbrojeniowych w żelbecie [62];
- określanie przyrostu wytrzymałości w trakcie dojrzewania betonu, w tym betonu lekkiego [12].

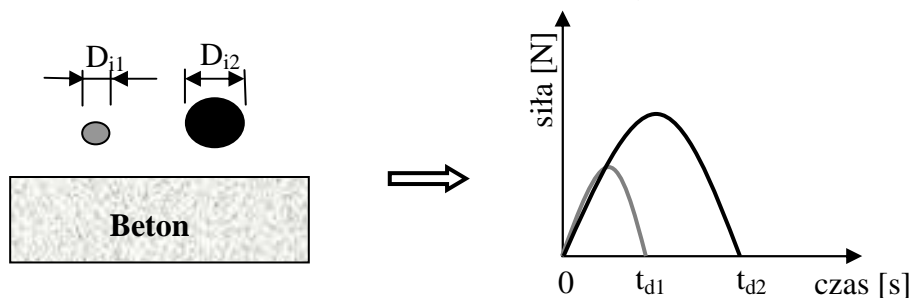
3.2. Uwarunkowania detekcji defektów metodą *impact-echo*

Istnieją trzy podstawowe uwarunkowania skuteczności metody *impact-echo* do wykrywania defektów w strukturze elementu [72,97]:

- minimalna głębokość występowania defektu d wynika z podstawowej zależności między prędkością fali, c_p [m/s], a częstotliwością, f [kHz] i długością fali, λ [m];
- minimalny wymiar podłużny defektu, L_{min} [m] powinien być większy niż minimalna długość wygenerowanych fal, λ_{min} [m];
- minimalny wymiar poprzeczny defektu, L_{min} [m] powinien wynosić co najmniej 0,25 i nie więcej niż 1,5 głębokości jego występowania, d [m].

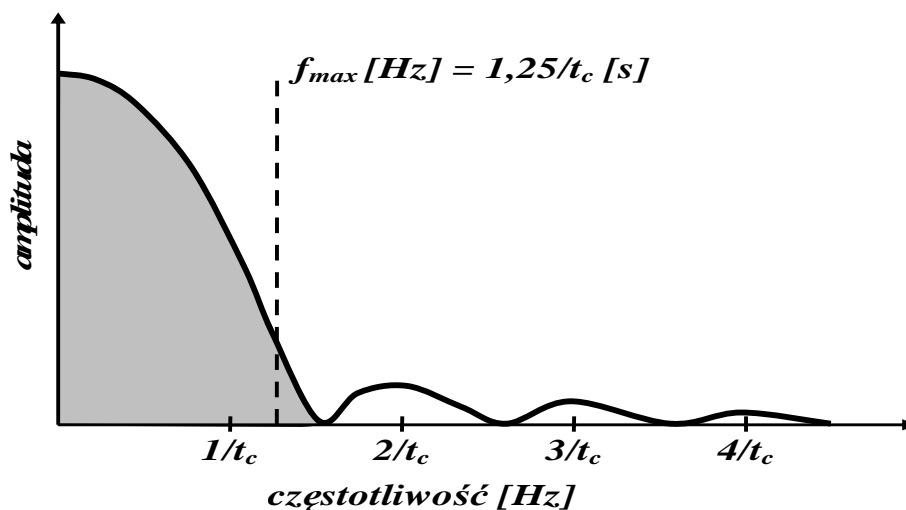
Podczas uderzenia kulki o powierzchnię część energii kinetycznej jest przekształcana w energię fal sprężystych, które następnie rozchodzą się w materiale. Z pewnym przybliżeniem czas kontaktu stalowej kulki z powierzchnią podczas uderzenia, t_c [μ s] zależy liniowo od jej średnicy, D_i [mm] (Rys.13) wg równania:

$$t_c [s] = 0,0043 \cdot D_i [m], \quad (7)$$



Rys.13. Zależność czasu kontaktu stalowej kulki z powierzchnią podczas uderzenia od jej średnicy

Przez transformatę Fouriera na funkcji opisującej zmienność siły w czasie kontaktu z powierzchnią podczas uderzenia otrzymujemy rozkład częstotliwości fal składowych (Rys.14).



Rys.14. Rozkład częstotliwości fal składowych w zależności od czasu kontaktu stalowej kulki z powierzchnią podczas uderzenia

Wyznaczona empirycznie maksymalna częstotliwość fali o użytecznej energii wynosi:

$$f_{\max} [\text{Hz}] = \frac{1,25}{t_c [\text{s}]} \quad (8)$$

Po podstawieniu (7) i (8) do wzoru:

$$\lambda_{\min} [\text{mm}] = \frac{c_p [\text{m/s}]}{f_{\max} [\text{kHz}]}, \quad (9)$$

można obliczyć minimalną długość fali oraz minimalny wymiar poprzeczny defektu jako:

$$L_{\min} [\text{m}] \geq \lambda_{\min} [\text{m}] = \frac{c_p [\text{m/s}] \cdot 0,0043D [\text{m}]}{1,25} \quad (10)$$

Podstawiając równanie opisujące zależność prędkości fali podłużnej, c_p , dominującej częstotliwości w widmie, f_d oraz przebytej przez falę drogi:

$$f = \frac{c_p}{2d}, \quad (11)$$

do wzoru na maksymalną częstotliwość użyteczną fali sprężystej:

$$f_{\max} = \frac{c_p}{\lambda_{\min}}, \quad (12)$$

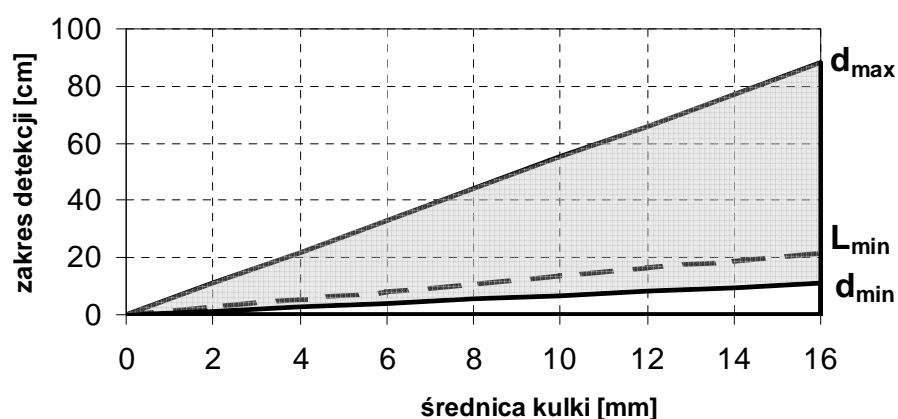
otrzymujemy warunek na minimalną głębokość występowania defektu, który można wykryć w metodzie *impact-echo*:

$$d_{\min} \geq 0,5\lambda_{\min} \quad (13)$$

Empiryczne obserwacje [97] wskazują, że jeżeli minimalny wymiar poprzeczny defektu L_{min} wynosi co najmniej 0,25 głębokości jego występowania d to może on zostać wykryty. Jeżeli $L_{min} \geq 0,33d$ to defekt ten jest łatwy do lokalizacji. Jeśli natomiast $L_{min} \geq 1,5d$ niemożliwa będzie detekcja nieciągłości zlokalizowanych poniżej i w widmie częstotliwości pojawi się jedynie pik odpowiadający głębokości występowania wady d . Pozwala to na określenie maksymalnej głębokości występowania możliwego do wykrycia defektu na poziomie $d_{max} = 4\lambda_{min}$. Po uwzględnieniu tego warunku oraz równań (10) i (13) możemy powiązać zakres detekcji metody *impact-echo* ze średnicą stosowanej kulki, D_i (Tab.8).

Tab.8. Zakres detekcji wady metodą *impact-echo* w zależności od średnicy stosowanej kulki na podstawie [97]

Warunki badania				Limity detekcyjne		
średnica kulki	czas kontaktu	maksymalna częstotliwość o użytecznej energii	minimalna długość fali	minimalny wymiar poprzeczny defektu	minimalna głębokość występowania defektu	maksymalna głębokość występowania defektu
D_i	t_c	f_{max}	λ_{min}	$L_{min} = \lambda_{min}$	$d_{min} = 0,5 \lambda_{min}$	$d_{max} = 4 \lambda_{min}$
[mm]	[μ s]	[kHz]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
2,0	8,60	145,35	27,5	28	14	110
4,0	17,20	72,67	55,0	55	28	220
5,0	21,50	58,14	68,8	69	34	275
6,5	27,95	44,72	89,4	89	45	358
8,0	34,40	36,34	110,1	110	55	440
9,5	40,85	30,60	130,7	131	65	523
11,0	47,30	26,43	151,4	151	76	605
12,5	53,75	23,26	172,0	172	86	688
15,0	64,50	19,38	206,4	220	110	881



Rys.15. Zależność zakresu detekcji wady w metodzie *impact-echo* od średnicy stosowanej kulki

W zależności od relacji między głębokością występowania wady, d i minimalnej długości fali, λ_{min} , zmienia się charakter widma częstotliwości (Tab.9).

Tab.9. Charakter widm częstotliwości w zależności od głębokości występowania i wymiarów wady

głębokość występowania wady	① $d < \frac{1}{2} \lambda$	② $\frac{1}{2} \lambda \leq d < \frac{2}{3} \lambda$
charakter widma częstotliwości	<p> A_b - pik od tzw. drgań zginających A_i - pik od wady </p> <p> dobrze widoczny pik od wibracji oraz może być słabo widoczny pik od wady </p>	<p> A_i - pik od wady </p> <p> brak pików od dna, widoczny pik od wady, widmo jak dla elementu o grubości równej głębokości występowania wady </p>
głębokość występowania wady	③ $\frac{2}{3} \lambda \leq d < 3\lambda$	④ $3\lambda \leq d < 4\lambda$
charakter widma częstotliwości	<p> A_b - pik od dna A_i - pik od wady </p> <p> dobrze widoczny zarówno pik od dna jak i od wady; jeżeli wada bardzo rozległa pik od dna może być słabo widoczny lub niewidoczny </p>	<p> A_b - pik od dna A_i - pik od wady </p> <p> dobrze widoczny pik od dna oraz słabo widoczny pik od wady </p>

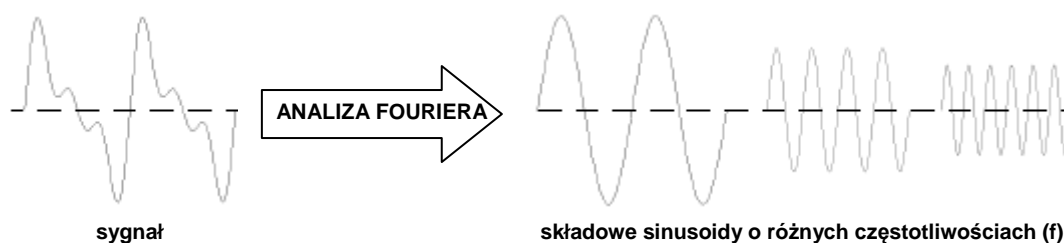
3.3. Metody analizy sygnału *impact-echo*

Jak stwierdzono w rozdziale w 3.1 zasada metody *impact-echo* polega nie tyle na analizie zarejestrowanego sygnału, ale jego widma częstotliwości. Otrzymywany w tej metodzie sygnał jest dość skomplikowany mimo stosunkowo małej podatności fali na rozpraszanie będące efektem niejednorodności betonu. Z tego względu w analizie sygnału *impact-echo* użyteczne są metody oparte na aproksymacji i transformacji [8]. Celem aproksymacji jest przybliżenie sprowadzające się do wyodrębnienia charakterystycznych cech danego sygnału. Transformacja polega na przekształceniu sygnału, w którego wyniku otrzymujemy nową jego reprezentację – transformatę, uwypuklającą istotne cechy zjawiska, które nie są widoczne w samym sygnale. Podstawowa procedura badania zależności propagacji fali sprężystej od mikrostruktury materiału polega na analizie częstotliwościowej będącej wynikiem zastosowania do analizy zarejestrowanego sygnału transformacji Fouriera (ang. *Fourier Transform, FT*) opisanej wzorem:

$$\hat{f}(\xi) := \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-2\pi i x \xi} dx, \quad (14)$$

gdzie i to jednostka urojona ($i^2 = -1$)

Transformacja Fouriera polega na dekompozycji sygnału na składowe częstotliwościowe ξ , czyli jego rozbiecie na sumę sinusoid o określonych częstotliwościach (Rys.16).



Rys.16. Schemat analizy Fouriera

Dekompozycję tą opisuje szereg Fouriera, pozwalający na przedstawienie każdej funkcji $f(x)$ o okresie 2π

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{n\pi x}{L} + b_n \sin \frac{n\pi x}{L} \right), \quad (15)$$

gdzie współczynniki a i b określają wzory Eulera-Fouriera:

$$a_0 = \frac{1}{2L} \int_{-L}^L f(x) dx, \quad (16)$$

$$a_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^L f(x) \cos \frac{n\pi x}{L} dx, \quad (17)$$

$$b_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^L f(x) \sin \frac{n\pi x}{L} dx. \quad (18)$$

Uproszczeniem algorytmu transformacji Fouriera jest aproksymacja dyskretna (ang. *Discrete Fourier Transform, DFT*), w której zamiast obliczania transformaty dla wszystkich wartości szacowana jest jedynie w konkretnych punktach, danych przez:

$$f_n \equiv \frac{n}{N\Delta}, \quad n = -\frac{N}{2}, \dots, \frac{N}{2}. \quad (19)$$

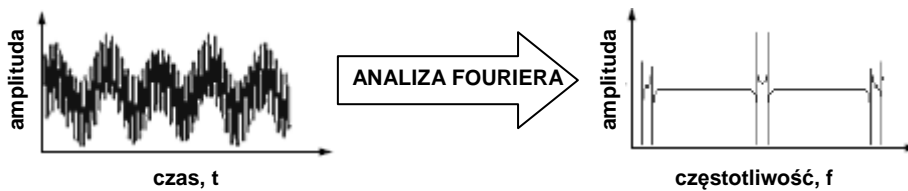
gdzie: N – liczba punktów próbkowania, Δ – częstość próbkowania

Aproksymacja funkcji seriami punktów wymaga zastosowania w obliczeniach macierzy rzędu n , gdzie n jest liczbą punktów w aproksymacji. Mnożenie macierzy $n \times n$ wymaga wykonania n^2 operacji, co przy zwiększającej się ilości punktów staje się kłopotliwe. Jeżeli jednak punkty rozłożone są w pewien jednolity sposób, wtedy macierz taka może zostać podzielona na kilka macierzy rzadkich, prostych do bezpośredniego rozwiązania. Ideą tego podziału jest twierdzenie Danielsona-Lanczosa, mówiące, że pojedyncza *DFT* o długości n , jest równoważna sumie dwóch transformat o długości $n/2$, gdzie jedna z nich jest złożona z nieparzystych punktów spośród zbioru n , a druga z parzystych. Aproksymacja taka nazywa się szybką transformacją Fouriera (ang. *Fast Fourier Transform, FFT*) i znacznie przyspiesza obliczenia. Ilość wykonywanych operacji arytmetycznych zmniejsza się z n^2 do $n \log n$ (Tab.10).

Tab.10. Wzrost wydajności obliczeniowej przy zastosowaniu *FFT* w stosunku do *DFT*

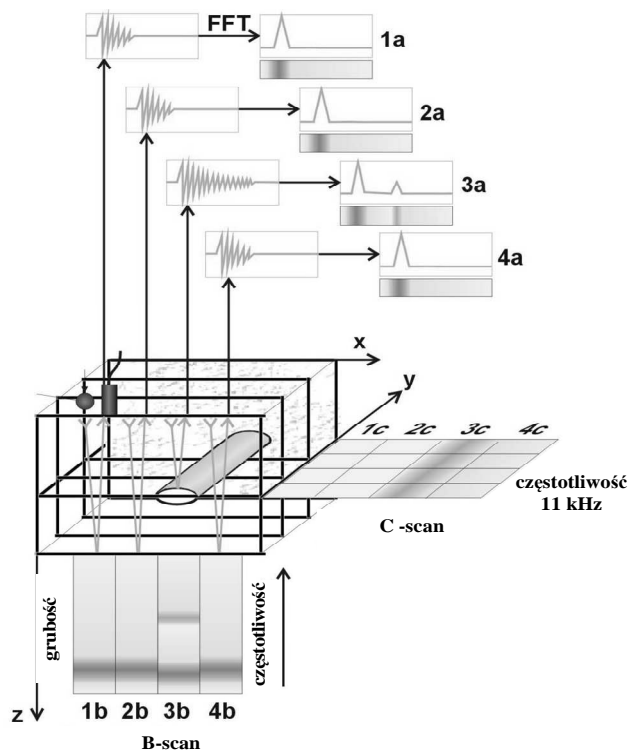
transformacja	liczba operacji obliczeniowych	liczba punktów pomiarowych - n						
		2	4	8	16	32	64	128
<i>DFT</i>	n^2	4	16	64	256	1024	4096	16384
<i>FFT</i>	$n \log_2 n$	2	8	24	64	160	384	896

Wynikiem transformacji Fouriera jest widmo częstotliwości. Ułatwia ono interpretację wyników badania *impact-echo*, gdyż w obrazowy sposób ukazuje, jaki udział w sygnale mają sinusoidy o poszczególnych częstotliwościach (Rys.17). W aspekcie zjawisk falowych (sinusoidalnych), a takim jest propagacja fali sprężystej, wyodrębnienie częstotliwości dominującej lub dominujących i określenie ich względnego udziału stanowi podstawę do wyciągnięcia dalszych wniosków (por. rozdział 3.1).



Rys.17. Prezentacja wyniku analizy Fouriera – widmo częstotliwości

Widmo częstotliwości, czyli rozkład amplitudy w dziedzinie czasu w danym punkcie pomiarowym, nazywa się analogicznie do zobrazowania stosowanego w defektoskopii jako zobrazowanie typu A (*A-scan*). W metodzie *impact-echo* za *A-scan* uznaje się rozkład amplitudy w dziedzinie częstotliwości (Rys.18). Stosowane są także zobrazowania przy skanowaniu wzdłuż linii (*B-scan*) oraz po powierzchni na poziomie danej częstotliwości (*C-scan*).

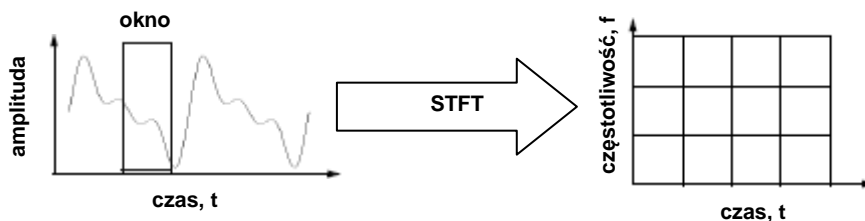


Rys.18. Zasada prezentacji wyników *impact-echo* w postaci: A-scanów (1a, 2a, ...), B-scanów i C-scanów [3]

Standardowa i szybka transformacja Fouriera ma wadę. Podczas transformacji informacja dotycząca czasu jest całkowicie pominięta, a nawet usunięta. Sinusoida, bowiem, jest sygnałem, który wprawdzie jest ściśle określony w dziedzinie częstotliwości, natomiast jego pełna okresowość powoduje brak możliwości określenia zmian zjawiska w czasie. Właściwość ta nie jest istotna dla zjawisk o charakterze statycznym, jednakże w przypadku bardziej skomplikowanych i dynamicznych sygnałów o różnych trendach i nagłych zmianach,

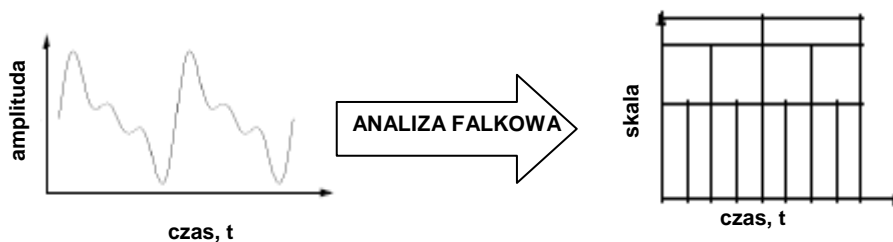
informacja na temat czasu jest bardzo istotna i wtedy analiza Fouriera staje się mniej użyteczna.

Gabor (1946), w celu udoskonalenia analizy Fouriera, zastosował tego rodzaju analizę w małym odcinku w dziedzinie czasu – oknie (stąd wywodzi się nazwa metody – okienkowa transformacja Fouriera: ang. *Short Time Fourier Transform, STFT* lub *Window Fourier Transform, WFT*). Wynikiem takiej analizy jest dwuwymiarowe odwzorowanie w postaci funkcji czasu i częstotliwości (Rys.19). *STFT* stanowi rodzaj kompromisu między rozkładem amplitudy w czasie oraz widmem częstotliwości sygnału i dostarcza informacji, kiedy i na jakim poziomie częstotliwości pojawia się zaburzenie sygnału. Nie jest to jednak informacja precyzyjna, a jej dokładność jest uwarunkowana wielkością okna. Wadą jest fakt, iż po wyborze pewnego rozmiaru *okna* pozostaje ono stałe dla całej analizy. Wiele sygnałów wymaga bardziej elastycznego podejścia z możliwością zmiany wielkości okna, w celu dokładniejszego określenia bądź czasu bądź częstotliwości.



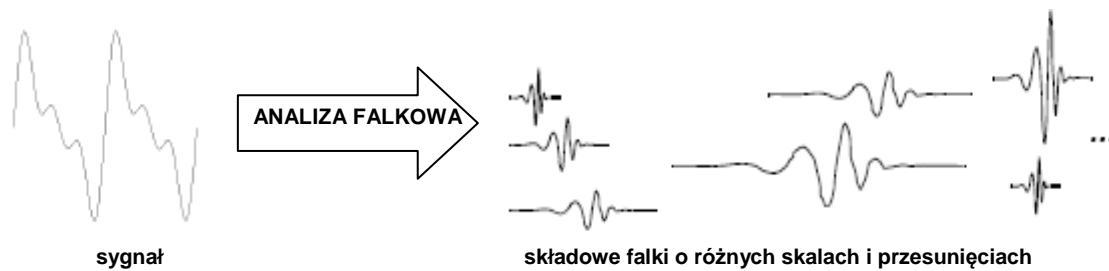
Rys.19. Prezentacja wyniku okienkowej analizy Fouriera

Analiza falkowa prezentuje kolejny logiczny krok w celu udoskonalenia metod analizy częstotliwościowej sygnału i jest rodzajem techniki okien o zmiennych rozmiarach. Analiza falkowa pozwala na użycie długich przedziałów czasowych, dla których przeprowadzana jest analiza niskoczęstotliwościowa, lub krótkich, gdy przeprowadza się analizę wysokoczęstotliwościową. W porównaniu do *STFT*, gdzie otrzymuje się dwuwymiarowy obraz podzielony na czaso-częstotliwościowe obszary o stałym rozmiarze, analiza falkowa prowadzi do obrazu podzielonego na obszary czaso-skalowe o rozmiarze zmiennym w zależności od przedziału skalowego (Rys.20).



Rys.20. Schemat wyniku analizy falkowej

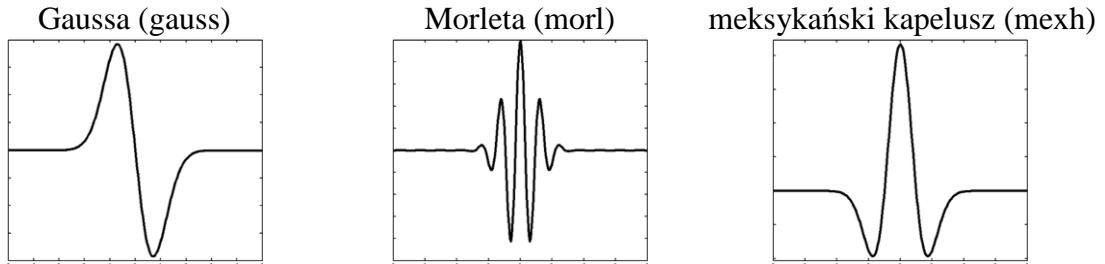
Jest to wynikiem zastosowania falki zamiast okresowej w czasie funkcji sinus, która rozciąga się od minus do plus nieskończoności. Falka natomiast jest „krótką” falą - funkcją dobrze skoncentrowaną w czasie i w częstotliwości, posiadająca minimum kilka oscylacji i jednocześnie dostatecznie szybko malejącą do zera. Analiza falkowa polega na rozbiciu sygnału nie na sinusoidy o różnych częstotliwościach, ale na zbiór przesuniętych i przeskalowanych wersji falki matki (Rys.21).



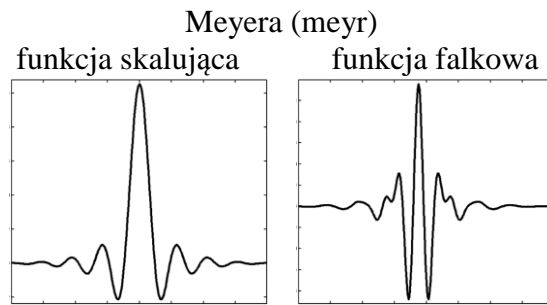
Rys.21. Schemat analizy falkowej

W analizie i przetwarzaniu sygnałów stosuje się wiele różnych typów falek, które można podzielić na kilka typów: proste, regularne, ortogonalne, biortogonalne. Odrębną grupę tworzą falki zespolone, które to pozwalają na uzyskanie informacji zarówno o amplitudzie jak i o fazie oscylacji występujących w analizowanym szeregu czasowym [113]. W przypadku niektórych falek, analiza falkowa pozwala na zastosowanie zarówno transformacji (filtr górnoprzepustowy) jak i aproksymacji (filtr dolnoprzepustowy). W pierwszym przypadku wykorzystuje się funkcje falkowe, natomiast w drugiej funkcje skalujące. Dana funkcja skalująca jest przypisana tylko i wyłącznie jednej funkcji falkowej, czyli nie ma możliwości, by dwie różne falki miały takie same funkcje skalujące. Natomiast nie wszystkie falki posiadają funkcję skalującą (Rys.22).

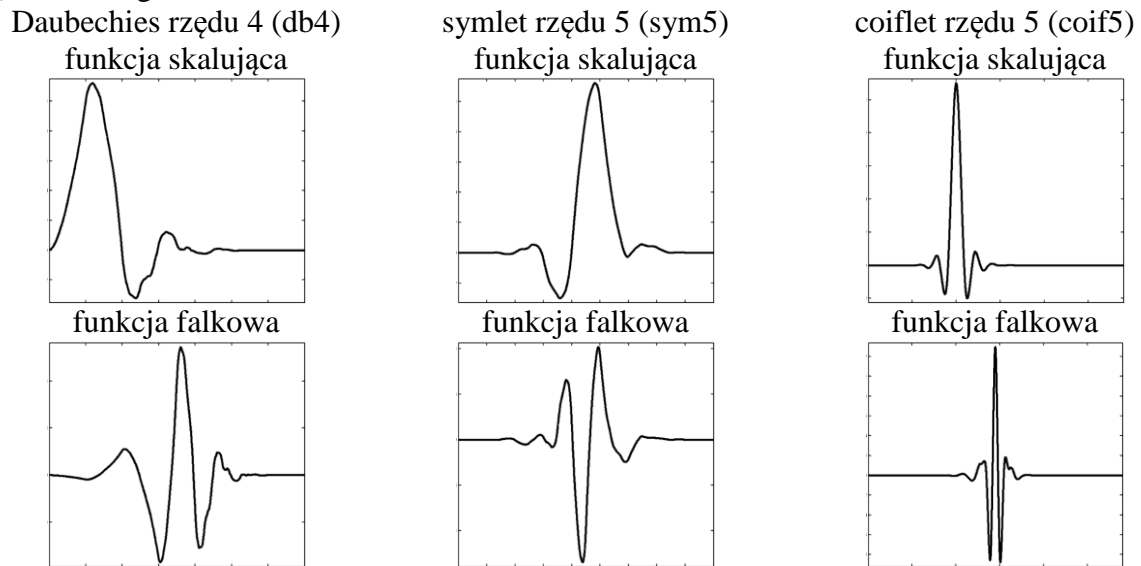
a) falki proste



b) falki regularne



c) falki ortogonalne



d) falki biortogonalne

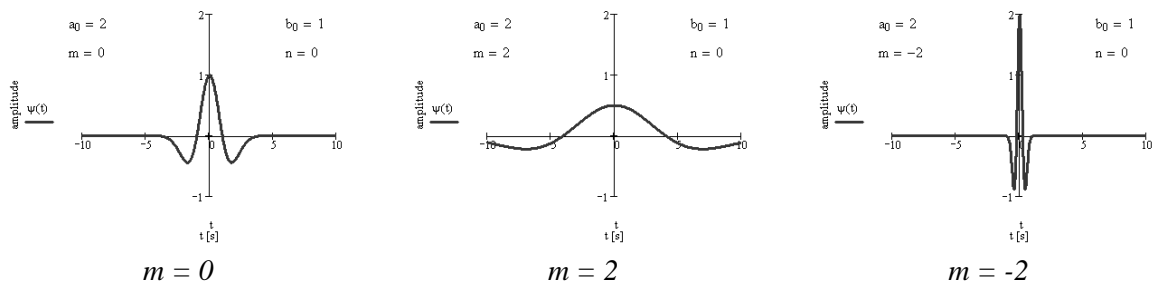


Rys.22. Przykładowe funkcje falkowe i funkcje skalujące dla różnych typów falek

Rodzinę falek możemy przedstawić za pomocą równania:

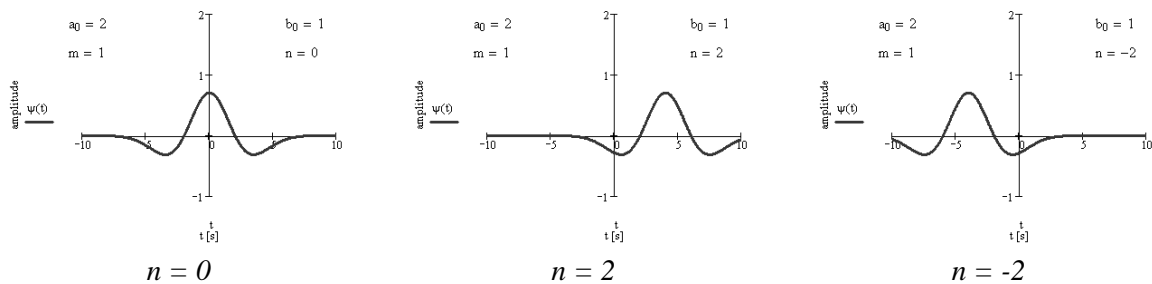
$$\psi_{mn}(t) = a_0^{-m/2} \psi(a_0^{-m} t - nb_0), \quad (20)$$

W równaniu (20) parametry a_0 i m to parametry skalujące i są związane z dziedziną częstotliwości. Falka podstawowa jest to falka o następujących parametrach: $a_0 = 2, m = 0$ i $nb_0 = 0$. Zależność kształtu falki i jej częstotliwości od parametru m przedstawiona jest na rysunku (Rys.23).



Rys.23. Wpływ parametru m na kształt i częstotliwość falki na przykładzie falki meksykański kapelus

Jeśli przyjmiemy falkę podstawową o określonych parametrach a_0 i m to parametry n i b_0 będą określały jej położenie w dziedzinie czasu, tzn. definiują one przesunięcie falki podstawowej na osi poziomej. Zmiana parametru n o 1 powoduje przesunięcie falki podstawowej o $na_0^m b_0$. Zależność położenia falki na osi czasu od parametru n przedstawiona jest na rysunku (Rys.24).



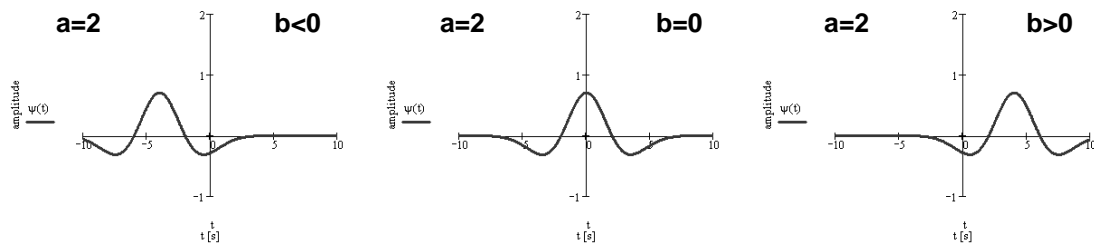
Rys.24. Wpływ parametrów n na przesunięcie falki na przykładzie falki meksykański kapelus

W uproszczonej postaci falkę można przedstawić równaniem:

$$\psi_{mn}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{1-b}{a}\right), \quad (21)$$

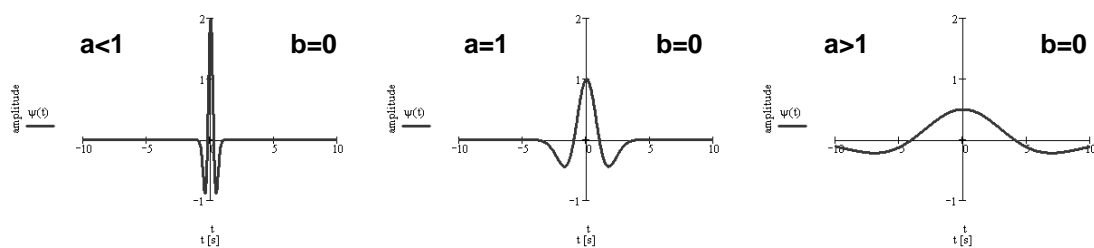
gdzie $a = a_0^m$ (skala) i $b = nb_0$ (przesunięcie).

Przesunięcie b opisuje przyspieszenie lub opóźnienie falki, a więc decyduje o jej usytuowaniu na osi czasu (Rys.25).



Rys.25. Przesunięcie falki b na osi czasu na przykładzie falki meksykański kapelusz

Skala a jest charakterystyką opisującą kształt falki, jej amplitudę i częstotliwość (Rys.26).



Rys.26. Kształt falki w zależności od parametru skali a

Ciągła transformata falkowa (ang. *Continuous Wavelet Transform, CWT*) jest sumą po czasie sygnału pomnożonego przez przesuwane i przeskalowane wersje falki matki. Wynikiem *CWT* jest rozkład współczynników falkowych $C(a,b)$ w funkcji skali (odpowiadającej częstotliwości) i czasu. Mnożąc współczynnik przez odpowiednio przesuniętą i przeskalowaną falkę matkę otrzymujemy składową sygnału. Ich suma tworzy cały sygnał. Wartość współczynników falkowych jest wymiarem opisującym jak bliska jest zbieżność między falką i daną sekcją sygnału. Im wyższa wartość współczynnika C tym większy udział w sygnale ma dana falka. Jeżeli energia zarówno sygnału, jak i falki jest równa 1, to współczynnik falkowy, C można interpretować jako pewnego rodzaju współczynnik korelacji. Na podstawie współczynników możliwa jest rekonstrukcja sygnału wg równania:

$$f(x) = \frac{1}{K_\psi} \int_{a=-\infty}^{\infty} \int_{b=-\infty}^{\infty} C(a,b) \psi_{a,b}(x) db \frac{da}{a^2}, \quad (22)$$

Pewną niedogodnością *CWT* jest bardzo duża liczba obliczanych współczynników falkowych i trudności w interpretacji wyniku w postaci skomplikowanego skalogramu. W przypadku falek, które mają obok funkcji falkowej funkcję skalującą, możliwe jest wykonanie dyskretnej analizy falkowej (ang. *Discrete Wavelet Transform, DWT*) stosując dyskretne wartości

parametrów skalowania: $a = 2^j, b = k \cdot 2^j$, gdzie $k, j \in C$. Współczynniki falkowe oblicza się ze wzoru:

$$C_{j,k} = 2^{-j/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi(2^{-j}x - k) dx = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi_{j,k}(x) dx, \quad (23)$$

W uproszczeniu polega to na wybraniu podzbioru skali i pozycji falki na osi czasu. W dyskretnej analizie falkowej mamy do czynienia ze skalowaniem diadycznym tzn. $a_0 = 2$. Wynika z tego, że zmiana parametru m o 1 powoduje dwukrotną (odwrotnie proporcjonalną) zmianę skali częstotliwości. Analiza taka, staje się bardziej efektywna i umożliwia zredukowanie liczby operacji niezbędnych do zrekonstruowania sygnału. Algorytm tej rekonstrukcji nazywamy odwrotną dyskretną transformacją falkową (ang. *Inverse Discrete Wavelet Transform, IDWT*). Zrekonstruowany sygnał można zapisać jako:

$$f(x) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_{j,k} 2^{-j/2} \psi(2^{-j}x - k), \quad (24)$$

lub:

$$f(x) = \sum_{j=-\infty}^J \left(\sum_{k=-\infty}^{\infty} cD_j(k) \psi_{j,k}(x) \right) + \sum_{k=-\infty}^{\infty} cA_J(k) \phi_{j,k}(x) \quad (25)$$

Funkcję:

$$D_j(x) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} cD_j(k) \psi_{j,k}(x), \quad (26)$$

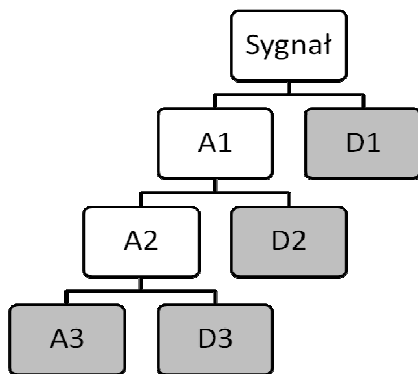
nazywamy detalem na poziomie j , a funkcję:

$$A_J(x) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} cA_J(k) \phi_{j,k}(x), \quad (27)$$

aproxymacją sygnału na poziomie J .

W wyniku takiej interpretacji oryginalny sygnał można przedstawić jako sumę aproxymacji na poziomie J i poszczególnych detali z poziomów $j \leq J$ (Rys.27a). Aproxymacje są wysoko-skalowymi, niskoczęstotliwościowymi składnikami sygnału, opisującymi charakter (trend) sygnału. Detale natomiast jako niskoskalowe, wysokoczęstotliwościowe składniki przedstawiają, nagłe zmiany i inne miejscowe zdarzenia oraz występujący szum. Ostatecznie wynikiem *DWT* jest zbiór aproxymacji i detali na różnych poziomach skali: 2,4,8,16,32,64...itd. (wielorozdzielcza analiza sygnału) składających się na sygnał (Rys.27b).

a)

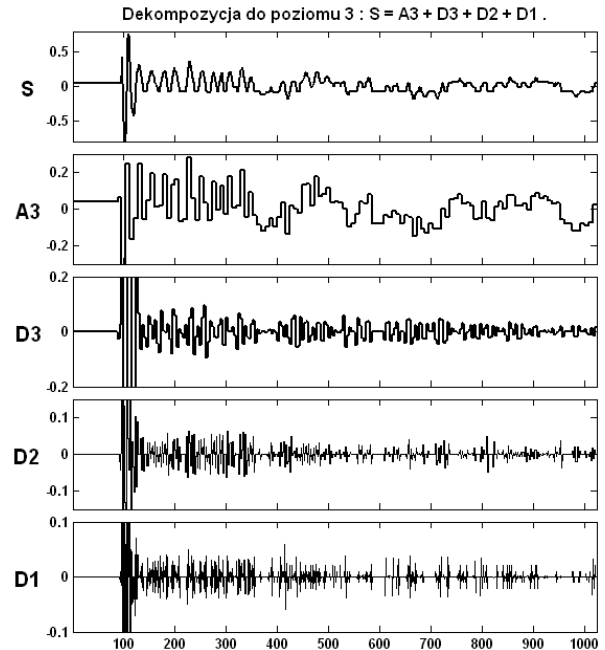


$$S = A1 + D1$$

$$S = A2 + D1 + D2$$

$$S = A3 + D1 + D2 + D3$$

b)



Rys.27. Schemat wielorozdzielczej analizy sygnału (a) i wynik analizy *DWT* sygnału *impact-echo* – dekompozycja do poziomu 3 (b)

W niniejszej pracy sygnał po *DWT* poddano analizie statystycznej w celu wyznaczenia statystycznych parametrów rozkładu detali w aspekcie określenia zależności między propagacją fali sprężystej a parametrami charakteryzującymi jakość zespolenia układu naprawczego. W przypadku falek, dla których znana jest dokładna postać funkcji skalującej istnieje ponadto, możliwość przyspieszenia obliczeń i zastosowania nisko- i wysokopasmowych filtrów, czyli tak zwanej Pakietowej Analizy Falkowej, w której nie tylko kolejne aproksymacje, A, ale także poszczególne detale, D są poddawane dekompozycji. Aby uzyskać taką wielopoziomową reprezentację sygnału składającego się na każdym poziomie z sumy reprezentacji szczegółowej (detale) i zgrubnej (aproksymacja) niezbędne jest, aby falka obok funkcji falkowej miała również funkcję skalującą [56].

Tab.11. Charakterystyka różnych typów falek

typ falki	proste			regularne	ortogonalne			biortogonalne
nazwa falki	Gauss	Morlet	Mexican Hat	Meyer	Daubechies	Symlet	Coiflet	Biortogonalna
skrótowa nazwa	gauss	morl	mexh	meyr	db	sym	coif	bior
rzęd falki	jeden typ	jeden typ	jeden typ	jeden typ	$N = 1, 2, \dots, 45$	$N = 1, 2, \dots, 45$	$N = 1, 2, \dots, 5$	Nr.Nd
przykład	gauss	morl	mexh	meyr (dmey)	db1=haar, db2,..., db45	sym1,..., sym45	coif1,..., coif5	bior1.1, bior3.7, bior6.8
ortogonalność	NIE	NIE	NIE	TAK	TAK	TAK	TAK	NIE
biortogonalność	NIE	NIE	NIE	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK
symetria	TAK	TAK	TAK	TAK	NIE	bliskie symetrii	bliskie symetrii	TAK
CWT	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK
DWT	NIE	NIE	NIE	TAK, ale bez FWT	TAK	TAK	TAK	TAK

Istotne podczas analizy falkowej jest powiązanie skali, a z częstotliwością. Funkcja falkowa nie reprezentuje tymczasem jednej częstotliwości, lecz jej przedział i z tego powodu w przypadku falek mówi się o pseudoczęstotliwości, f_a . W przypadkach, gdy mniej istotna jest precyzyjna informacja o częstotliwościach występujących w sygnale, a ważniejsze jest, kiedy te częstotliwości ulegają zmianie, właściwość ta nie stanowi jednak ograniczenia. Również w rozpatrywanym w pracy aspekcie, kiedy to rozważany jest raczej zakres częstotliwości odpowiadający odbiciu fali od powierzchni rozdziału, a nie dokładna jej wartość, właściwość ta raczej porządana.

Pseudoczęstotliwość, f_a wyrażona jest równaniem:

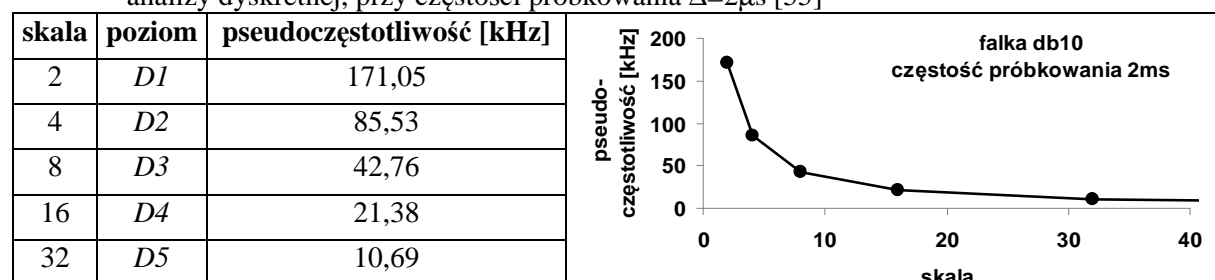
$$f_a = \frac{f_c}{a \cdot \Delta}, \quad (28)$$

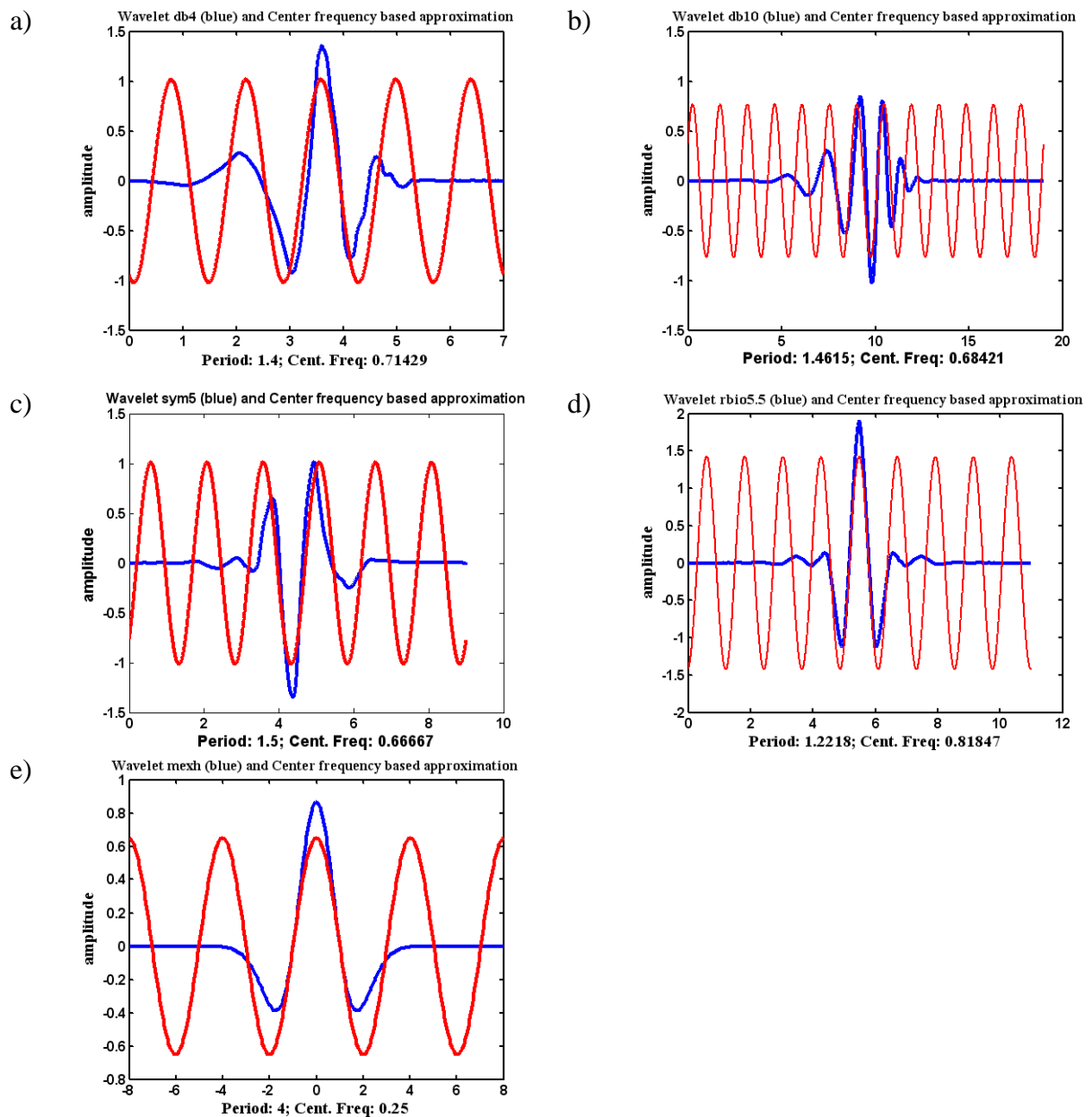
gdzie: f_c – częstotliwość środkowa falki, a – skala, Δ – częstość próbkowania [s].

Występująca w równaniu (28) środkowa częstotliwość danej falki, f_c , charakteryzująca główną oscylację falki jest to dominująca częstotliwość transformaty Fouriera na funkcji danej falki (Rys.28).

Zgodnie z równaniem (28) można obliczyć pseudoczęstotliwości dla poszczególnych detali analizy dyskretnej, odpowiadające diadycznym wartościom skali, jak również powiązać skalę, a z częstotliwością w sposób ciągły dla ciągłej transformaty falkowej (Tab.12).

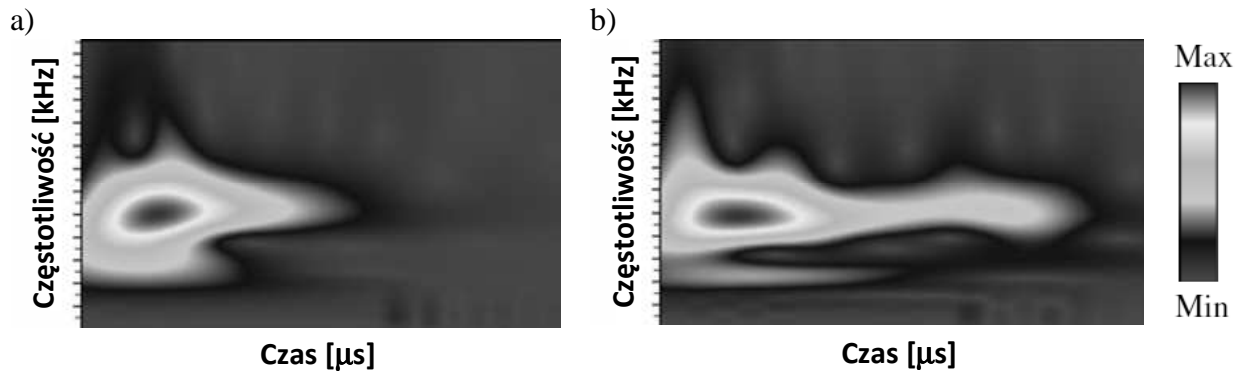
Tab.12. Pseudoczęstotliwość falki *db10* ciągłej analizy falkowej oraz dla detali poziomów *D1-D5* analizy dyskretnej, przy częstości próbkowania $\Delta=2\mu\text{s}$ [55]





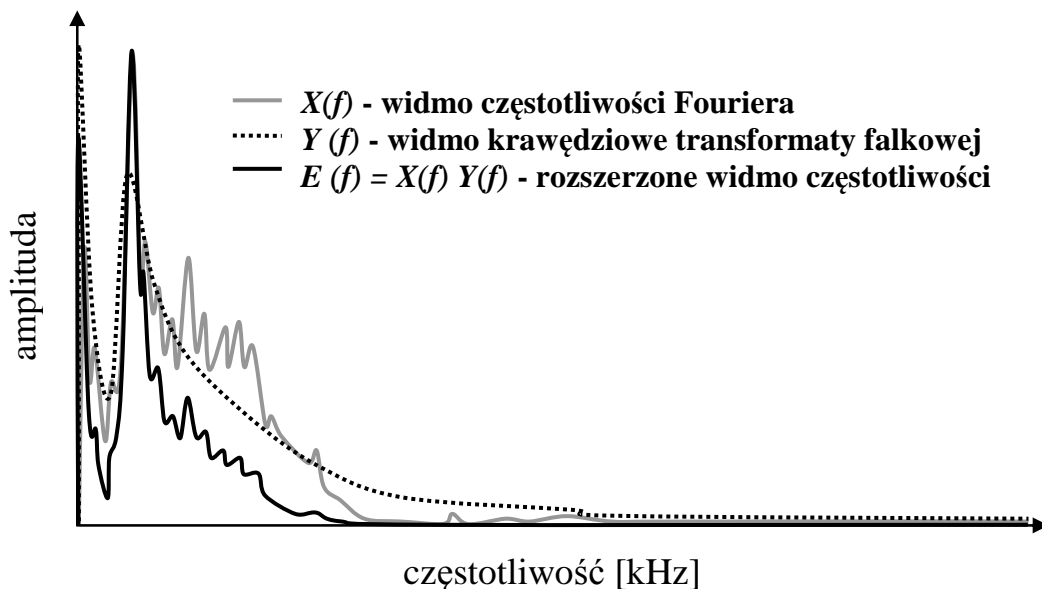
Rys.28. Wykres falki i odpowiadającej jej sinusoidy o częstotliwości środkowej danej falki: db4 (a), db10 (b), sym5 (c), rbior 5.5 (d), mexh (e) – wykresy otrzymane z programu MatLab Wavelet Toolbox

W ostatnim czasie pojawiły się próby zastosowania analizy falkowej w interpretacji sygnału *impact-echo*. Aggelis i in. [1] zastosowali transformację falkową do wizualizacji różnic między sygnałami dla przypadków, gdy pustka powietrzna między rurą kanalizacyjną a podłożem jest całkowicie lub częściowo wypełniona zaprawą (Rys.31).



Rys.29. Ocena skuteczności wypełnienia pustek między ścianą rury betonowej a podłożem przy wykorzystaniu analizy falkowej: całkowite wypełnienie (a), częściowe wypełnienie (b) wg [1]

Z kolei Yeh i Liu [110] zastosowali aproksymację falkową do wygładzenia widm częstotliwości, w celu usunięcia z niego zakłóceń i wskazania położenia pików od powierzchni rozdziału (rozległej delaminacji) w układach wielowarstwowych. Zaproponowali zastosowanie rozszerzonego widma częstotliwości powstałego jako iloczyn transformaty Fouriera wyrażonej wzorem (14) i krawędziowego widma transformaty falkowej (Rys.30). Zabieg ten, wg Yeh i Liu, pozwala na jednoczesne wzmocnienie pików od powierzchni rozdziału i osłabienie pików zawierających informacje mniej istotne.



Rys.30. Porównanie spectrum częstotliwości z analizy Fouriera (a), analizy falkowej (b) i rozszerzonego widma Fouriera po połączeniu z analizą falkową (c) wg [110]

4. PROGRAM I METODA BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

4.1. Przedmiot badań

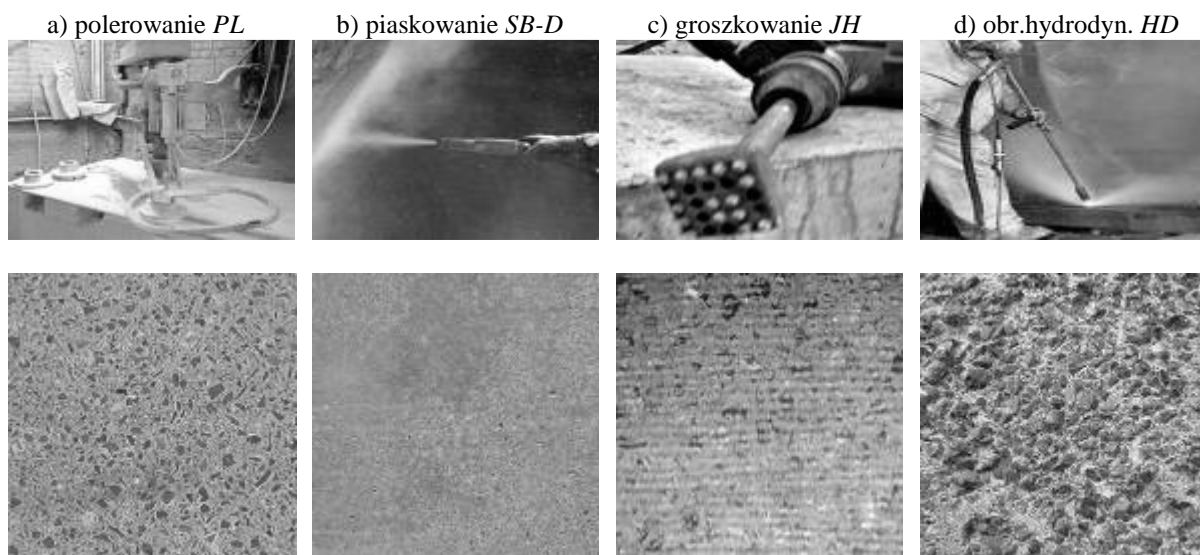
Badania zostały przeprowadzone na dwóch grupach próbek - układów naprawczych, które różniły się z uwagi na rodzaj podłoża betonowego, jaki stanowiły podkłady betonowe w postaci płyt. Podkłady *Grupy A* o wymiarach 60x80x10 cm wykonano w laboratorium Uniwersytetu w Liege. Skład mieszanki betonowej dobrano tak, aby uzyskać podkłady odpowiadające klasom wytrzymałości na ściskanie: C30/37, C40/50 i C50/60. Przeprowadzono ocenę zgodności wytrzymałości projektowanego betonu z wymaganą wytrzymałością charakterystyczną f_{ck} dla danej klasy wytrzymałości na ściskanie zgodnie z PN-EN 206-1. W przypadku betonu o projektowanej klasie wytrzymałości na ściskanie C50/60 stwierdzono, że w rzeczywistości odpowiada on klasie C45/55.

Drugi rodzaj podkładów (*Grupa B*) stanowiły płyty betonowe o wymiarach 50x50x7cm wykonane w Laboratorium Katedry Inżynierii Materiałów Budowlanych Politechniki Warszawskiej. Skład mieszanki betonowej zaprojektowano tak, aby otrzymać płyty betonowe w trzech klasach wytrzymałości betonu na ściskanie rozszerzających zakres klas wytrzymałości próbek grupy A tj. C25/30, C35/45 oraz C50/60. Przeprowadzona ocena zgodności wg PN-EN 206-1 potwierdziła uzyskanie założonych klas wytrzymałości. W efekcie otrzymano pełen zakres podkładów betonowych z uwagi na klasę wytrzymałości na ściskanie betonu, od C25/30 do C50/60. Szczegółowe składy betonu próbek *Grupy A i B* zaprojektowane przy wykorzystaniu metody trzech równań oraz wyniki weryfikacji klasy wytrzymałości betonu na ściskanie zawiera Załącznik I.

W celu uzyskania podłoża betonowego o zróżnicowanej jakości powierzchni po 28 dniach dojrzewania zastosowano obróbki powierzchniowe różniące się stopniem agresywności. Podkłady *Grupy A* poddano (Rys.31):

- polerowaniu, *PL*;
- piaskowaniu metodą suchą, *SB-D*;
- groszkowaniu, *JH*;
- obróbce hydrodynamicznej z ciśnieniem 250 MPa, *HD*.

Przygotowane w ten sposób podłoża betonowe charakteryzowały się różnym stopniem rozwinięcia powierzchni. Ze względu na znacznie zróżnicowany stopień agresywności obróbek spodziewano się także zróżnicowanego poziomu mikrozarysowania podłoża w warstwie przypowierzchniowej [47,101,102].



Rys.31. Sposób obróbki oraz powierzchnia podkładów grupy A po obróbce

Badania metodą *impact-echo* podkładów Grupy A wykazywały duży wpływ stopnia mikrozarzysowania warstwy przypowierzchniowej na rejestrowane sygnały. W związku z tym w kolejnym etapie badań (podkłady Grupy B) zastosowano obróbki o mniejszej agresywności w stosunku do podłoża. Podkłady betonowe Grupy B poddano:

- piaskowaniu metodą mokrą, *SB-W*;
- frezowaniu, *SC*;
- czyszczeniu strumieniem wody o niskim ciśnieniu, *LC*;
- czyszczeniu szczotką drucianą, *NT*.

W efekcie otrzymano podłoża betonowe o zbliżonej chropowatości i niewielkim mikrozarzysowaniu warstwy przypowierzchniowej. Oznaczenia poszczególnych typów próbek stosowane w dalszej części pracy podano w Tab.13.

Tab.13. Oznaczenie próbek Grupy A i B

Oznaczenie typu podłoża	<i>Polerowanie</i>	<i>Piaskowanie metoda sucha</i>	<i>Groszkowanie</i>	<i>Obr. hydrodynamiczna (wysokie ciśnienie)</i>
<i>C30A</i>	C30-PL	C30-SB-D	C30-JH	C30-HD
<i>C40A</i>	C40-PL	C40-SB-D	C40-JH	C40-HD
<i>C45A</i>	C45-PL	C45-SB-D	C45-JH	C45-HD
	<i>Czyszczenie szczotką drucianą</i>	<i>Piaskowanie metoda mokra</i>	<i>Frezowanie</i>	<i>Czyszczenie strumieniem wody o niskim ciśnieniu</i>
<i>C25B</i>	C25-NT	C25-SB-W	C25-SC	C25-LC
<i>C35B</i>	C35-NT	C35-SB-W	C35-SC	C35-LC
<i>C50B</i>	C50-NT	C50-SB-W	C50-SC	C50-LC

Na tak przygotowane podkłady betonowe (*Grupa A i B*) nałożono handlowo dostępne na rynku modyfikowane materiały naprawcze (Tab.14). W przypadku podkładów *Grupy A* charakteryzujących się dużym stopniem rozwinięcia powierzchni nałożono zaprawę o maksymalnym wymiarze ziarna $D_{max} = 2$ mm, natomiast na podkłady *Grupy B* o mniejszej chropowatości nałożono zaprawę o $D_{max} = 0,25$ mm. Zaprawy nałożone zostały zgodnie z wytycznymi producentów. W odniesieniu do podkładu betonowego szczególną uwagę zwrócono na właściwe odpylenie powierzchni sprężonym powietrzem i jej odpowiednie zwilżenie przed nałożeniem warstwy naprawczej. Otrzymano w ten sposób 24 modelowe układy naprawcze (12 próbek *Grupy A* i 12 próbek *Grupy B*) o zróżnicowanej jakości zespolenia (Tab.15).

Tab.14. Charakterystyka techniczna użytych materiałów naprawczych

Ip.	Właściwości	Wartość	
		Zaprawa naprawcza typu PCC (A)	Zaprawa naprawcza typu PCC (B)
1	Wygląd zewnętrzny w postaci fabrycznej	Jednorodny sypki proszek, o jednolitej barwie, bez zbryleń i obcych wtrąceń	
2	Wygląd zewnętrzny po zmieszaniu z wodą	Jednorodna mieszanka o wyglądzie typowej zaprawy cementowej, bez grudek i zanieczyszczeń, niewykazująca tendencji do segregacji	
3	Gęstość nasypowa w stanie luźnym [kg/m ³]	1450	1350
4	D_{max} [mm]	2,00	0,25
5	Czas wiązania: - początek - koniec	450 min 540 min	20 min 120 min
6	Przyczepność [MPa] – gr. warstwy 10 mm	≥ 2,0	≥ 1,0
7	Wytrzymałość na zginanie [MPa]: 7 dn: 28 dn:	≥ 5,0 ≥ 8,0	≥ 6,0 ≥ 12,0
8	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]: 7 dn: 28 dn:	≥ 50,0 ≥ 60,0	≥ 20,0 ≥ 30,0

Tab.15. Ogólna charakterystyka modelowych układów naprawczych

	<i>Grupa A</i>				<i>Grupa B</i>			
Rodzaj materiału naprawczego	zaprawa naprawcza typu PCC				drobnoziarnista zaprawa modyfikowana polimerem			
Typ obróbki	<i>PL</i>	<i>SB-D</i>	<i>JH</i>	<i>HD</i>	<i>NT</i>	<i>SB-W</i>	<i>SC</i>	<i>LC</i>
Wymiary podłoża betonowego	80x60x10 cm				50x50x7cm			
Typ podłoża betonowego	C30A	C40A	C45A		C25A	C35A	C50A	
Grubość warstwy naprawczej	3 cm				3 cm			
Ilość płyt	12 płyt				12 płyt			

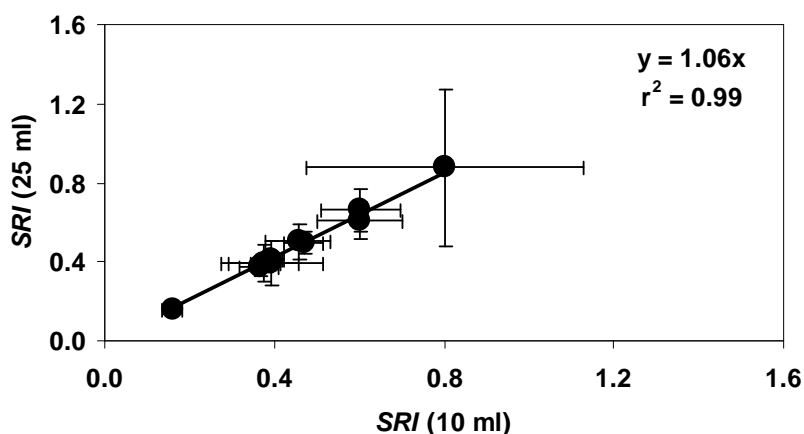
4.2. Ocena chropowatości podłoża betonowego

Chropowatość powierzchni podłoża betonowego po obróbce została określona zgodnie z zaleceniem normy PN-EN 1504-10 metodą plamy piaskowej wg PN-EN 1766 (por. Tab.5). Po upewnieniu się, że powierzchnia jest sucha i czysta, napełniano cylinder określoną objętością piasku i ostrożnie, żeby nie zagęścić piasku przez wibrację, wyrównywano poziom na górze cylindra. Następnie piasek był wysypany na przygotowaną powierzchnię betonu i przy użyciu trzymanej płasko tarczy wprowadzonej w ruch obrotowy, był rozłożony w formie okrągłej plamy, wypełniając wszystkie wolne przestrzenie. Czynność uznawano za zakończoną, jeśli nie osiągnano dalszego widocznego rozproszania piasku. Średnicę plamy piasku mierzono z dokładnością do 1 mm w trzech kierunkach rozłożonych równomiernie na obwodzie koła i obliczano średnią wartość średnicy, d_{SRI} , z zaokrągleniem do najbliższego milimetra. Wskaźnik chropowatości powierzchni (ang. *Surface Roughness Index*, *SRI*) w milimetrach, obliczono z równania:

$$SRI = \frac{V_{SRI}}{d_{SRI}^2} \cdot 1272, \quad (29)$$

gdzie: V_{SRI} – objętość użytego piasku [ml], d_{SRI} – średnia wartość średnicy plamy piaskowej [mm]

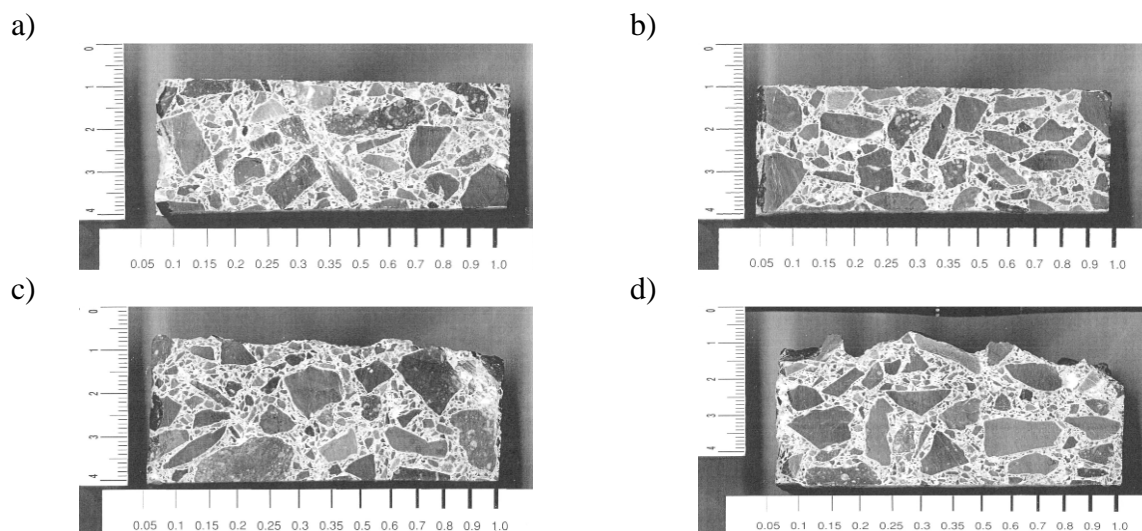
Pomiaru dokonano czterokrotnie w środku każdej z płyt. Dodatkowo w przypadku próbek *Grupy A* po obróbce hydrodynamicznej, *HD* i groszkowaniu, *JH*, ze względu na dużą nieregularność powierzchni wynik zweryfikowano w dwóch innych miejscach płyty. W przypadku *Grupy A* stosowano objętość piasku - 22,15 ml, *Grupa B* - 25 ml). Dla próbek *Grupy B* przeprowadzono badania dla dwóch objętości piasku: 10 ml i 25 ml. Uzyskane wyniki wskazują, że wartość *SRI* jest praktycznie niezależna od objętości użytego piasku.



Rys.32. Wskaźnik chropowatości wg PN-EN 1766 w zależności od objętości użytego piasku

4.3. Ocena stopnia mikrozarzysowania w warstwie przypowierzchniowej podłoża betonowego

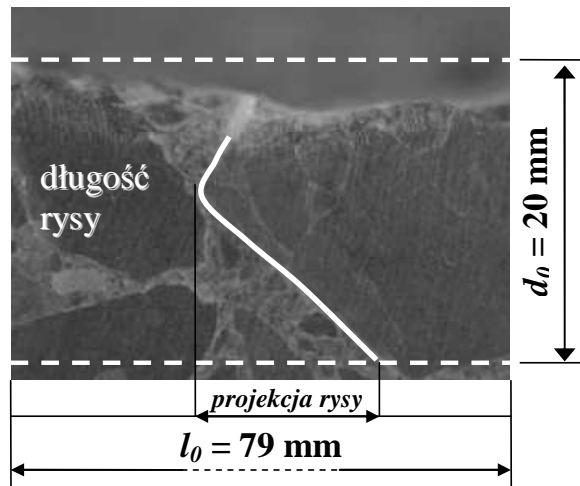
Wpływ obróbki powierzchniowej na mikrozarzysowanie warstwy przypowierzchniowej analizowano w przypadku podkładów *Grupy A* [83]. Obserwację stopnia mikrozarzysowania przeprowadzono na szlifie przekroju poprzecznego, który otrzymano przecinając na pół wyciętą wiertnicą próbkę w kształcie walca o średnicy wewnętrznej 80 mm (Rys.33).



Rys.33. Obrazy przekroju poprzecznego próbek po obróbce: *PL* (a), *SB-D* (b), *JH* (c), *HD* (d)

Na podstawie badań Courarda i in. [22] oraz Garbacza i in. [52] za reprezentatywną do oceny stopnia mikrozarzysowania dla zastosowanych obróbek przyjęto warstwę o grubości $d_0 \approx 20\text{mm}$ licząc od powierzchni. Parametry charakteryzujące rozkład rys określono na długości pomiarowej równej średnicy pobranej próbki walcowej $l_0 = 79\text{mm}$. Po zarejestrowaniu obrazu układu rys na dwóch przekrojach poprzecznych podłoża betonowego danej klasy wytrzymałości określono następujące parametry charakteryzujące ich rozkład (Rys.34):

- liczba rys na jednostkę powierzchni (n_l);
- gęstość rys (L_A) – średnia długość rys na jednostkę powierzchni;
- udział długości projekcji rys w całkowitej szerokości przekroju (X_{lx});
- wsp. orientacji rys (R_l) – określony jako stosunek sumarycznej długości projekcji rys na oś poziomą do sumarycznej długości rys.

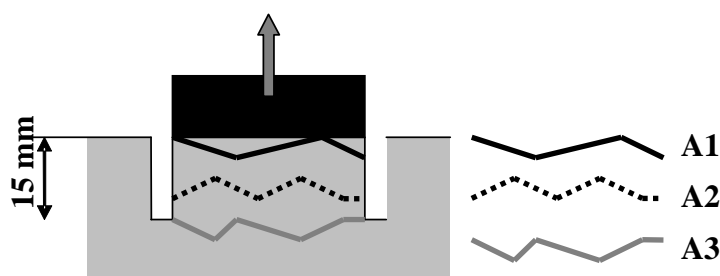


Rys.34. Zdjęcie przekroju poprzecznego z mikroskopu optycznego z widocznym mikrozarysowaniem po obróbce

4.4. Przypowierzchniowa wytrzymałość na rozciąganie podłoża betonowego i przyczepność przez odrywanie

Pomiaru przypowierzchniowej wytrzymałości na rozciąganie dla próbek *Grupy A* dokonano w pięciu punktach w odległości nie mniejszej niż 10 cm od krawędzi płyty, natomiast dla próbek *Grupy B* z uwagi na mniejszą powierzchnię płyty w trzech.

W stosunku do wskazań normy PN-EN 1504-10 ocenę jakości powierzchni rozszerzono o analizę sposobu zniszczenia warstwy przypowierzchniowej w wyniku zastosowanej obróbki i rejestrowano, obok siły odrywającej, następujące typy zniszczenia z uwagi na głębokość wystąpienia: *A1* – przy powierzchni, *A2* – na głębokości pośredniej, *A3* – na głębokości odwiertu (Rys.35).

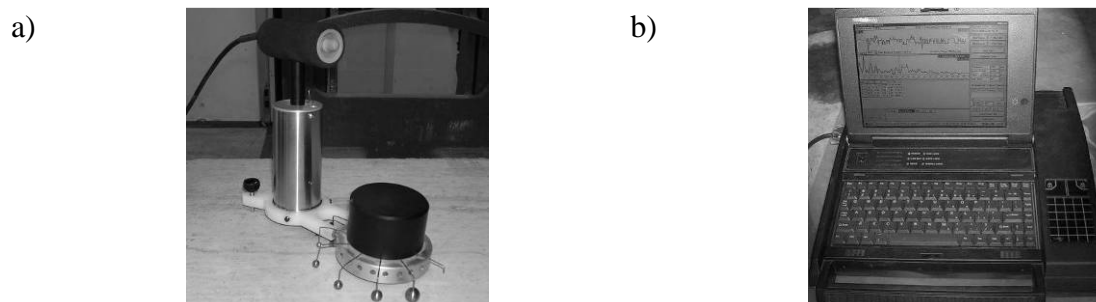


Rys.35. Schemat badania przypowierzchniowej wytrzymałości na rozciąganie z zaznaczonymi typami zniszczenia

Wartość przyczepności materiału naprawczego do podłoża betonowego określono wykonując badanie *pull-off* w pięciu punktach dla próbek *Grupy A* i czterech punktach dla próbek *Grupy B*. Badanie przeprowadzono zgodnie z warunkami określonymi w PN-EN 1542 (por. rozdział 2.4).

4.5. Badanie integralności betonu metodą *impact-echo*

Badanie *impact-echo* przeprowadzono przy użyciu systemu DOCTer Impact Echo. System składa się z tzw. pająka (ang. *Spider*) z zestawem kulek do wzbudzenia fali sprężystej przez uderzenie o powierzchnię badanego materiału, piezoelektryczny odbiornik (rejestrator drgań) oraz oprogramowania do rejestracji i przetwarzania danych. Sygnał składający się z 1024 punktów rejestrowano z częstością próbkowania 2 μ s. Rozdzielczość sygnału na osi amplitudy wynosiła $12,20703 \cdot 10^{-4}$ V.

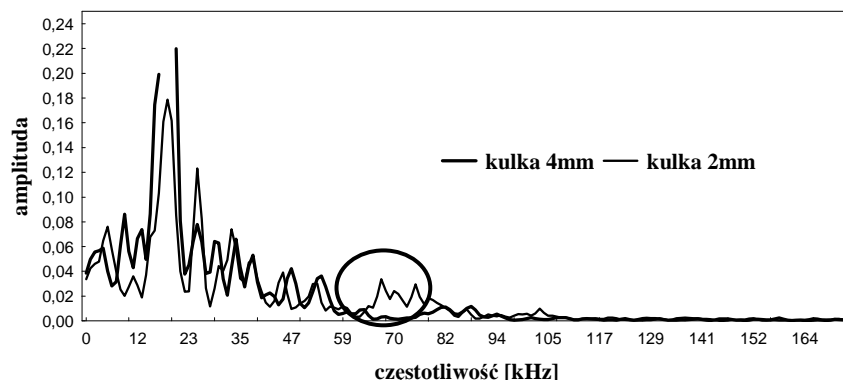


Rys.36. Aparat DOCTer do badań metodą Impact Echo: pająk z piezoelektrycznym odbiornikiem (a) oraz komputerowa jednostka rejestrująca Fieldworks (b)

Analiza uwarunkowań wykrywalności defektów metodą *impact-echo* (por. rozdział 3.1) wskazuje, że właściwą dla badanych układów naprawczych jest kulka średnicy 2 mm. W przypadku następnej dostępnej średnicy kulki 4 mm głębokość defektu możliwego do wykrycia, przy założeniu prędkości fali P równej 4000 m/s, wynosi ok. 28mm (Tab.16). Powierzchnia rozdziału zlokalizowana jest na głębokości około 30 mm, więc spodziewać się można, że sygnał otrzymany przy badaniu kulką 4 mm nie będzie zawierał informacji o jakości zespolenia. Potwierdziła to analiza widm częstotliwości otrzymanych przy badaniu układu naprawczego *C40-PL* impaktorami o średnicy 2 i 4 mm. W widmie częstotliwości w przypadku badania kulką 4 mm pik w zakresie częstotliwości odpowiadającym powierzchni rozdziału (ok. 60-70 kHz) nie jest widoczny, natomiast pojawia się w sygnale przy padaniu kulką 2 mm (Rys.37). Zmniejszenie średnicy kulki powoduje wzrost czułości metody w detekcji wad, ale sprawia, że widmo jest bardziej złożone.

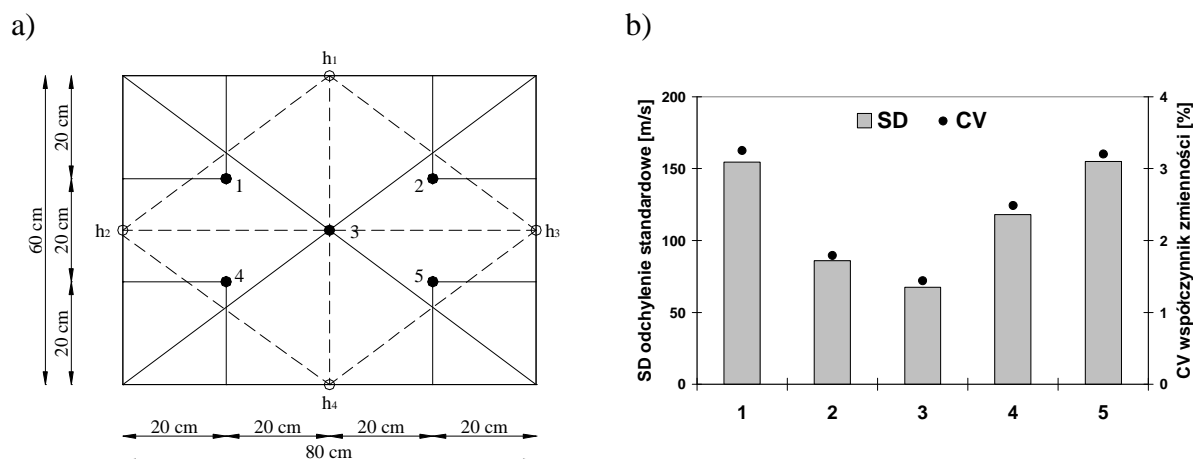
Tab.16. Zakres detekcyjny metody *impact-echo*: średnica kulki 2 i 4 mm, prędkość fali P 4000 m/s

średnica kulki	czas kontaktu	max. częstotliwość o użytecznej energii	min. długość fali	min. wymiar poprzeczny defektu	min. i max. głębokość występowania defektu	
D	t_c	f_{max}	λ_{min}	L_{min}	h_{min}	h_{max}
[mm]	[μ s]	[kHz]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
2,0	8,60	145,35	27,5	27,5	13,8	110,1
4,0	17,20	72,67	55,0	55,0	27,5	220,2



Rys.37. Widmo częstotliwości dla kulki o różnych średnicach dla układu naprawczego z podkładem C40-PL

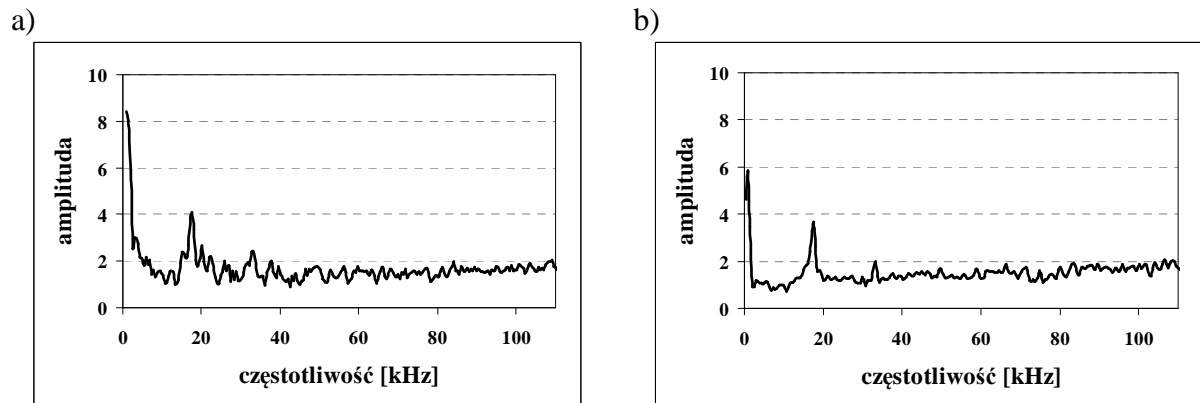
W badaniach *impact-echo* istotnym zaburzeniem może być „efekt krawędziowy” tzn. odbicie fali powierzchniowej od krawędzi próbki. Występowanie efektu krawędziowego potwierdziły przeprowadzone pomiary grubości w pięciu punktach płyty podłoża betonowego (Rys.38a). Wyniki pomiaru dla punktu 3 (środek płyty) są najbardziej stabilne (najmniejsze odchylenie standardowe SD i współczynnik zmienności CV) (Rys.38b).



Rys.38. Dystrybucja punktów pomiarowych *impact-echo* (a) i parametry statystyczne rozkładu wyników pomiaru prędkości fali sprężystej dla tych punktów (b)

Przeprowadzone symulacje propagacji fali sprężystej przez Garbacza i Kwaśniewskiego [51] wykazały, że przy przyjętych wymiarach płyt betonowych wyniki badania *impact-echo* można traktować jako reprezentatywne dla ośrodka nieograniczonego w konstrukcji. Symulacje przeprowadzono dla płyty o wymiarach 80x60x13 cm oraz płyty o tej samej grubości i nieskończonych wymiarach x,y (Rys.39). Wprowadzie tzw. efekt krawędziowy w postaci zaburzeń jest widoczny w widmie częstotliwości, natomiast różnica w całym zakresie otrzymanych widm częstotliwości jest bardzo mała. W obu przypadkach

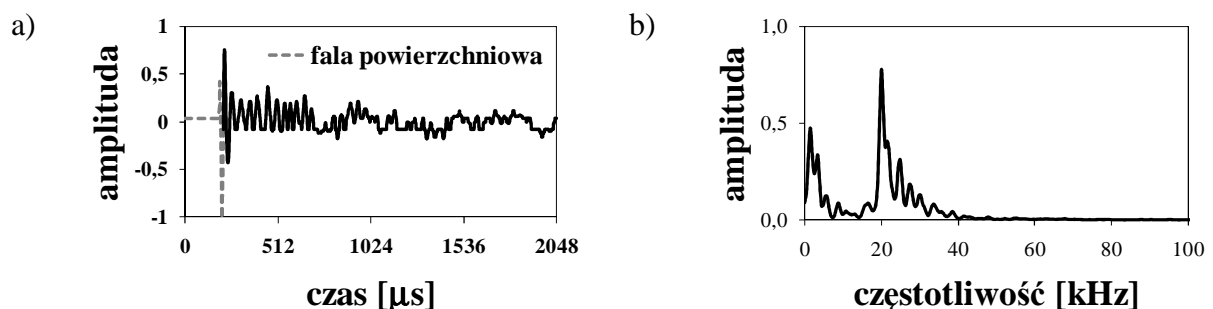
zaobserwowano charakterystyczny pik od dna ok. 17 kHz. W widmie dla płyty o nieskończonych wymiarach można ponadto wyodrębnić pik w okolicy 34 kHz, odpowiadający drugiej modzie echa. Uzyskane rezultaty potwierdzają przyjęte założenie o reprezentatywności próbek dla elementów płytowych w rzeczywistej konstrukcji.



Rys.39. Widmo częstotliwości otrzymane w wyniku symulacji komputerowych propagacji fali sprężystej w płycie: o wymiarach 80x60x13cm (a) oraz nieograniczonych wymiarach xy i gr.13 cm (b)

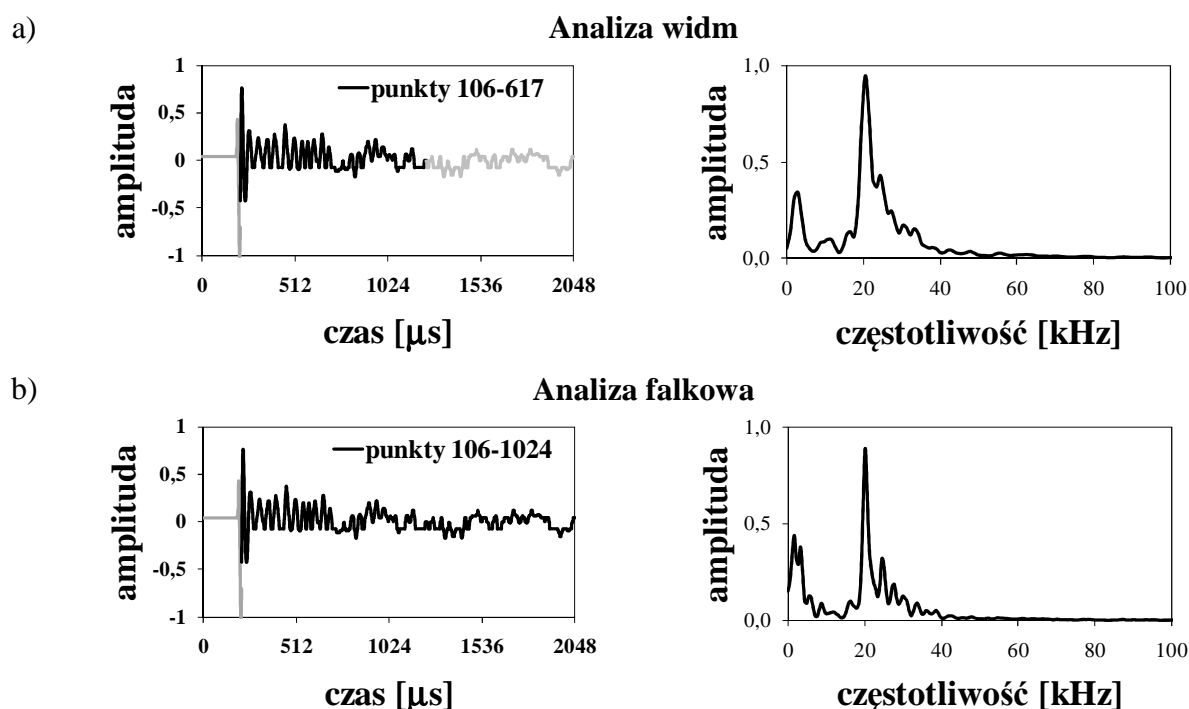
Z powodu widocznego efektu krawędziowego w dalszej analizie wykorzystywano wyniki z punktu w środku płyty jako najbardziej reprezentatywne dla ośrodka o nieograniczonych wymiarach x,y . W przypadku próbek *Grupy A* pomiar powtórzono w tym punkcie 10 razy, a w przypadku próbek *Grupy B* – 7 razy.

Jak wspomniano w rozdziale 3.1 w większości przypadków przed analizą z sygnału wskazane jest usunięcie wpływu fali powierzchniowej. Potwierdzają to obserwacje widm częstotliwości, w których po odcięciu fali powierzchniowej następuje wyostrenie charakterystycznych pików (por. Rys.8c). Jedną z metod jest tzw. „zerowanie”, czyli zastąpienie wartości amplitudy do momentu wystąpienia punktu zerowego następującego po osiągnięciu jej minimum przez wartość równą zero (Rys.39).



Rys.40. Sygnał *impact-echo* (a) i widmo częstotliwości (b) po usunięciu wpływu fali powierzchniowej przez tzw. „zerowanie”

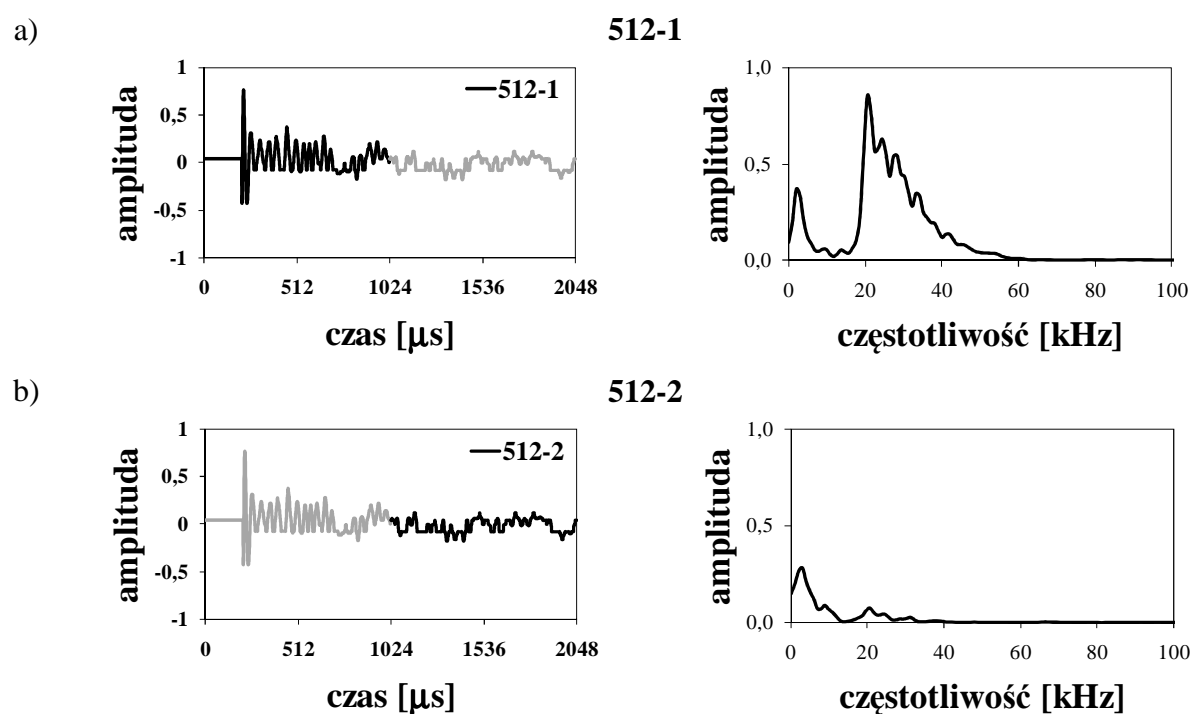
W przypadku badań wstępnych przeprowadzonych na próbkach *Grupy A* zastosowano inny sposób wyeliminowania wpływu fali powierzchniowej - odcięcie fali powierzchniowej. Analizie widm poddawano 512 punktów licząc od 106, gdyż przecięcie osi x w sygnale, następujące po osiągnięciu przez amplitudę minimum oznaczającego dojście fali powierzchniowej, występowało zawsze między punktami 104-106. Ten sposób postępowania odpowiada algorytmom stosowanym w dostępnej na rynku aparaturze *impact-echo*. Transformatę falkową w badaniach wstępnych zastosowano analizując sygnały złożone z 919 punktów pozostałych po odcięciu fali powierzchniowej, czyli pierwszych 105 punktów.



Rys.41. Sygnał *impact-echo* i widmo częstotliwości analizowane w badaniach wstępnych: analiza widm (a) i analiza falkowa (b) po usunięciu wpływu fali powierzchniowej przez odcięcie

Analiza sygnału *impact-echo* wskazuje, że można w nim wyodrębnić dwie części: pierwszą (512-1), w której obserwuje się dużą zmienność amplitudy i dużą częstotliwość tych zmian i drugą (512-2), o mniejszej zmienności amplitudy oraz mniejszej częstotliwości zmian (Rys.42). Wobec spodziewanej lokalizacji informacji o powierzchni rozdziału w zakresie wyższych częstotliwości można założyć, że analizę sygnału można ograniczyć do pierwszej części. Powyższe wnioski potwierdziła analiza przeprowadzona dla całego sygnału i jego części oraz analiza falkowa typu *DWT*. W pierwszym przypadku wyraźnie widać, że to w pierwszej części sygnału (512-1) swój udział ma fala o częstotliwości odpowiadającej grubości badanego elementu. Można się też spodziewać, że jeżeli będzie występowała

jakakolwiek informacja o powierzchni rozdziału (częstotliwość ok. 60-70 kHz), to będzie ona również zawarta głównie w pierwszej części sygnału. Również dekompozycja *DWT* wskazuje na „zagęszczenie” w wysokoczęstotliwościowych detalach niższych rzędów $D1 \div D3$ w pierwszej części sygnału (por. Rys.8b). Uwzględniając te obserwacje, szczegółowej analizie poddawano sygnał 512-1 po usunięciu wpływu fali powierzchniowej przez tzw. „zerowanie”.



Rys.42. Podział sygnału *impact-echo* na dwie części po usunięciu wpływu fali powierzchniowej przez tzw. „zerowanie” i odpowiadające im widma częstotliwości

4.6. Statystyczna analiza wyników badań

Wnioskowanie statystyczne będące przedmiotem statystyki matematycznej zajmuje się metodami wnioskowania o całość zbiorowości statystycznej na podstawie zbadania pewnej jej części zwanej próbą. W zależności od potrzeb praktycznych wyróżniamy estymację, czyli szacowanie parametrów rozkładu badanej cechy w populacji generalnej oraz weryfikację hipotez statystycznych dotyczących rozkładu badanej cechy w zbiorowości generalnej. Rozkład badanej cechy w populacji charakteryzują parametry, do których zaliczamy miary: położenia (np. średnia arytmetyczna, mediana), rozproszenia (np. odchylenie standardowe, wariancja), asymetrii (np. współczynnik skośności). Najczęściej używaną statystyką opisową jest wartość średnia, m , która jest miarą tendencji centralnej rozpatrywanej zmiennej. Estymatorem punktowym tej wartości jest uzyskana metodą największej wiarygodności średnia arytmetyczna, \bar{x} . W wielu zagadnieniach stosuje się

natomiast estymację przedziałową, czyli szacowanie wartości średniej w postaci przedziału ufności, czyli zakresu wartości wokół średniej, który z danym prawdopodobieństwem zawiera prawdziwą wartość średnią. Wielkość przedziału ufności zależy od wielkości próbki (ilości wyników, n) oraz od zmienności badanej cechy (odchylenia standardowego, σ). Przy obliczaniu przedziałów ufności opiera się na założeniu, że rozkład zmiennej jest normalny. W przypadku gdy znane jest odchylenie standardowe w populacji, σ , w obliczeniach uwzględnia się u_α . Jest to wartość zmiennej losowej U mającej rozkład normalny standaryzowany i wyznacza się ją z tablic dystrybuanty rozkładu normalnego $N(0,1)$. Gdy natomiast mamy do czynienia z małą liczebnością próby i nie znamy odchylenia standardowego populacji, σ , to w obliczeniach stosujemy rozkład t-Studenta i wartość zmiennej t_α dla $\nu = n-1$ stopni swobody.

Tab.17. Podstawowe charakterystyki statystyczne

Nazwa	Wzór	
Średnia arytmetyczna	$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$	(30)
Odchylenie standardowe, SD	$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$ lub $\hat{s} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$	(31)
Wariancja	$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$ lub $\hat{s}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$	(32)
Przedział ufności średniej (rozkład normalny)	$\bar{x} - u_\alpha \frac{\sigma}{\sqrt{n}} < m < \bar{x} + u_\alpha \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$	(33)
Przedział ufności średniej (rozkład t-Studenta)	$\bar{x} - t_\alpha \frac{s}{\sqrt{n-1}} < m < \bar{x} + t_\alpha \frac{s}{\sqrt{n-1}}$ lub $\bar{x} - t_\alpha \frac{\hat{s}}{\sqrt{n}} < m < \bar{x} + t_\alpha \frac{\hat{s}}{\sqrt{n}}$	(34)

Ważnym punktem ustalania programu badań jest określenie niezbędnej liczebności właściwej próby do zagwarantowania odpowiedniego poziomu dokładności oszacowania danego parametru (najczęściej średniej). Gdy rozkład jest normalny, nieznana jest wariancja z populacji, σ^2 , ale można określić wartość wariancji z wstępnej małej próby, \hat{s}^2 to liczebność próby przy dopuszczalnym maksymalnym błędzie szacunku, d , można określić ze wzoru:

$$n = \frac{t_\alpha^2 \hat{s}^2}{d^2} \quad (35)$$

gdzie: t_α - współczynnik rozkładu t-Studenta dla poziomu istotności α

W analizie sygnałów *impact-echo*, przeprowadzonej w niniejszej pracy, dopuszczalny maksymalny błąd szacunku, d , przyjęto jako mniejszy lub równy odchyleniu standardowemu z wstępnej małej próby, \hat{s} . Minimalną ilość próbek, n , wyznaczoną z równania (35) przy przyjętej wartości maksymalnego błędu szacunku, $d = \hat{s}$ i poziomowi ufności $(1-\alpha)$ zestawiono w tablicy (Tab.18).

Tab.18. Podstawowe charakterystyki statystyczne przy założeniu $d = \hat{s}$

nazwa	symbol	liczba próbek we wstępnej małej próbie, n							
		3	4	5	6	7	8	9	10
stopnie swobody	$\nu = n - 1$	2	3	4	5	6	7	8	9
poziom istotności	α	0,225	0,140	0,089	0,058	0,038	0,025	0,017	0,012
współczynnik ufności	$1 - \alpha$	0,875	0,860	0,911	0,942	0,962	0,975	0,983	0,988
kwantyl rozkładu t-Studenta dla ν i α	t_α	1,73	2,00	2,24	2,45	2,65	2,84	3,00	3,14

W zagadnieniach technicznych najczęściej przyjmowane współczynniki ufności wynoszą $1 - \alpha = 0,90$ lub $0,95$, co oznacza, że ryzyko popełnienia błędu polegającego na odrzuceniu testowanej hipotezy zerowej, a także maksymalny błąd szacunku, d , wynosi odpowiednio 10 i 5%. Z tablicy 18 wynika, że przyjęta w badaniach *impact-echo* liczba rejestrowanych sygnałów dla danego układu naprawczego (*Grupa A* - 10 sygnałów, *Grupa B* - 7 sygnałów) pozwala na dalsze wnioskowanie statystyczne.

Zależność między zmiennymi może być opisana za pomocą korelacji i regresji. Korelacja opisuje siłę zależności, a regresja jej kształt. Po ustaleniu, że między zmiennymi występuje korelacja przystępuje się do znalezienia funkcji regresji, która pozwala na przewidywanie wartości jednej cechy na podstawie wartości drugiej.

Aby ocenić korelacje między dwoma zmiennymi należy znać proporcję (siłę) wspólnej zmienności tych zmiennych oraz istotność tej proporcji. Pierwszą z nich określa współczynnik determinacji, r^2 , będący kwadratem współczynnika korelacji, r . Współczynnik korelacji jest unormowaną miarą korelacji i przyjmuje wartości $-1 \leq r \leq 1$. Im wartość $|r|$ jest bliższa jedynki tym korelacja jest mocniejsza. Współczynnik determinacji określa jaka część zmienności zmiennej zależnej jest wytłumaczona przez korelację. Funkcje regresji wyznaczono metodą najmniejszych kwadratów dla zaobserwowanych w próbie badanych zmiennych. Metoda ta polega na oszacowaniu parametrów B i B_0 aby dla danych z próby, n wartości (x_i, y_i) uzyskać najmniejszą wartość funkcji S opisana wzorem:

$$S = \sum_{i=1}^n (y_i - Bx_i - B_0)^2, \quad (36)$$

Istotność otrzymanej korelacji zależy przede wszystkim od wielkości próbki. Określa ją poziom istotności p który można utożsamiać ze zdefiniowanym wcześniej maksymalnym błędem szacunku, ponieważ opisuje prawdopodobieństwo błędu polegającego na odrzuceniu hipotezy zerowej, że zależność którą badamy nie występuje w całej populacji. W analizie statystycznej wyników w niniejszej pracy przyjęto wartość tego prawdopodobieństwa 5%, czyli poziom istotności równy 0,05.

Rozwinięciem opisanej wyżej regresji liniowej między dwoma zmiennymi na opis zależności między zmienna zależną a grupą zmiennych niezależnych jest regresja wieloraka, której ogólne równanie ma postać:

$$Y = B_0 + B_1 \cdot x_1 + B_2 \cdot x_2 + \dots + B_n \cdot x_n, \quad (37)$$

gdzie Y – zmienna zależna, B_0 – wyraz wolny, B_1, B_2, \dots, B_n – współczynniki regresji, x_1, x_2, \dots, x_n – zmienne niezależne.

Jako wskaźnik jakości dopasowania modelu regresji wielorakiej do danych przyjęto współczynnik korelacji wielorakiej, R , zdefiniowany jako pierwiastek kwadratowy ze współczynnika determinacji, R^2 . Porównanie relatywnych wkładów jakie każda ze zmiennych niezależnych wnosi do w predykcję zmiennej zależnej opisywanej jest za pomocą standaryzowanych współczynników regresji, β . Są one takimi współczynnikami regresji, jakie otrzymalibyśmy, gdyby przed wykonaniem obliczeń dokonali standaryzacji wszystkich zmiennych do wartości średniej równej 0 i odchylenia standardowego równego 1. W analizie regresji wielorakiej podobnie jak w regresji liniowej przyjęto poziom istotności $\alpha = 0,05$.

Prezentacją graficzną regresji wielorakiej w przestrzeni 3D może być wykres wartości użyteczności odpowiedzi, U (zmiennej zależnej), od wartości zmiennych objaśniających (x, y). W przypadku większej niż 2 liczby zmiennych niezależnych wynikiem jest zestaw wykresów, gdzie (x, y) przyjmowane są jako kolejne pary zmiennych objaśniających. Aby utworzyć taki(-e) wykres(-y) należy zdefiniować użyteczność wielkości wyjściowej (w analizowanym przypadku przyczepności, f_h) przez określenie poziomu wysokiego ($u = 1,0$), pośredniego ($u = 0,5$) i niskiego ($u = 0,0$). Uwzględniając wymagania PN-EN 1504-3 (por. rozdział 2.4) przypisano następujące wartości przyczepności, f_h dla kolejnych poziomów użyteczności:

- wysoka $U(f_h) = 1,0$ dla $f_h \geq 2,5$ MPa,
- pośrednia $U(f_h) = 0,5$ dla $f_h = 1,5$ MPa,
- niska $U(f_h) = 0,0$ dla $f_h \leq 0,5$ MPa.

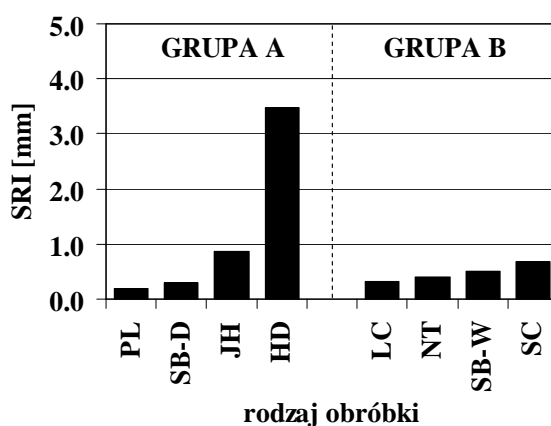
W rozważanym przypadku tak zdefiniowaną użyteczność można rozumieć jako dyskretną miarę jakości zespolenia układu naprawczego. Aproksymowane wartości wielkości wyjściowych zmiennej zależnej dla poszczególnych kombinacji wartości wejściowych zmiennych niezależnych przelicza się na skalę użyteczności. Następnie dla różnych kombinacji wartości wielkości wejściowych (zmiennych niezależnych) oblicza się całkowitą użyteczność, U , jako średnią geometryczną użyteczności poszczególnych wielkości wyjściowych, u . Średnia geometryczna, czyli pierwiastek n -tego stopnia z iloczynu wszystkich n wartości sprawia, że jeśli którakolwiek użyteczność, u , ma wartość 0, czyli jest nie do zaakceptowania, to całkowita użyteczność, U , też będzie miała wartość 0, niezależnie od tego, jakie wartości mają pozostałe użyteczności składowe, u .

Analizy statystyczne wyników badań eksperymentalnych przeprowadzono przy użyciu komputerowego systemu analizy danych Statistica [112].

5. WYNIKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

5.1. Chropowatość podłoża betonowego

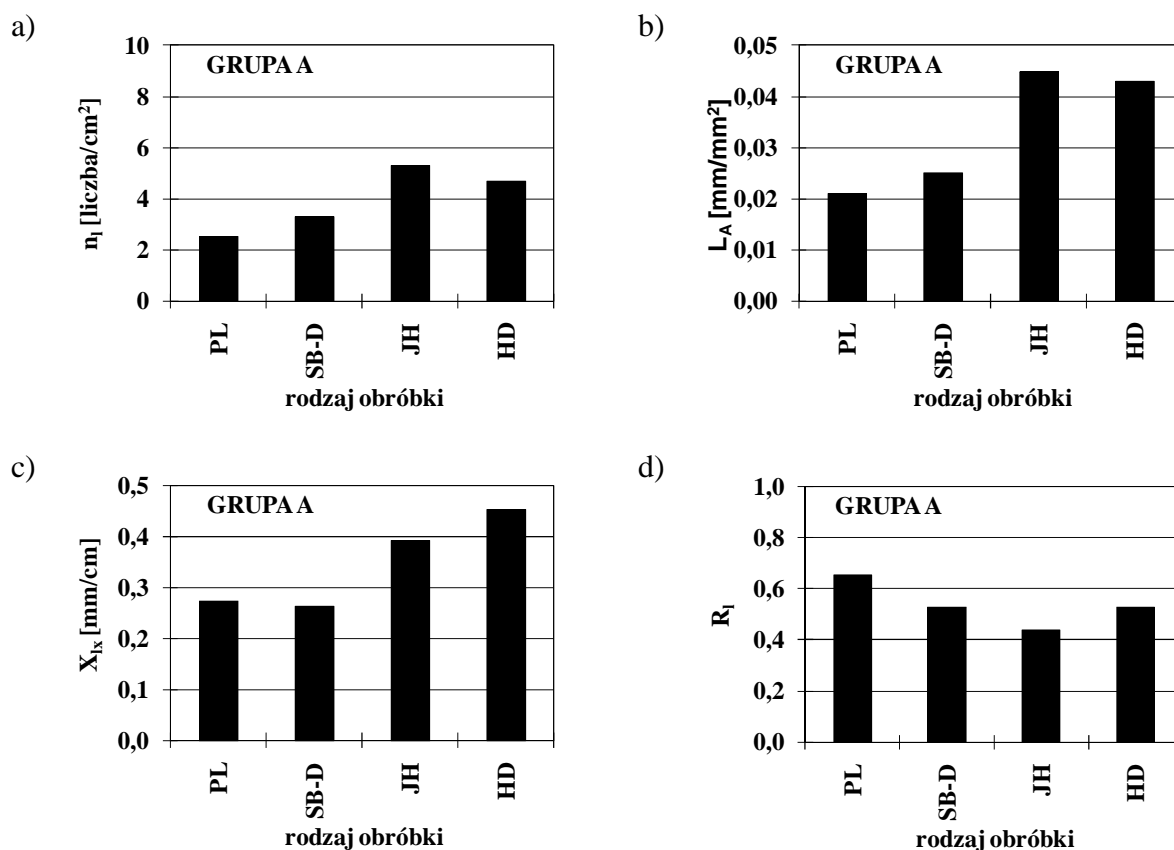
Zróżnicowanie chropowatości próbek *Grupy A* wskazuje, że najbardziej agresywna w stosunku do podłoża betonowego jest obróbka typu groszkowanie, *JH* i obróbka hydrodynamiczna z wysokim ciśnieniem, *HD*. Wskaźnik *SRI* był najmniejszy w przypadku polerowania, *PL* (0,2mm). Wartość ta wynika z obecności pustek i kawern w podłożu. Największą chropowatość odznaczała się powierzchnia po obróbce hydrodynamicznej, *HD*. W mniejszym stopniu była zróżnicowana chropowatość powierzchni podłoża betonowych *Grupy B* (Rys.43). Jest to zgodne z założeniami programu badań eksperymentalnych.



Rys.43. Wartości *SRI* w zależności od rodzaju obróbki powierzchniowej

5.2. Stopień mikrozarzysowania w warstwie przypowierzchniowej podłoża betonowego

Stopień zarzysowania określono w przypadku *Grupy A*, gdzie podkłady betonowe poddano obróbkom o silnie zróżnicowanej agresywności. Na podstawie przeprowadzonych obserwacji stopnia mikrozarzysowania (szczegółowe wyniki zawiera Załącznik II) można sformułować wniosek, iż zastosowanie agresywnej obróbki powierzchniowej, typu groszkowanie, *JH* czy obróbka hydrodynamiczna, *HD*, obok znacznego zwiększenia chropowatości podłoża betonowego, powoduje także wzrost stopnia mikrozarzysowania w warstwie przypowierzchniowej. Świadczy o tym wzrost wartości wszystkich parametrów rozkładu rys w warstwie przypowierzchniowej po tych obróbkach (Rys.44). Zaobserwowano, że obróbki zastosowane w niniejszej pracy miały niewielki wpływ na orientację rys ($0,45 \leq R_l \leq 0,65$). Jednakże stwierdzono, że w przypadku polerowania, *PL* rysy zorientowane są bardziej równoległe do powierzchni, a w przypadku obróbki typu groszkowanie, *JH* bardziej prostopadle.



Rys.44. Parametry rozkładu rys w zależności od rodzaju zastosowanej obróbki powierzchniowej: n_1 (a), L_A (b), X_{ik} (c), R_i (d); objaśnienia symboli w rozdziale 4.3

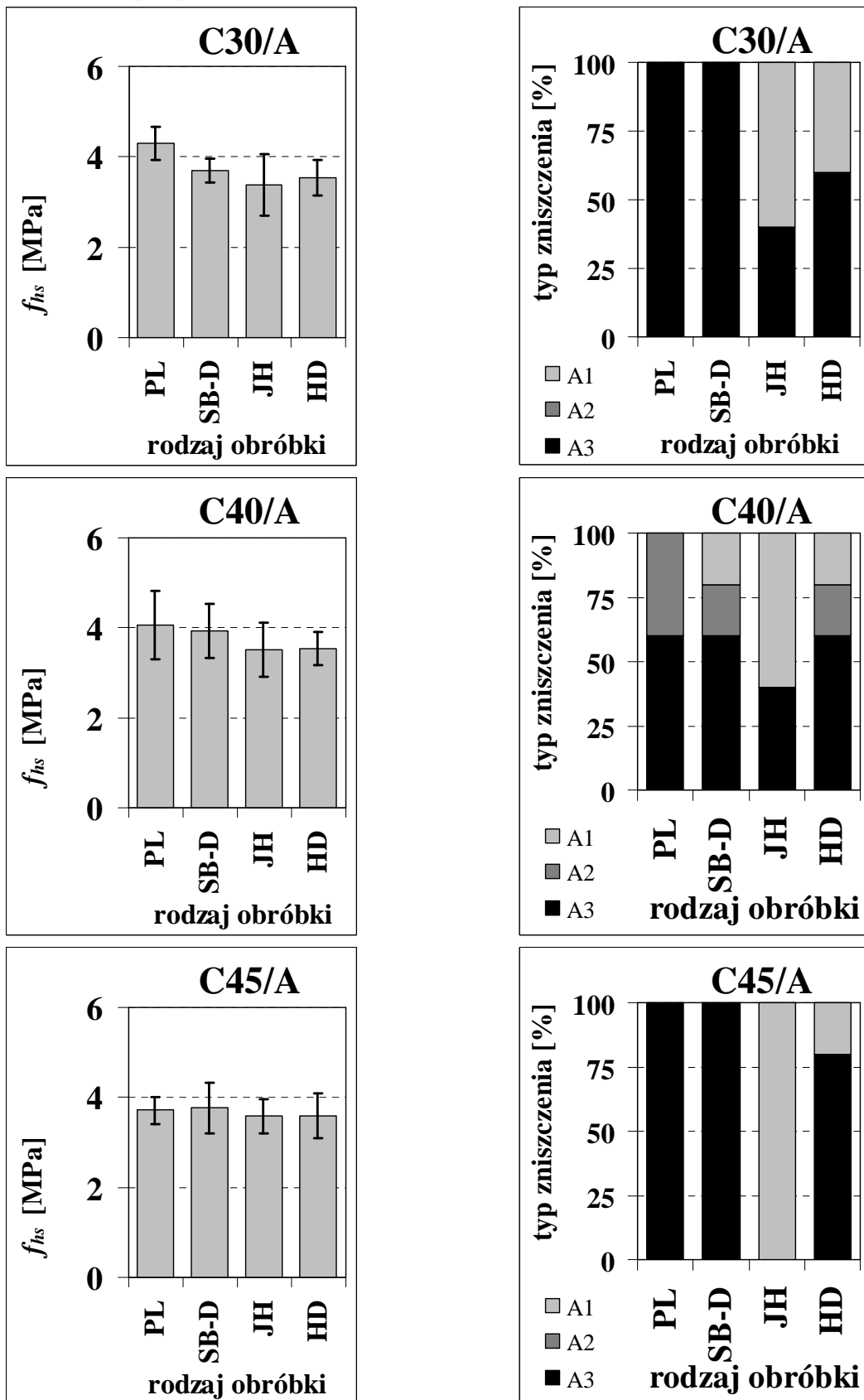
5.3. Wytrzymałość na rozciąganie w warstwie przypowierzchniowej podłoża betonowego

Jakość podłoża betonowego po obróbce powierzchniowej dla obu grup podkładów oznaczono zgodnie z wytycznymi PN-EN 1504-10 określając wytrzymałość betonu na rozciąganie w warstwie przypowierzchniowej, f_{hs} , tzw. metodą *pull-off* wg PN-EN 1542.

Uzyskane wyniki badań (Załącznik III) potwierdzają, że obróbki agresywne, typu frezowanie *SC*, groszkowanie *JH*, powodują obniżenie wytrzymałości warstwy przypowierzchniowej podkładu betonowego na rozciąganie i wzrost udziału zniszczeń przypowierzchniowych (Rys.45-44). Wpływ ten jest mniejszy im wyższa klasa wytrzymałości betonu na ściskanie.

Wartość wytrzymałości na rozciąganie
w warstwie przypowierzchniowej

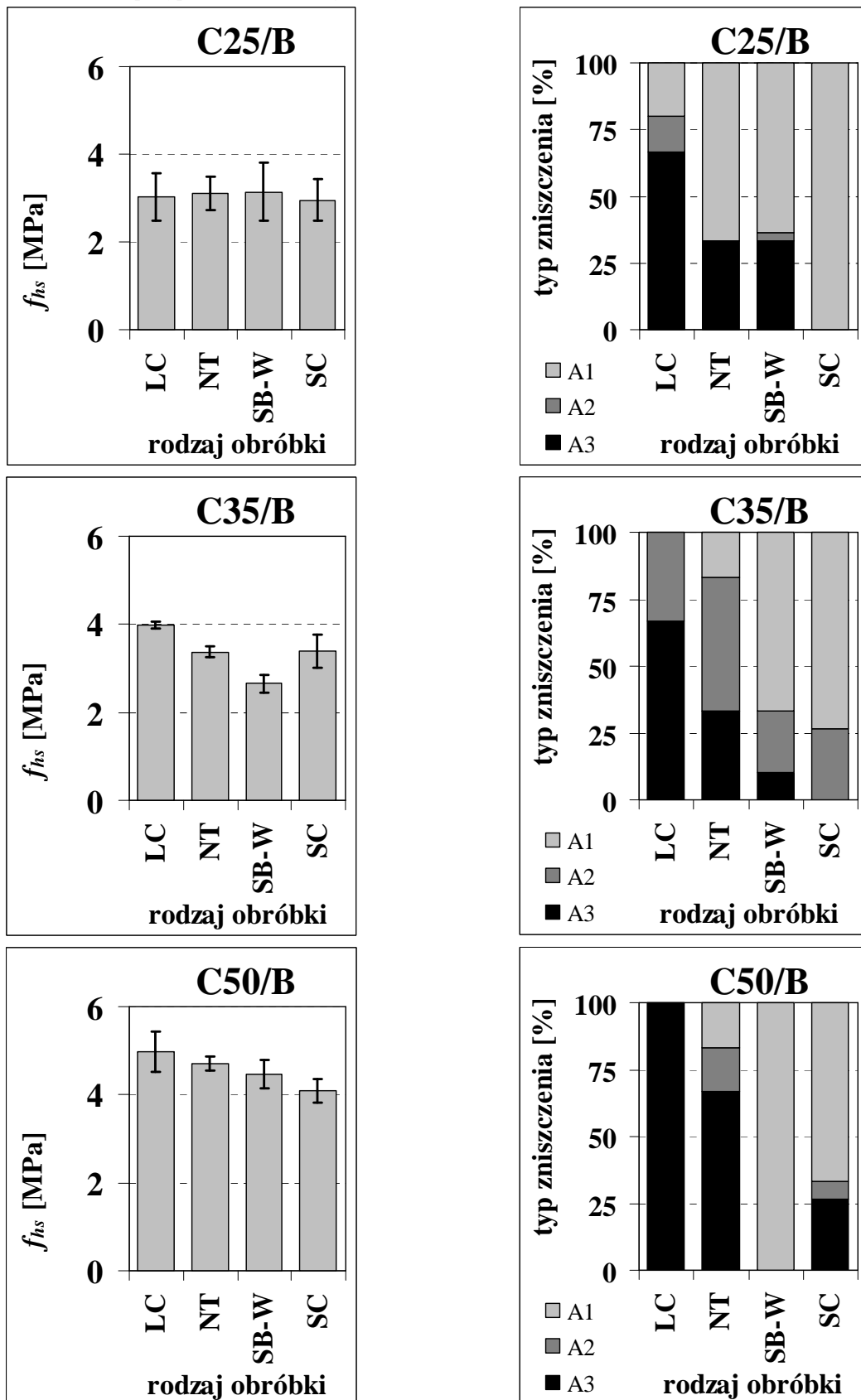
Typ zniszczenia



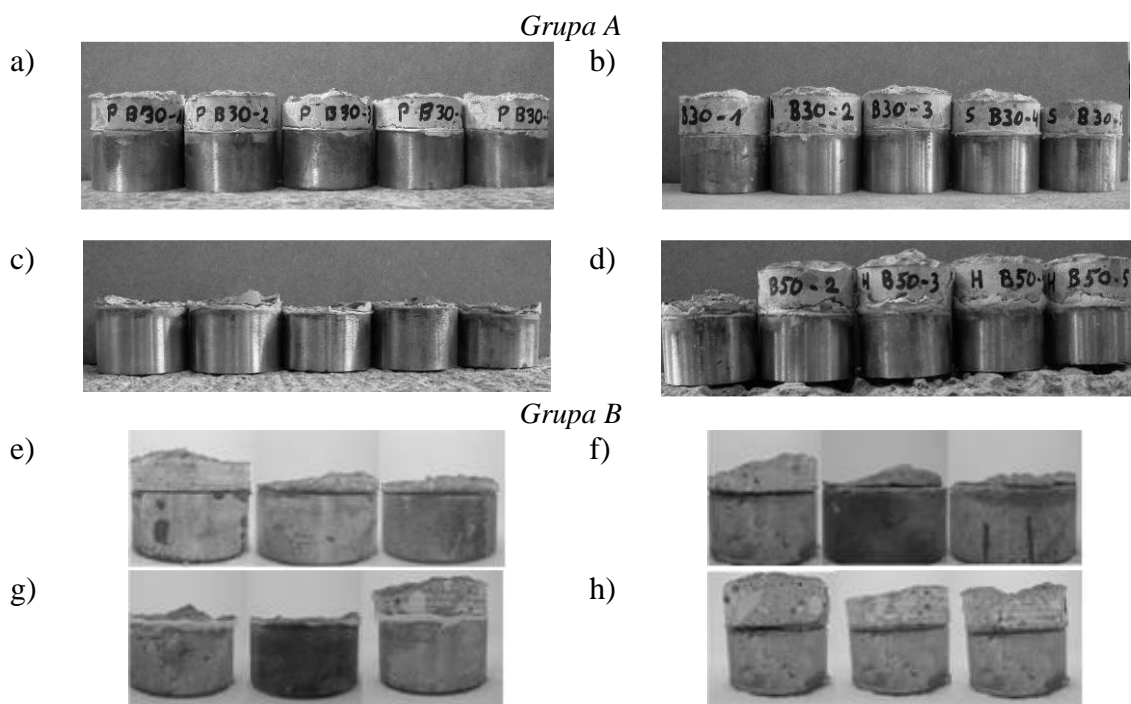
Rys.45. Wytrzymałość na rozciąganie w warstwie przypowierzchniowej podłoża betonowego i typ zniszczenia – Grupa A; A1,A2,A3 jak na Rys.35

Wartość wytrzymałości na rozciąganie
w warstwie przypowierzchniowej

Typ zniszczenia



Rys.46. Wytrzymałość na rozciąganie w warstwie przypowierzchniowej podłoża betonowego i typ zniszczenia – Grupa B; A1,A2,A3 jak na Rys.35

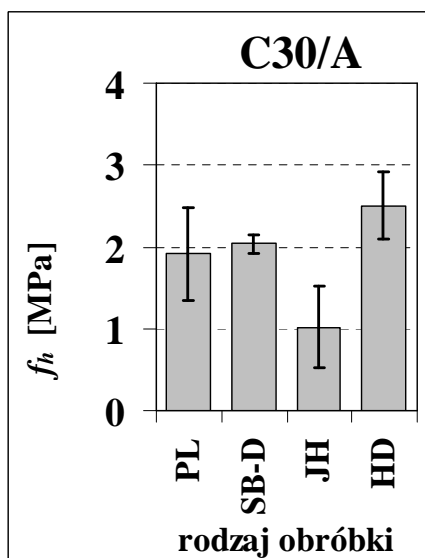


Rys.47. Przykłady typów zniszczeń w badaniu wytrzymałości na rozciąganie w warstwie przypowierzchniowej metodą *pull-off* dla podłoży betonowych Grupy A: C30-PL(a), C30-SB-D (b), C50-JH(c), C50-HD(d), i Grupy B C35-NT (e), C35-SB-W (f), C35-SC (g), C35-LC (h)

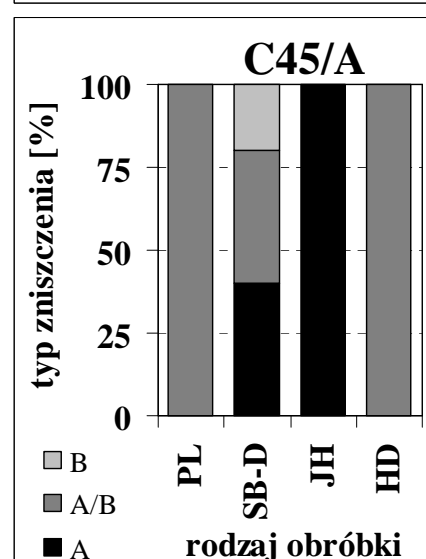
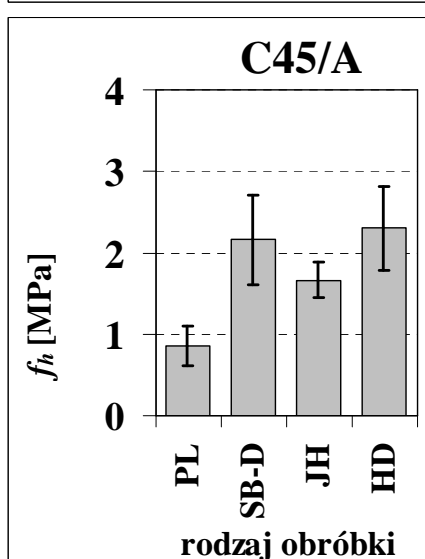
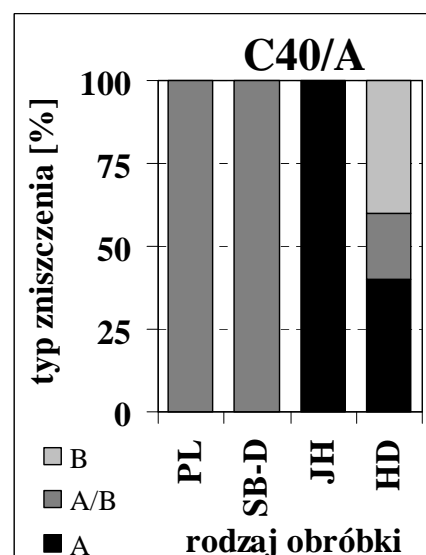
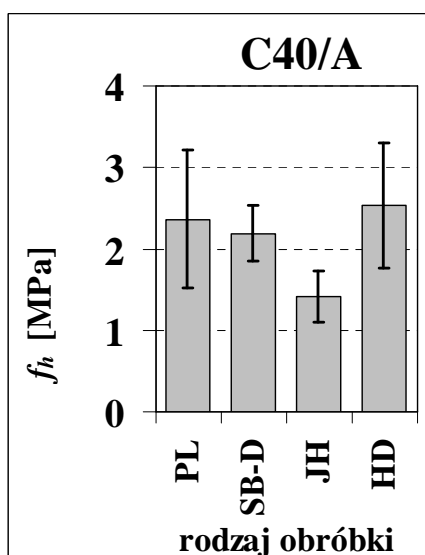
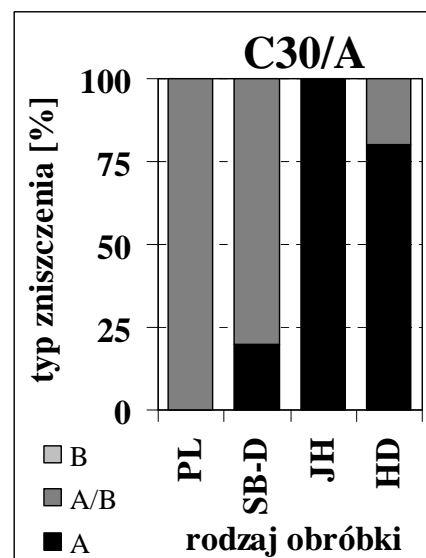
5.4. Przyczepność materiału naprawczego do podłoża betonowego

Określenie przyczepności warstwy naprawczej do podłoża betonowego (szczegółowe wyniki zawiera Załącznik IV) tzw. metodą *pull-off*, przeprowadzono po 28 dniach od naprawy (Rys.48-48). Uzyskane wyniki potwierdzają konieczność stosowania odpowiedniej obróbki powierzchniowej przed przystąpieniem do układania warstwy naprawczej. Na przykład, zastosowanie jedynie czyszczenia szczotką drucianą, NT, nie zapewniło uzyskania właściwej przyczepności. Analizując wpływ rodzaju obróbki na wartość przyczepności należy zauważyć, że w przypadku podkładów betonowych niższych klas wytrzymałości lepsze efekty daje obróbka mniej agresywna typu czyszczenie strumieniem wody o niskim ciśnieniu, LC, czy piaskowanie, SB-W, niż obróbka agresywna jak na przykład frezowanie, SC, które powoduje obniżenie wartości przyczepności, prawdopodobnie jako skutek wygenerowania rys w strefie przypowierzchniowej [50]. Potwierdza to również obserwowany podczas badania *pull-off* typ zniszczenia w strefie przypowierzchniowej podkładu. Ze wzrostem klasy wytrzymałości podkładu betonowego mikrozarysowanie ma mniejszy wpływ, a decydującym o jakości zespolenia parametrem jest chropowatość podkładu i wynikająca z niej adhezja mechaniczna. Ta zależność jest szczególnie widoczna w przypadku próbek C50/B, gdzie dopiero zastosowanie agresywnych obróbek pozwoliło na uzyskanie przyczepności (Rys.49).

Wartość przyczepności

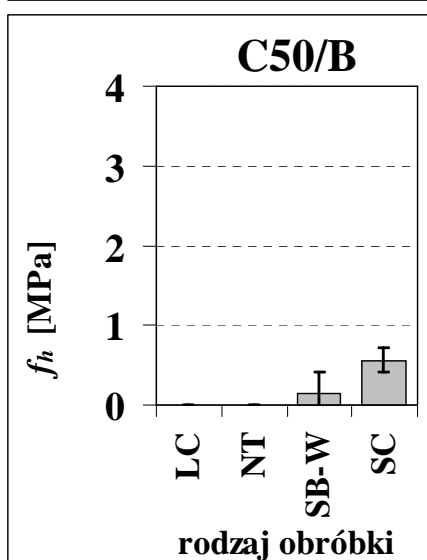
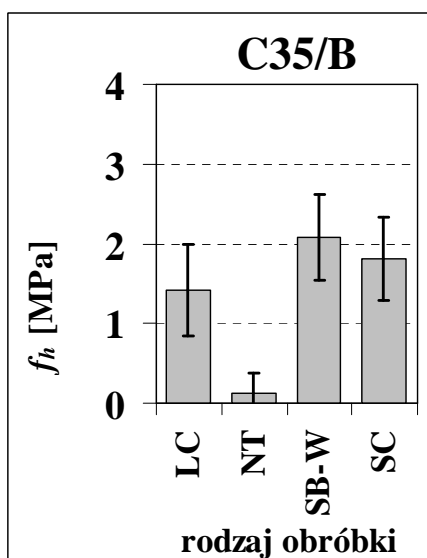
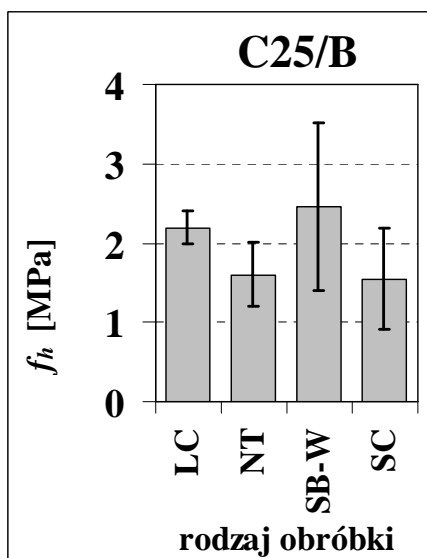


Typ zniszczenia

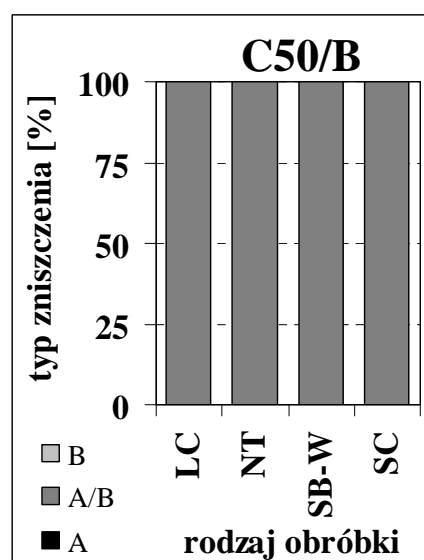
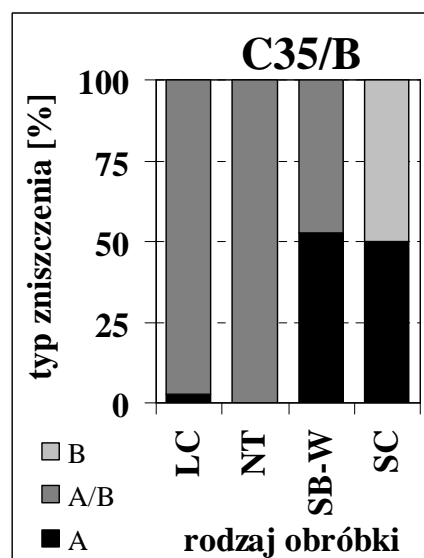
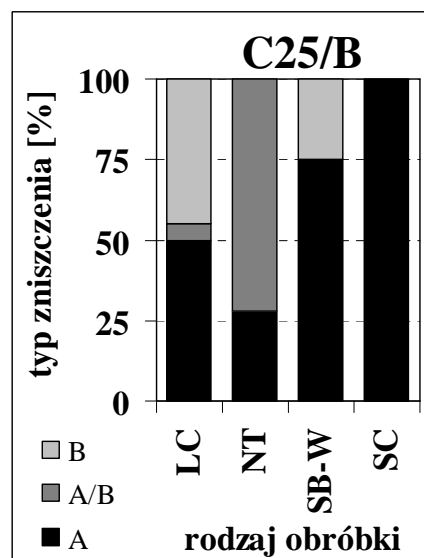


Rys.48. Przyczepność f_h i typ zniszczenia – Grupa A

Wartość przyczepności



Typ zniszczenia



Rys.49. Przyczepność f_h i typ zniszczenia – Grupa B

5.5. Wpływ jakości podłoża betonowego na przyczepność warstwy naprawczej

Analizę zależności między przyczepnością warstwy naprawczej do podłoża betonowego f_h , a charakterystyką jakości podłoża betonowego przeprowadzono metodą regresji wielorakiej.

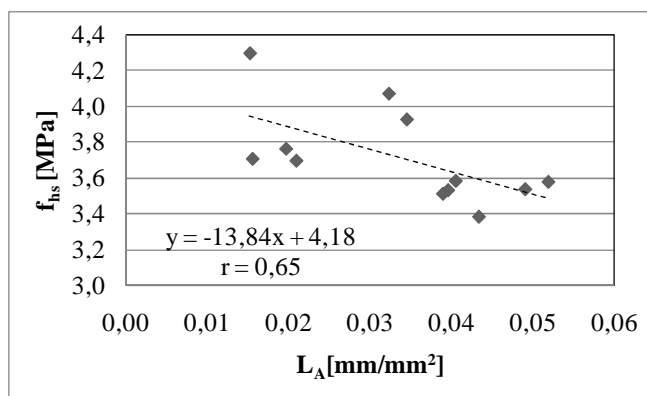
Na podstawie wcześniejszych rozważań (rozdz. 2.2) do analizy regresji wielorakiej w przypadku próbek *Grupy A* przyjęto jako zmienne objaśniające następujące parametry:

- wytrzymałość na ściskanie betonu podłoża, f_{ck} ,
- wskaźnik chropowatości, SRI ,
- gęstość rys w warstwie przypowierzchniowej, L_A ,
- wytrzymałość na rozciąganie w warstwie przypowierzchniowej podłoża betonowego, f_{hs} .

Współczynnik korelacji regresji wielorakiej wynosi $R = 0,71$ przy błędzie standardowym estymacji, $BSE = 0,50$ MPa (Tab.19). Spośród rozważanych zmiennych objaśniających największy udział w predykcji wartości f_h mają SRI oraz f_{hs} (największe współczynniki β i najmniejsza wartość prawdopodobieństwa p). Najmniejszy współczynnik β uzyskano dla wytrzymałości na ściskanie, f_{ck} . Wbrew oczekiwaniom małą istotność ($\beta = 0,118$) ma również gęstość rys, L_A . Udział poszczególnych parametrów jakości podkładu betonowego nie odpowiada kategoriom ważności zaproponowanym przez Sifwerbrand [101,102] dla czynników kształtujących jakość zespolenia w układzie naprawczym. Uzyskane wyniki wskazują, że parametrem, który bardziej kompleksowo charakteryzuje jakość podłoża betonowego niż stopień mikrozarzysowania jest wytrzymałość na rozciąganie w warstwie przypowierzchniowej, f_{hs} . Wartość tego parametru zależy jednak od stopnia mikrozarzysowania, o czym świadczy spadek wartości f_{hs} ze wzrostem L_A przy stosunkowo dużym współczynniku korelacji, $r = 0,65$ (Rys.50).

Tab.19. Wpływ charakterystyki podłoża betonowego na przyczepność warstwy naprawczej - wyniki regresji wielorakiej *Grupa A* dla zmiennych objaśniających: SRI , f_{hs} , L_A i f_{ck}

$n = 12$	Grupa A; zmienna zależna: f_h $R = 0,71$; $R^2 = 0,50$, $p < 0,25$; $BSE: 0,50$				
	β	$SD \beta$	B	$SD B$	p
SRI	0,688	0,337	0,255	0,125	0,081
f_{hs}	0,628	0,352	1,349	0,756	0,117
L_A	0,118	0,390	5,363	17,749	0,771
f_{ck}	-0,077	0,270	-0,007	0,026	0,783
W. wolny			-3,253	3,445	0,376

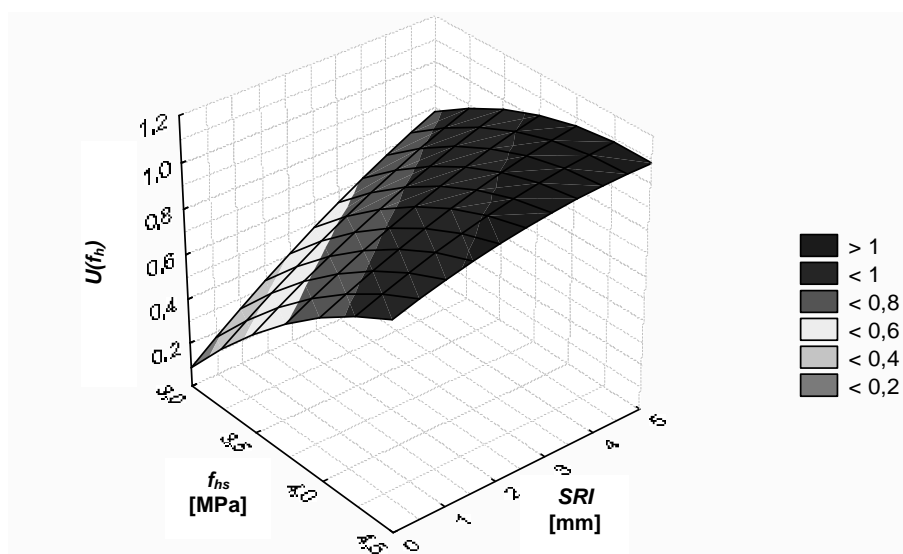


Rys.50. Zależność między f_{hs} a L_A - Grupa A

Po uwzględnieniu w analizie tylko parametrów SRI i f_{hs} jako zmiennych objaśniających współczynnik regresji wielorakiej zmalał w stosunku do poprzedniego jedynie o 0,008 (Tab.20). Wartość prawdopodobieństwa $p < 0,05$ wskazuje na silną zależność przyczepności przy odrywaniu od wskaźnika chropowatości i przypowierzchniowej wytrzymałości na rozciąganie podłoża betonowego. Wykres powierzchni użyteczności potwierdza wpływ tych parametrów na oczekiwaną wartość f_h – ze wzrostem SRI i f_{hs} przyczepność f_h rośnie (Rys.51).

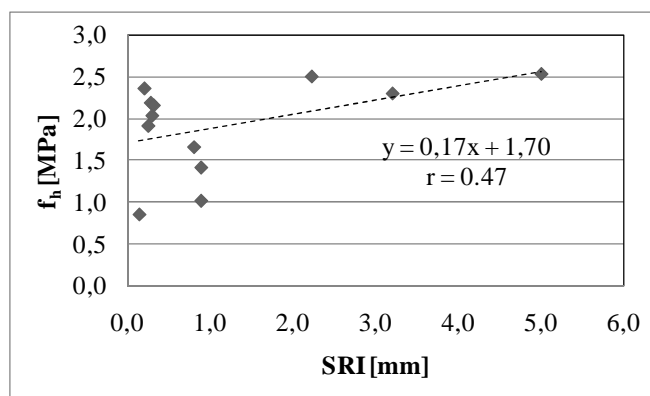
Tab.20. Wpływ charakterystyki podłoża betonowego na przyczepność warstwy naprawczej - wyniki regresji wielorakiej Grupa A dla zmiennych objaśniających: SRI , f_{hs}

Grupa A; zmienna zależna: f_h					
$R = 0,70$; $R^2 = 0,49$					
$p < 0,05$; $BSE: 0,45$					
$n = 12$	β	$SD \beta$	B	$SD B$	ρ
SRI	0,735	0,269	0,272	0,100	0,023
f_{hs}	0,584	0,269	1,253	0,578	0,058
W. wolny			-3,072	2,211	0,198



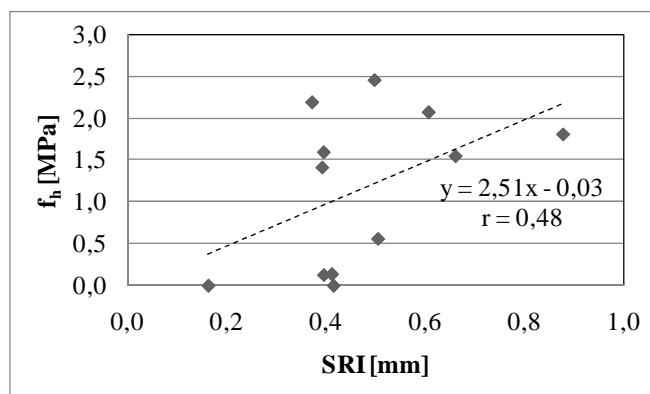
Rys.51. Powierzchnia użyteczności $U(f_h)$ w zależności od wartości f_{hs} i SRI – Grupa A

Zależność między wskaźnikiem chropowatości, SRI i przyczepnością, f_h charakteryzuje się niskim współczynnikiem korelacji, $r = 0,47$ (Rys.52). Trend ten jest przeciwny do obserwowanego przez Garbacza i in. [50] w przypadku betonów niskich klas wytrzymałości na ściskanie, gdzie ze wzrostem chropowatości obserwowano spadek przyczepności. Związany był on ze znacznym wzrostem stopnia mikrozarzysowania w wyniku zastosowania obróbek powierzchniowych o dużej agresywności. Potwierdza to, że chropowatość jest jednym z kilku parametrów wpływających na jakość zespolenia.



Rys.52. Zależność między f_h a SRI – Grupa A

Podobne rezultaty uzyskano w przypadku analizy statystycznej wyników dla próbek *Grupy B*. Współczynnik korelacji SRI i f_h dla próbek *Grupy B* wynosi $r = 0,48$ (Rys.53).



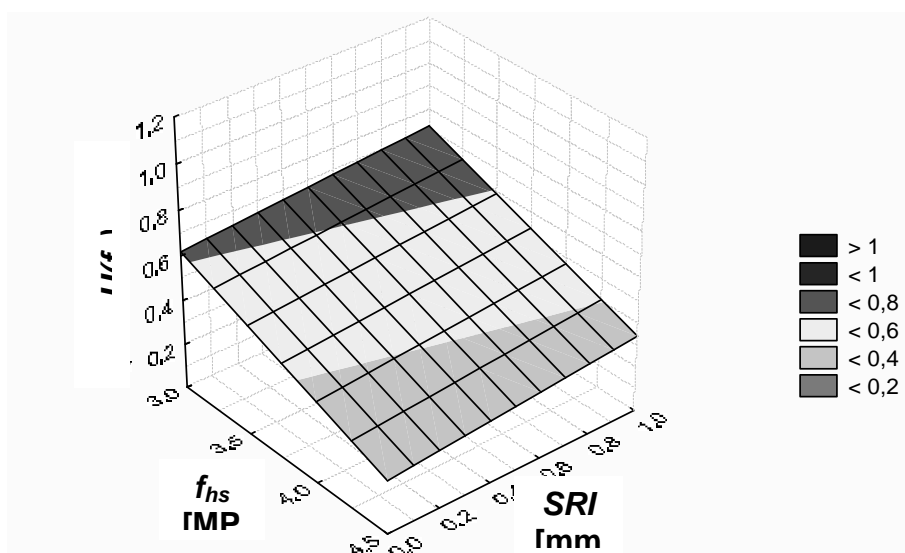
Rys.53. Zależność między f_h a SRI – Grupa B

Po uwzględnieniu w analizie obok SRI również f_{hs} uzyskano dobry współczynnik korelacji wielorakiej, $R = 0,82$ przy błędzie standardowym estymacji, $BSE = 0,60$ MPa (Tab.21). Mniejsza istotność dla SRI ($p = 0,75$) wynika z dużo mniejszego zakresu zmienności tego parametru w przypadku próbek *Grupy B* w stosunku do próbek *Grupy A*. Należy zauważyć, że przy zmiennej SRI dla próbek obu grup znak współczynnika korelacji β jest dodatni. Potwierdza to trend wzrostu przyczepności ze wzrostem stopnia rozwinięcia powierzchni podłoża betonowego.

Tab.21. Wpływ charakterystyki podłoża betonowego na przyczepność warstwy naprawczej - wyniki regresji wielorakiej *Grupa B* dla zmiennych objaśniających: *SRI*, f_{hs}

Grupa B; zmienna zależna: f_h					
$R= 0,82$; $R^2= 0,67$					
$p<0,007$; $BSE: 0,60$					
$n = 12$	β	$SD \beta$	B	$SD B$	p
f_{hs}	-0,775	0,227	-0,945	0,276	0,008
<i>SRI</i>	0,073	0,227	0,382	1,186	0,754
W. wolny			4,434	1,401	0,011

W przypadku próbek *Grupy B* wpływ f_{hs} na przyczepność ma odwrotny trend niż to miało miejsce dla próbek *Grupy A*, tj. przyczepność f_h maleje ze wzrostem f_{hs} (Rys.54). Jest to prawdopodobnie spowodowane niewystarczającym rozwinięciem powierzchni podkładów *Grupy B* w wyniku zastosowania mniej agresywnych obróbek, które okazały się zbyt łagodne dla wyższych klas wytrzymałości betonu podłoża.



Rys.54. Powierzchnia użyteczności $U(f_h)$ w zależności od wartości f_{hs} i *SRI* – *Grupa B*

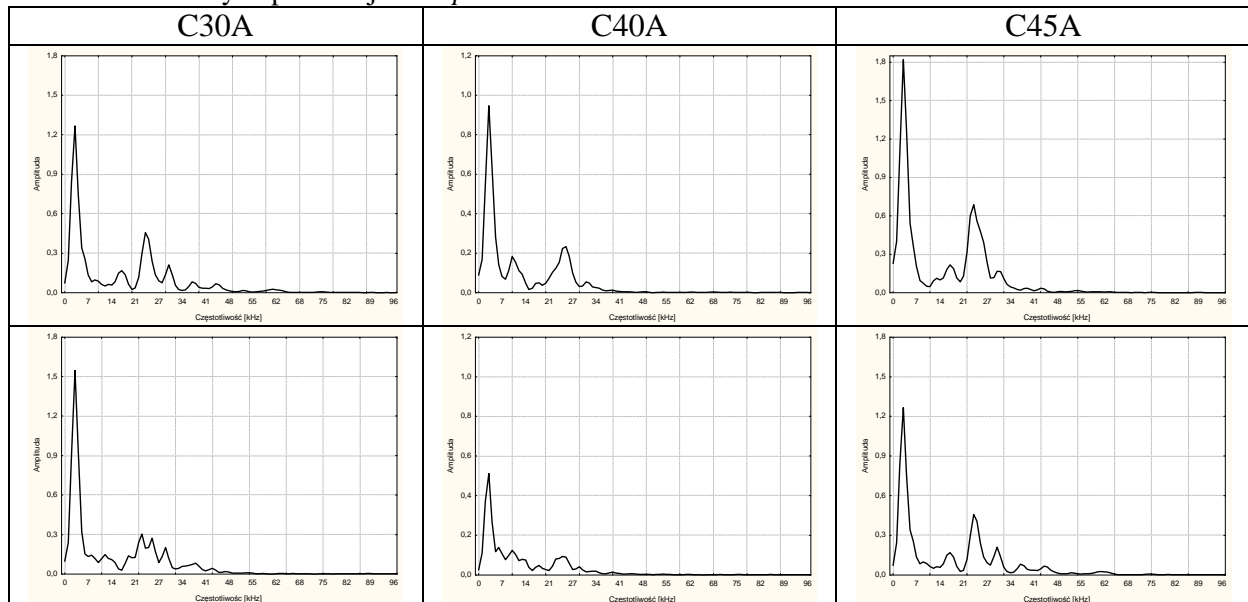
Uzyskane wyniki dla obu grup wskazują, że chropowatość powierzchni, wbrew sugestiom Silfwerbrand [102], jest istotnym parametrem kształtującym przyczepność warstwy naprawczej do podłoża betonowego.

5.6. Wyniki badań metodą *impact-echo*

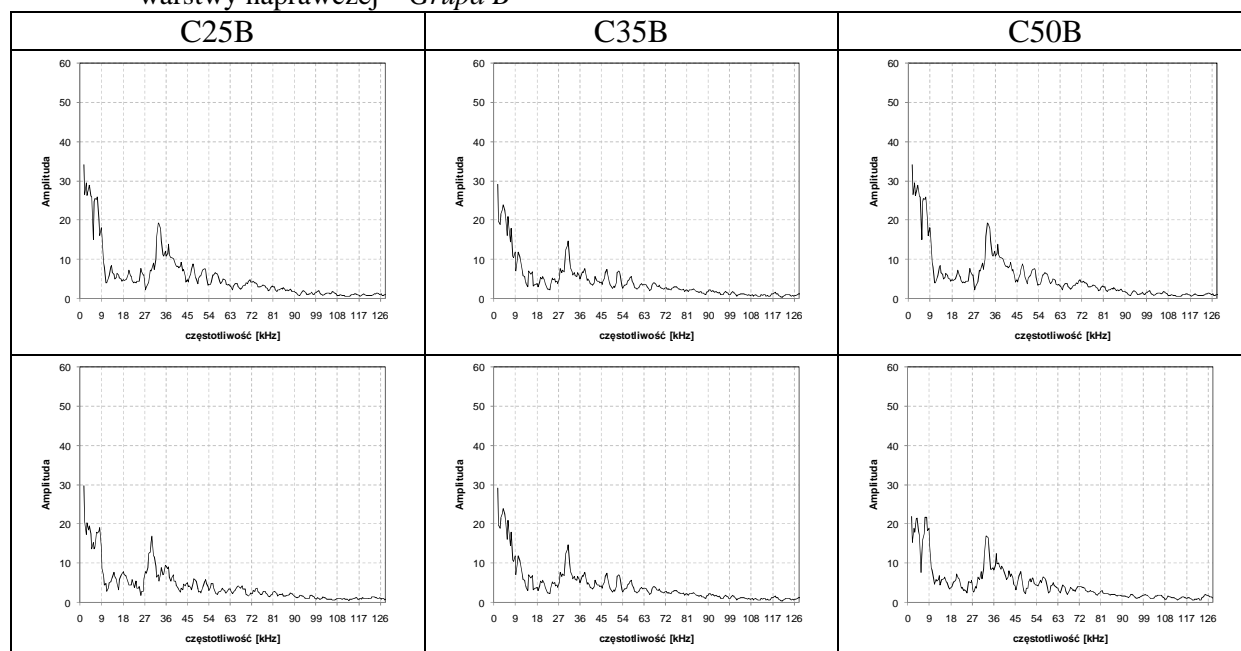
5.6.1. Charakterystyka widm częstotliwości

Widma częstotliwości *impact-echo* uzyskane dla płyt betonowych przed obróbką powierzchniową wykazywały dużą powtarzalność przy badaniu w środku płyty zarówno dla próbek *Grupy A* (60x80x10) – 10 pomiarów, jak i *Grupy B* (50x50x7) – 7 pomiarów (Tab.22, Tab.23) niezależnie od klasy wytrzymałości na ściskanie. W widmach częstotliwości występuje wyraźny pik (ok. 25kHz - *Grupa A*, ok. 30kHz - *Grupa B*) odpowiadający odbiciu od przeciwległej powierzchni płyty (dna).

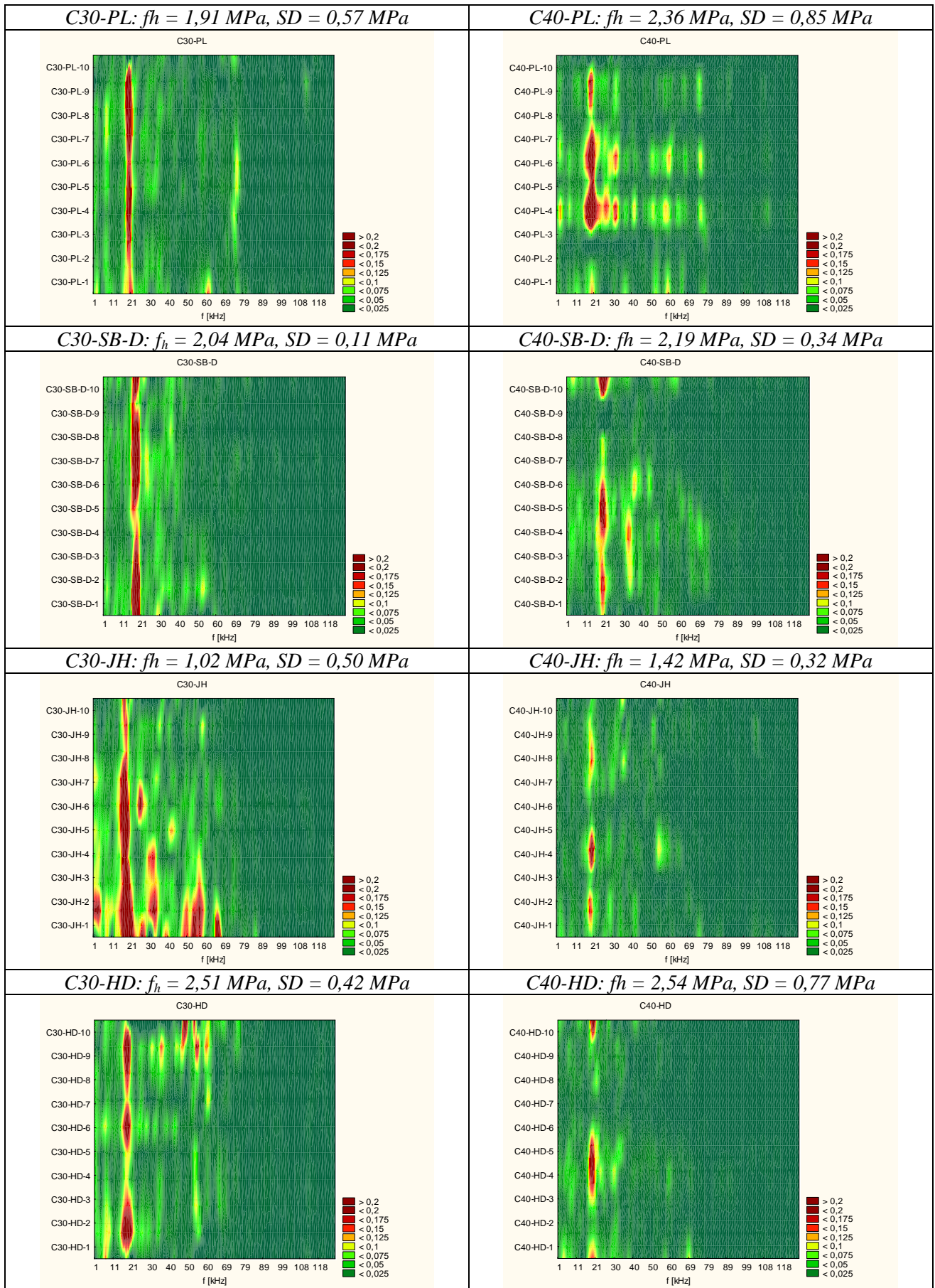
Tab.22. Przykładowe widma częstotliwości dla płyt podłoża betonowego przed obróbką i nałożeniem warstwy naprawczej – *Grupa A*



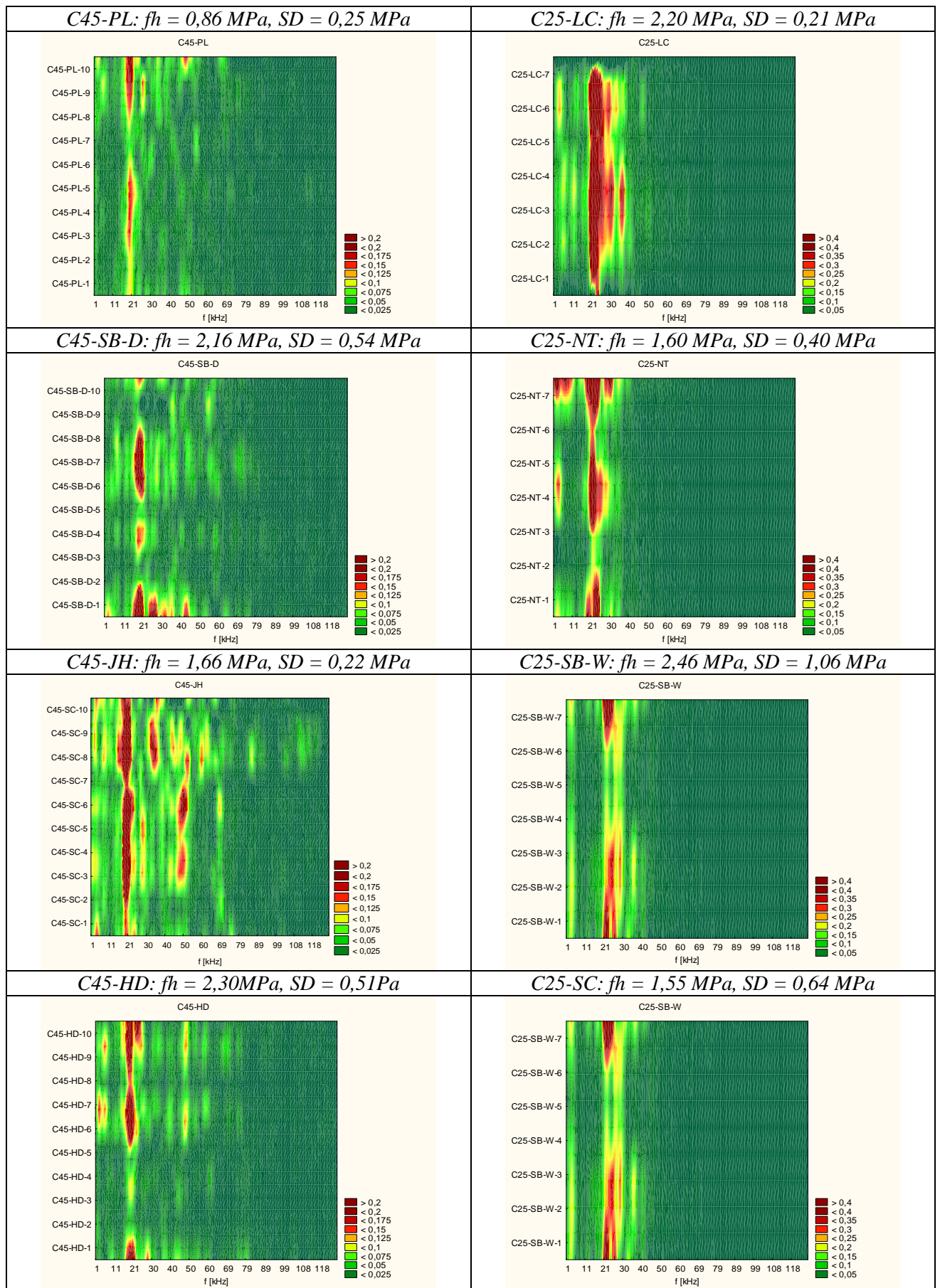
Tab.23. Przykładowe widma częstotliwości dla płyt podłoża betonowego przed obróbką i nałożeniem warstwy naprawczej – Grupa B



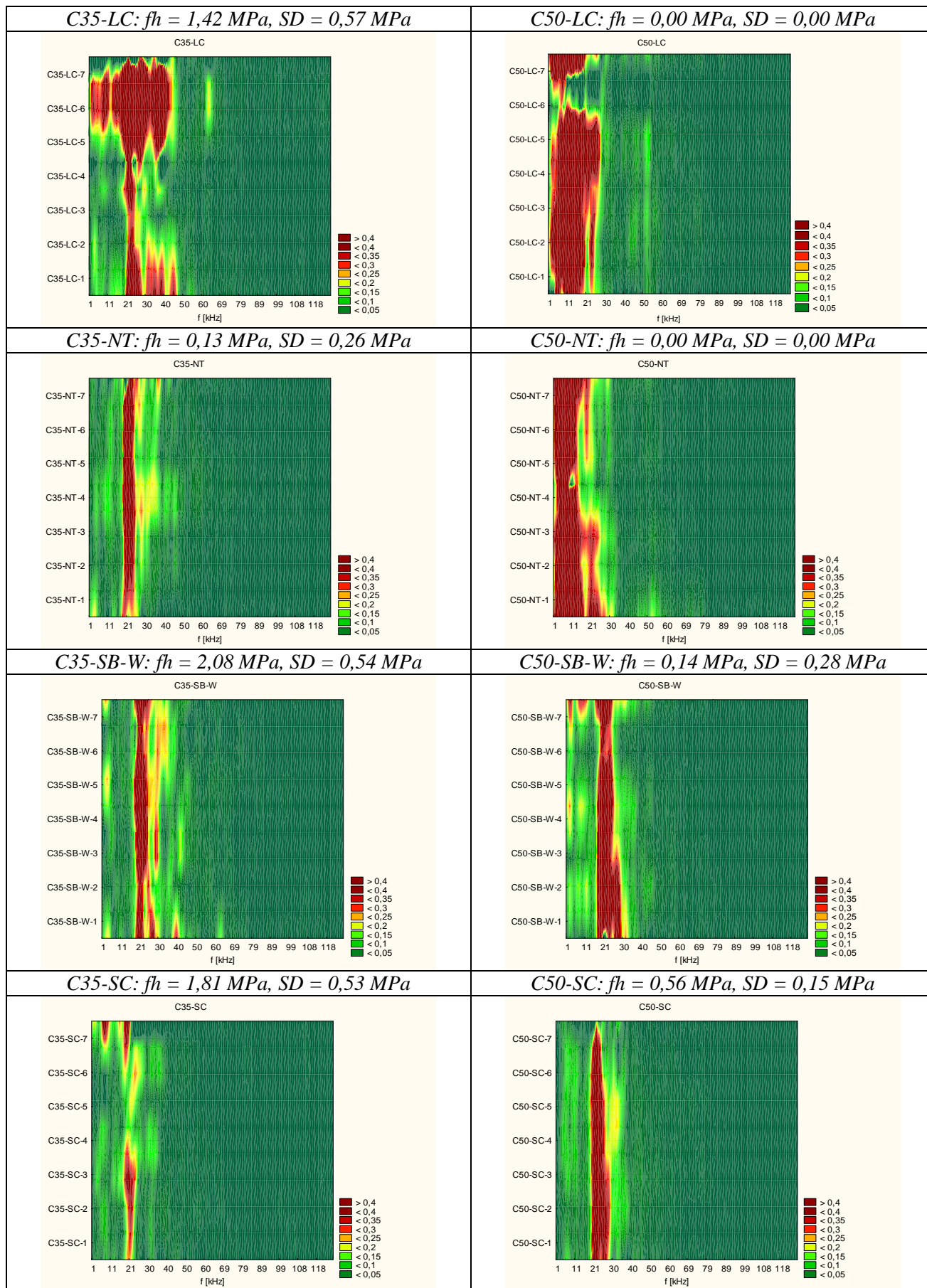
W przypadku układów naprawczych, w odróżnieniu od płyt betonowych, zmienność zarejestrowanych widm częstotliwości jest większa. Wpływ na kształt tych widm może mieć jakość zespolenia warstw, obecność defektów i pustek na powierzchni zespolenia, a także chropowatość podłoża betonowego. Wnioskowanie to wynika z podobieństwa materiałowego elementów układu naprawczego i niskiego współczynnika odbicia fali na powierzchni ich rozdziału (por. rozdział 3.1). Pozwala to na traktowanie układu naprawczego, jako układu monolitycznego. Na rysunkach 55-57 przedstawiono wyniki badań *impact-echo* układów naprawczych w postaci map widm częstotliwości w następującej konfiguracji osi: X - częstotliwość f [kHz], Y - numer pomiaru na danej próbce (*grupa A* 1÷10; *grupa B* 1÷7); kolory odpowiadają poszczególnym przedziałom amplitudy w widmie częstotliwości. Można zauważyć, że widma uzyskane w badaniach układów *Grupy A*, w których powierzchnia podłoża betonowego charakteryzowała się dużą chropowatością, są bardziej niejednorodne niż widma otrzymane w badaniach układów *Grupy B* o mniejszym stopniu rozwinięcia powierzchni podkładów betonowych. W przypadku prawie wszystkich układów naprawczych obserwuje się wyraźny, charakterystyczny pik odpowiadający odbiciu fali od dolnej powierzchni płyty betonowej (dna). Jedynie układy *C50-LC* i *C50-NT* odznaczają się widmami z wyraźnymi pikami w zakresie niskich częstotliwości - poniżej 11 kHz. Tego rodzaju widmo może świadczyć o występowaniu delaminacji, co potwierdziło odspojenie materiału naprawczego od podłoża betonowego podczas nacinania w przypadku *C50-NT* i wartość $f_{hs} = 0,0$ MPa w przypadku *C50-LC* uzyskana we wszystkich punktach pomiarowych.



Rys.55. Mapy amplitud widm częstotliwości – C30A i C40A



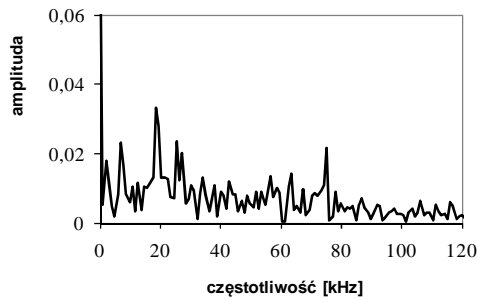
Rys.56. Mapy amplitud widm częstotliwości – C45A i C25B



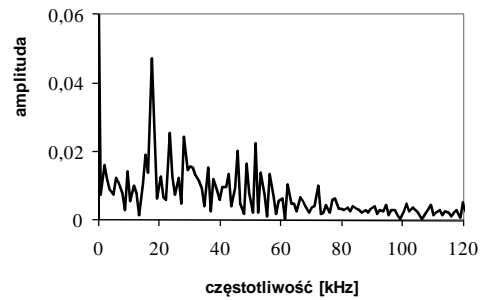
Rys.57. Mapy amplitud widm częstotliwości – C35B i C50B

Na podstawie analizy map rozkładu amplitud (analiza jakościowa) wybrano sygnały, które jako reprezentatywne były analizowane w ramach badań wstępnych.

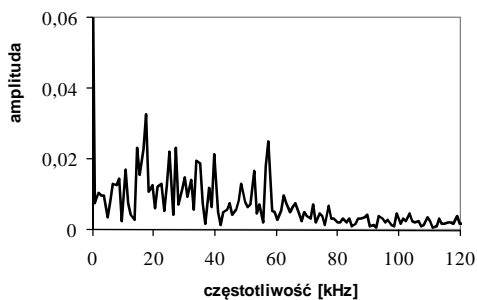
a) C30-PL



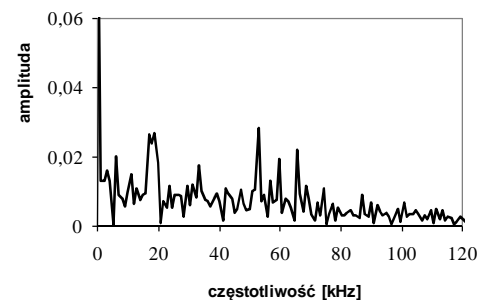
b) C30-SB-D



c) C30-JH

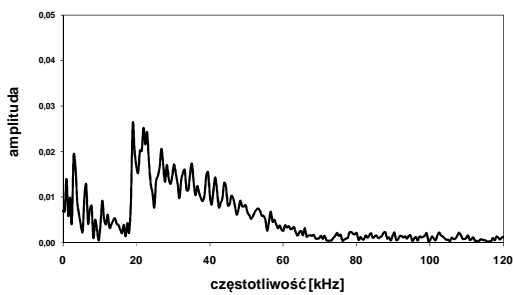


d) C30-HD

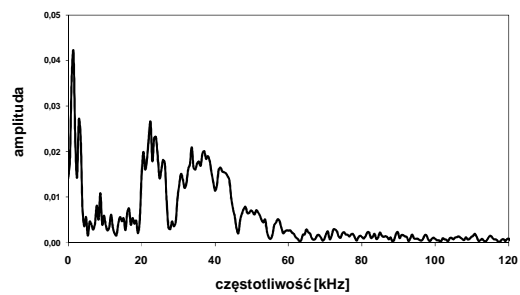


Rys.58. Wybrane reprezentatywne widma częstotliwości badań *impact-echo* próbek Grupy A w zależności od rodzaju zastosowanej obróbki powierzchniowej

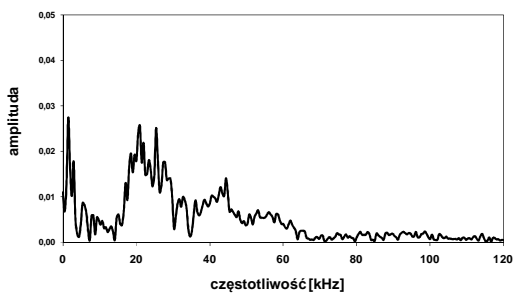
a) C35-NT



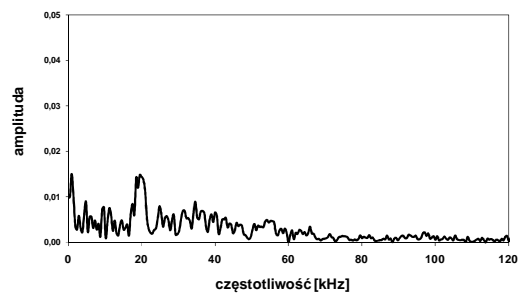
b) C35-LC



c) C35-SB-W



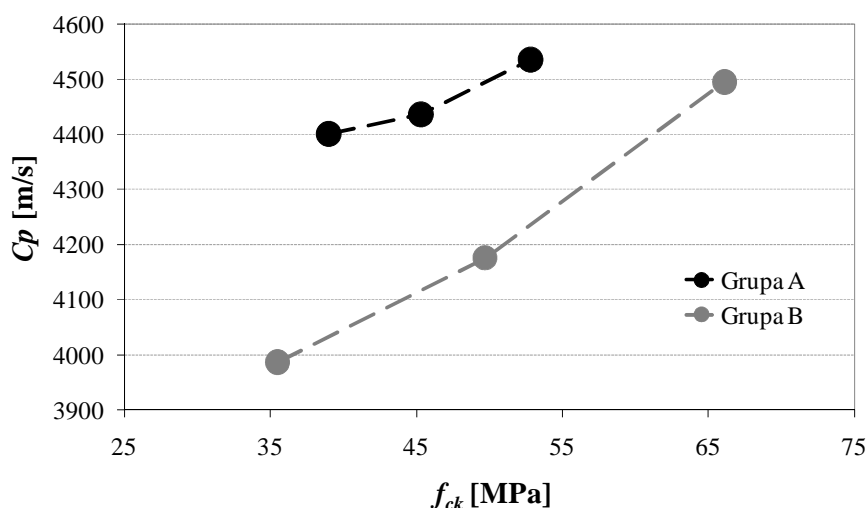
d) C35-SC



Rys.59. Wybrane reprezentatywne widma częstotliwości badań *impact-echo* próbek Grupy B w zależności od rodzaju zastosowanej obróbki powierzchniowej

Podstawowy sposób interpretacji wyników badań metodą *impact-echo* sprowadza się do analizy widm częstotliwości i wyodrębnienia częstotliwości dominujących (por. rozdział 3.1). W analogii do defektoskopowych badań ultradźwiękowych wydaje się, że jakość zespolenia można skorelować z amplitudą charakterystycznych pików pojawiających się w widmie w zakresie częstotliwości odpowiadających odbiciu fali od powierzchni rozdziału oraz przeciwległej powierzchni płyty betonowej. Spodziewać się można, że w przypadku układu naprawczego o niskiej jakości zespolenia w widmie częstotliwości pojawi się pik odpowiadający powierzchni rozdziału o stosunkowo dużej amplitudzie, natomiast zmaleje amplituda pików od dna na skutek rozproszenia fali sprężystej.

Aby zgodnie z równaniem (5) określić oczekiwane częstotliwości odpowiadające odbiciu fali sprężystej od dna i powierzchni rozdziału badanego układu naprawczego należy wyznaczyć referencyjną prędkość fali. Wyznaczona metodą pośrednią (por. rozdział 3.1) prędkość fali zawierała się w przedziale 3980÷4540 m/s zależnie od wytrzymałości betonu na ściskanie (Rys.60).



Rys.60. Wyznaczona prędkość fali w betonie w zależności od wytrzymałości na ściskanie [82]

Zaobserwowano również, że w przypadku próbek *Grupy B* prędkość fali była w większym stopniu zależna od wytrzymałości podłoża. Prędkość fali w obu materiałach naprawczych nałożonych na podkłady *Grupy A i B* była zbliżona i wynosiła odpowiednio 4000m/s i 3440 m/s. Na podstawie wyznaczonych prędkości fali dla *Grupy A i B* obliczono częstotliwości charakterystyczne (Tab.24). Pik od dna powinien być widoczny w okolicy 16 kHz dla *Grupy A* i ok. 19 kHz dla *Grupy B*, natomiast pik od powierzchni rozdziału ok. 60-70 kHz dla obu grup układów naprawczych.

Tab.24. Prędkości fali sprężystej w warstwach oraz w całym układzie naprawczym oraz obliczone częstotliwości charakterystycznych pików dla obicia fali od powierzchni rozdziału i dna

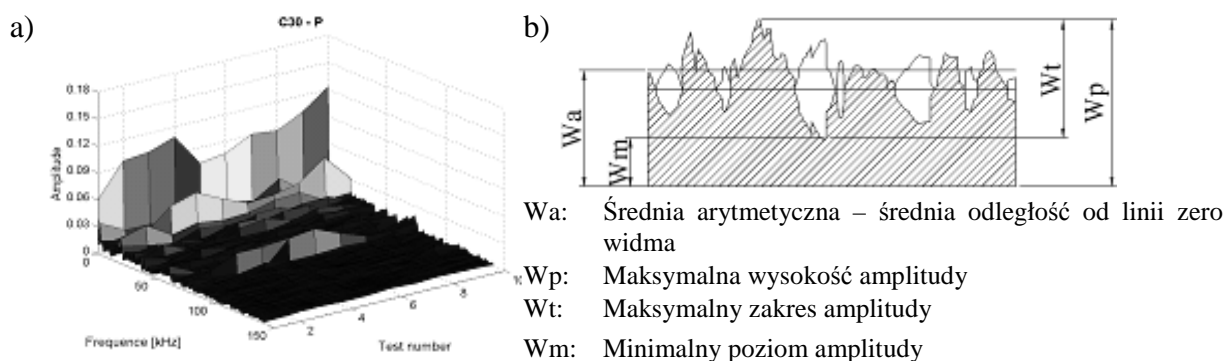
Opis	symbol	jedn.	C30A	C40A	C45A	C25B	C35B	C50B
podkład betonowy	c_p	[m/s]	4400	4436	4536	3987	4176	4495
materiał naprawczy	c_p	[m/s]	4000			3440		
układ naprawczy	c_p	[m/s]	4185	4210	4279	3805	3924	4116
dno	fb	[kHz]	16,1	16,2	16,5	19,0	19,6	20,6
powierzchnia rozdziału	fi	[kHz]	66,7	66,7	66,7	57,3	57,3	57,3

W celu uwzględnienia ewentualnego przesunięcia charakterystycznych pików na osi częstotliwości w wyniku zmiany prędkości fali dla betonów różnych klas, a także głębokości występowania powierzchni rozdziału, amplitudę widm analizowano w rozszerzonych przedziałach (Tab.25). Szczegółowe wartości maksymalnych amplitud charakterystycznych pików zawiera Załącznik V.

Tab.25. Przedziały częstotliwości do wyznaczenia amplitudy pików charakterystycznych

rodzaj pików	jednostka	Grupa A		Grupa B	
		od	do	od	do
fb	[kHz]	14,65	19,53	17,58	22,46
fi	[kHz]	58,59	87,89	42,97	72,27

Mapy amplitud widm częstotliwości próbek C40A były również scharakteryzowane przy zastosowaniu, opracowanego przy udziale autora rozprawy [28], programu komputerowego RugoDS do analizy 3D profilu powierzchniowego (Rys.61a). Obliczone zostały statystyczne parametry (Rys.61b) map rozkładu amplitud częstotliwości na powierzchni xy .



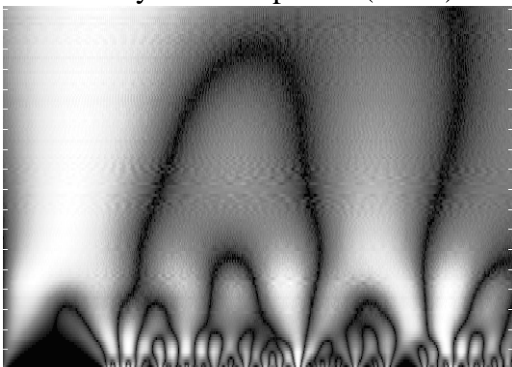
Rys.61. Przykład rozkładu widma częstotliwości *impact-echo* (a) oraz parametry statystyczne wykorzystane do opisu rozkładu widma (b) [53]

5.6.2. Analiza falkowa sygnałów *impact-echo*

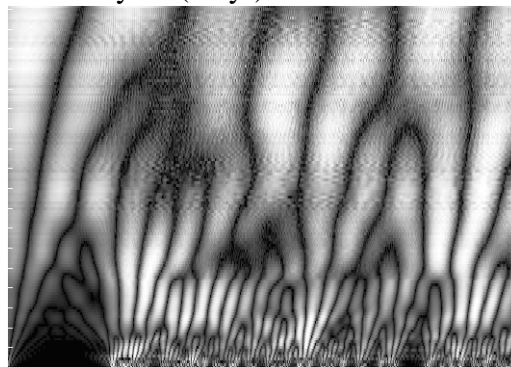
W pierwszym etapie analizę wyników badań *impact-echo* przeprowadzono na podstawie wyników ciągłej transformaty falkowej, *CWT*. W skalogramach dla badanych układów naprawczych można zaobserwować wpływ rodzaju falki na charakter skalogramu

(Rys.62), a także pewne różnice w zależności od zastosowanej obróbki powierzchniowej podłoża betonowego (Rys.63).

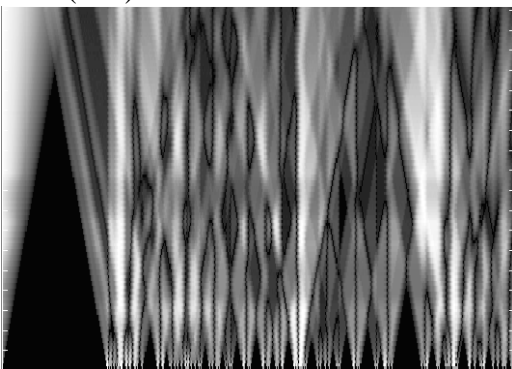
a) falka meksykański kapelusz (mexh)



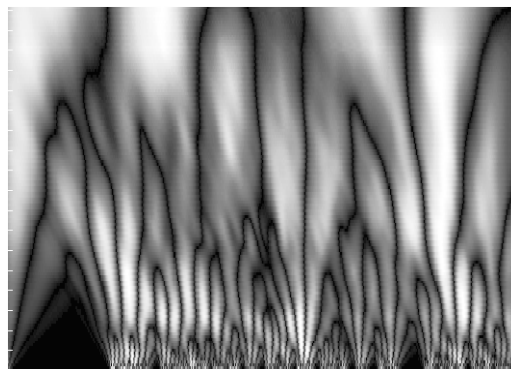
a) falka Meyera (meyr)



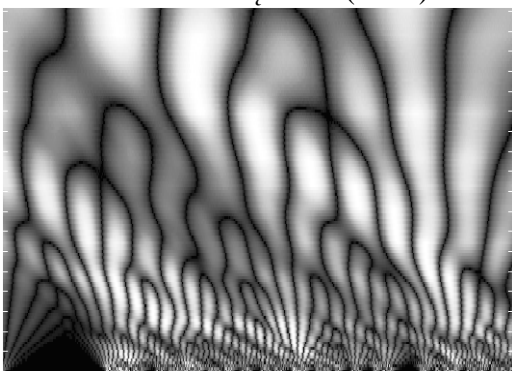
a) falka Haara (haar), inaczej Daubechies rzędu 1 (db1)



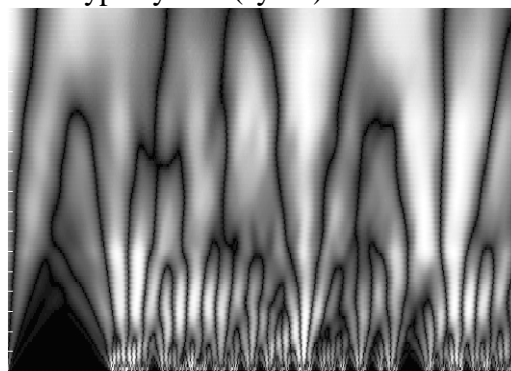
b) falka Daubechies rzędu 4 (db4)



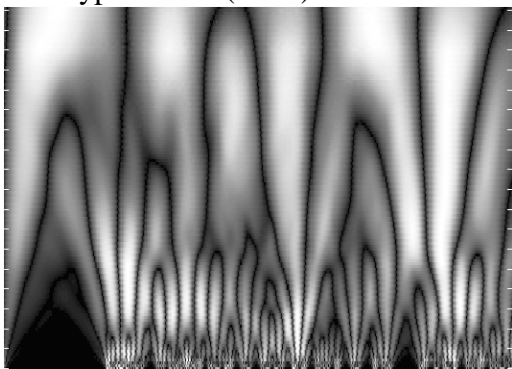
c) falka Daubechies rzędu 10 (db10)



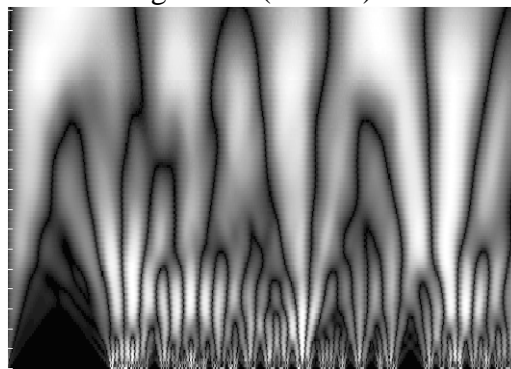
d) falka typu symlet (sym5)



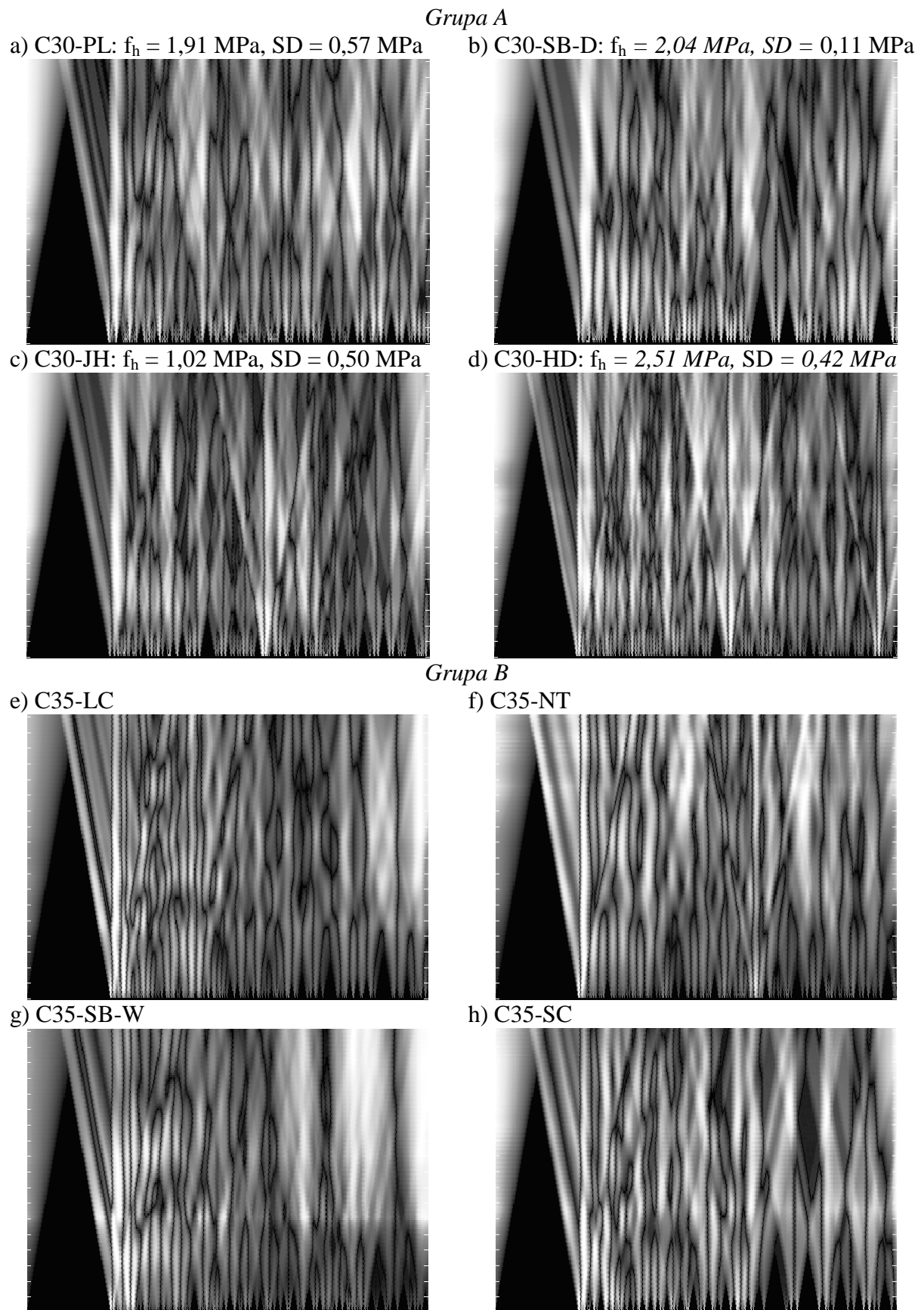
d) falka typu coiflet (coif3)



d) falka biortogonalna (rbio5.5)

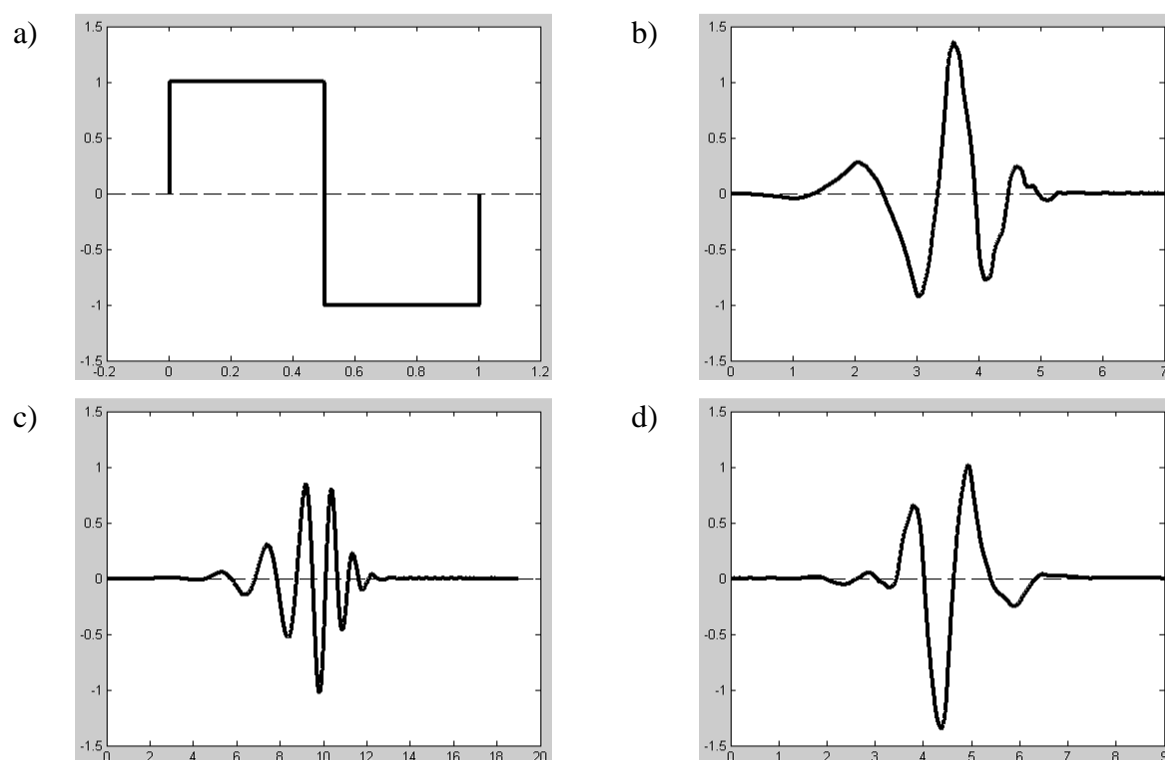


Rys.62. Zmienność skalogramów CWT w zależności od zastosowanej falki



Rys.63. Przykładowe skalogramy *CWT* otrzymane przy zastosowaniu falki Haara w zależności od zastosowanej obróbki powierzchniowej podłoża

Rucka i Wilde [86,87] na podstawie zestawienia symulacji komputerowych z wynikami eksperymentalnymi wskazują, że CWT jest bardziej efektywna w jakościowym wykrywaniu i lokalizacji dużych defektów niż DWT. Uzyskane skalogramy CWT nie pozwalają jednak na jednoznaczną ich interpretację w aspekcie oceny jakości zespolenia. Aby przeanalizować wpływ jakości zespolenia na wyniki analizy falkowej sygnału, w kolejnym etapie badań, przeprowadzono analizę dyskretną, która pozwala na wielorozdzielczą dekompozycję sygnału, analizę statystyczną rozkładu amplitudy detali na różnych poziomach i powiązanie uzyskanych parametrów statystycznych z przyczepnością. Transformacja *DWT* z uwagi na charakterystykę falki matki może zostać przeprowadzona w pełnym zakresie jedynie dla falek ortogonalnych i biortogonalnych. Najczęściej w analizie wyników badań nieniszczących stosowane są falki ortogonalne. Analizę *DWT* sygnałów próbek *Grupy A* wykonano przy użyciu następujących wybranych falek ortogonalnych: *Daubechies* rzędu 1 (*db1*- zwana falką Haara) oraz rzędów 4 i 10 (*db4* i *db10*), a także *Symlet* rzędu 5 (*sym5*).



Rys.64. Falki: db1 - Haara (a), db4 (b), db10 (c) i Sym5 (d)

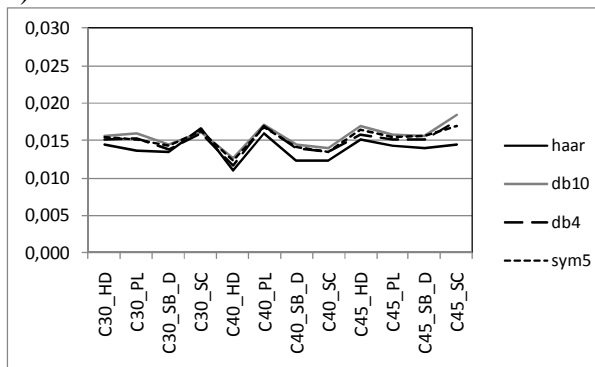
Następnie dla poszczególnych detali, D_i i aproksymacji sygnału, A obliczono statystyczne parametry rozkładu amplitud i współczynników falkowych (szczegółowe wyniki zawierają Załączniki VI-Załącznik VI-VIII). Spośród zbioru statystycznych parametrów wybrano:

- zakres (ang. *Range, RG*) - różnica między maksimum a minimum;
- odchylenie standardowe populacji (ang. *Standard Deviation, SD*) - średnia kwadratowa z różnic między wartościami zmiennej a ich średnią arytmetyczną (por. równanie (31));
- średnie odchylenie bezwzględne (ang. *Mean Absolute Deviation, MAD*) - średnia wartość odchyżeń bezwzględnych zmiennej od średniej arytmetycznej, które oblicza się ze wzoru:

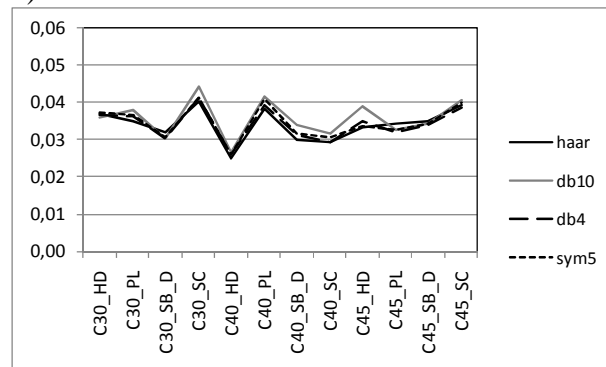
$$MAD = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{n} \quad (38)$$

Stwierdzono, że parametry rozkładu współczynników falkowych i amplituda dla zrekonstruowanej aproksymacji, nie zależą od rodzaju falki, natomiast w większym stopniu rodzaj falki wpływa na wartości tych parametrów dla detali (Rys.65, Rys.66, Rys.67). Jest to szczególnie widoczne na poziomie detali wyższych stopni: 4 i więcej. Parametry statystyczne (*MAD, SD, RG*) rozkładu współczynników falkowych i amplitud zrekonstruowanych detali niższego stopnia: 1, 2 czy 3, odpowiadających wyższym częstotliwościom, układają się w linie o zbliżonym charakterze, co wskazuje na mniejszą zmienność wartości w zależności od zastosowanej falki. Największą zmiennością odznacza się zakres, *RG* współczynników falkowych.

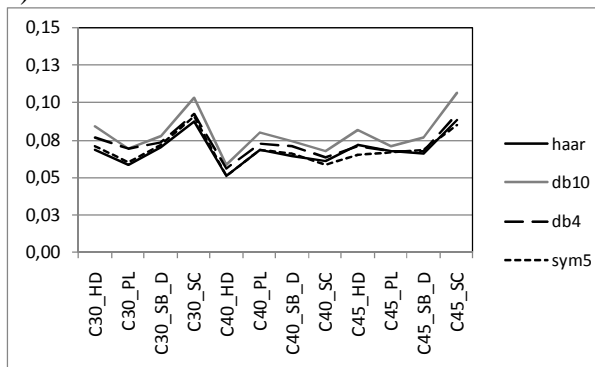
a) D1



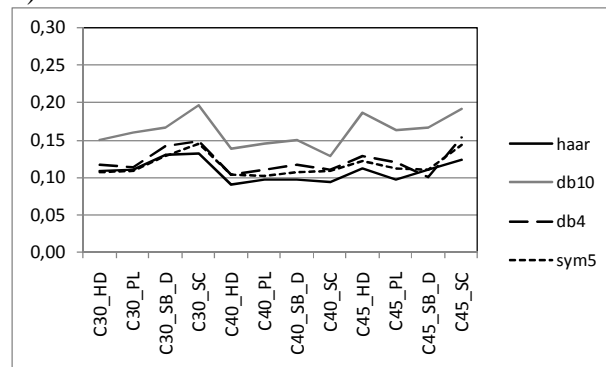
b) D2



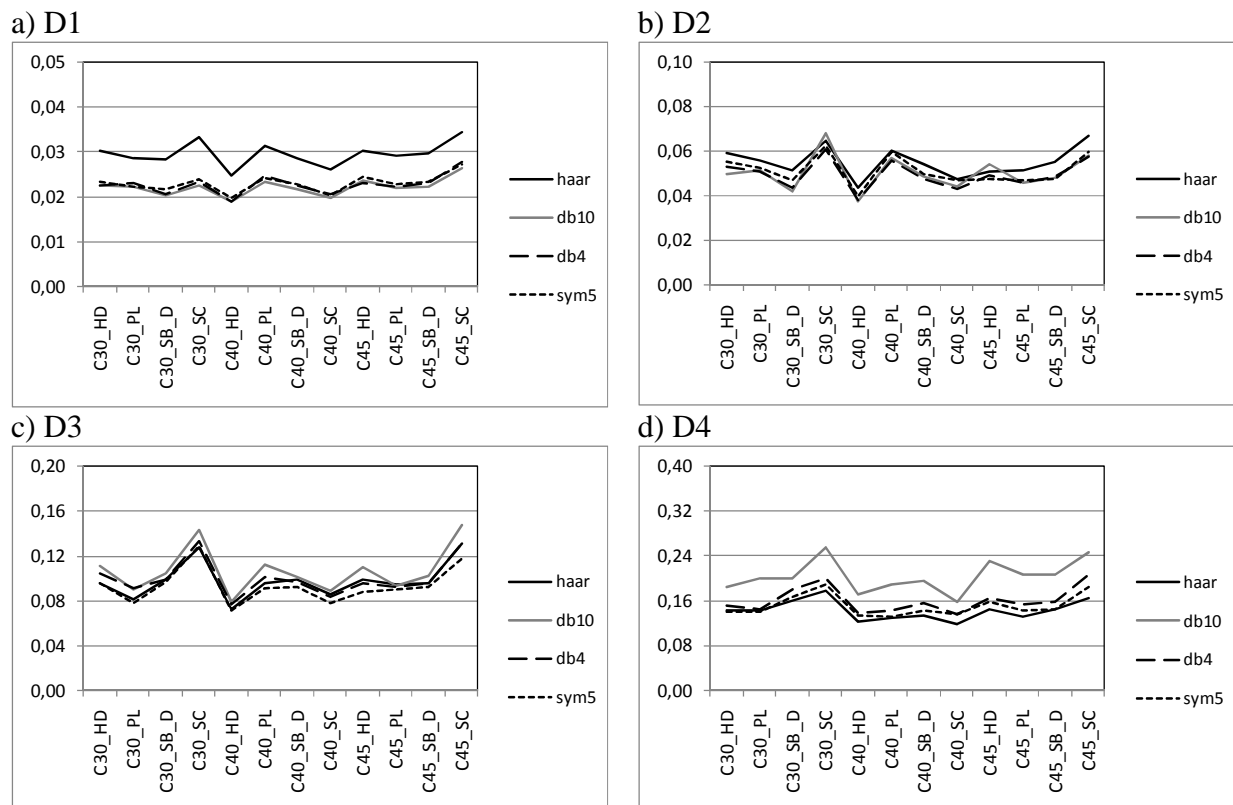
c) D3



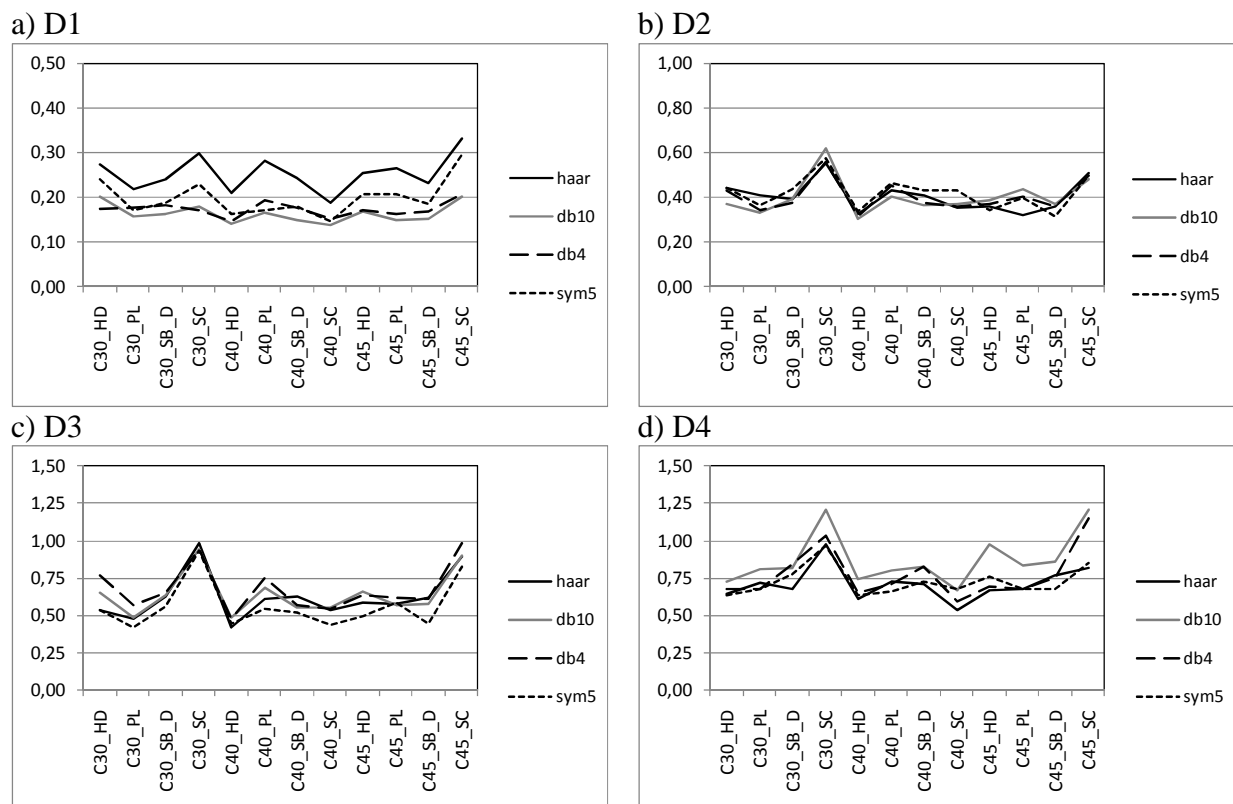
d) D4



Rys.65. Średnie odchylenie bezwzględne (*MAD*) rozkładu współczynników falkowych obliczone przy wykorzystaniu różnych falek (haar,db4,db10,sym5)



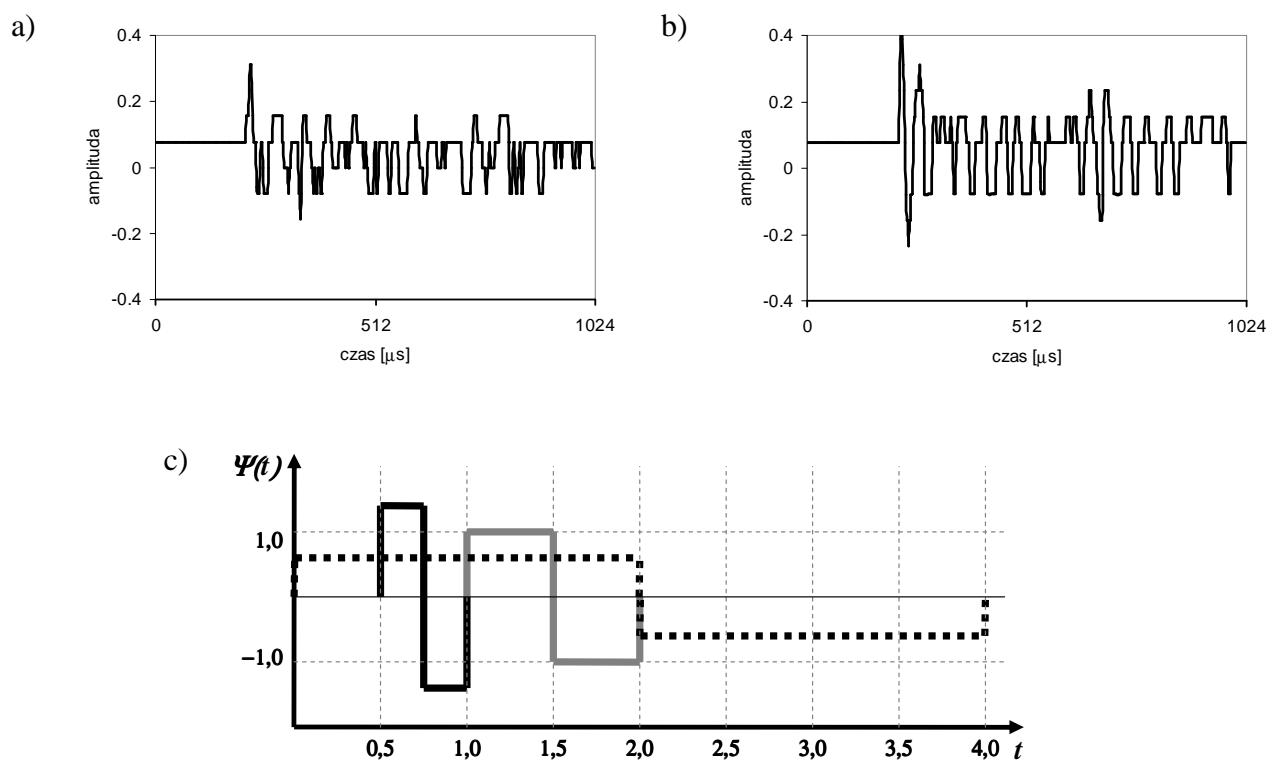
Rys.66. Odchylenie standardowe (*SD*) rozkładu współczynników falkowych obliczone przy wykorzystaniu różnych falek (haar,db4,db10,sym5)



Rys.67. Zakres (*RG*) rozkładu współczynników falkowych obliczone przy wykorzystaniu różnych falek (haar,db4,db10,sym5)

Wielu autorów wskazuje na duże znaczenie doboru najbardziej odpowiedniej falki do danej analizy [76,78], Podstawowym założeniem jest, aby falka matka odpowiadała najbardziej charakterowi sygnału. Ovenesova i in. [78] zaproponowali eliminacyjną metodę doboru falki do detekcji rys w belce żelbetowej na podstawie właściwości falki matki. W wyniku przeprowadzonej analizy, w ostatnim kroku został dokonany wybór między falką biortogonalną i falką Haara na korzyść tej pierwszej, jako bardziej regularnej. Natomiast Quek i in. [85] na podstawie analiz numerycznych wykazali, że w detekcji rys w belkach, falka Haara ma lepszą skuteczność niż falka Gabora.

Przeprowadzana w pracy analiza sygnału *impact-echo* przy zastosowaniu transformaty falkowej opierała się na dekompozycji sygnału na składowe wysokoczęstotliwościowe (detale) odpowiadające odbiciu fali od powierzchni rozdziału i statystycznej analizie ich zmienności. Biorąc pod uwagę dyskretny charakter zmian w sygnale *impact-echo* (Rys.68a,b) oraz wymaganie aby zastosowana falka była reprezentatywna dla charakteru sygnału (Rys.68c), do przeprowadzenia szczegółowej analizy sygnału została wybrana falka Haara.



Rys.68. Sygnały *impact-echo*: Grupa A (a) i Grupa B (b) oraz przykładowe elementy rodziny falek Haara (c)

Informacja dotyczące jakości zespolenia powinna być zlokalizowana w widmie w zakresie częstotliwości odpowiadającym powierzchni rozdziału dla danego układu naprawczego.

W związku z tym, przed przystąpieniem do dalszej analizy, obliczono tzw. pseudoczęstotliwości dla poszczególnych detali (por. rozdział 3.1) i wytypowano detale, w których zawarta jest informacja o jakości zespolenia (Tab.26). Dla badanych układów naprawczych informacja ta powinna być zlokalizowana w detalach $D2$ i $D3$ (ok. 60-70 kHz) z większym udziałem $D3$.

Tab.26. Pseudoczęstotliwość dla detali poziomów 1-6 analizy dyskretnej, przy częstotliwości próbkowania $\Delta=2\mu\text{s}$

skala	poziom detalu	pseudoczęstotliwość [kHz] *)				
		haar	db4	db10	sym5	coif3
2	$D1$	249	179	171	167	176
4	$D2$	125	89	86	83	88
8	$D3$	62	45	43	42	44
16	$D4$	31	22	21	21	22
32	$D5$	16	11	11	10	11
64	$D6$	8	6	5	5	6

*) Pogrubienie wskazuje na detale, których pseudo-częstotliwość jest zbliżona do częstotliwości fali odbitej od powierzchni rozdziału

Korzystając z dostępnych w programie Matlab Wavelet Toolbox procedur oprócz parametrów statystycznych (RG , SD , MAD) opisujących rozkład amplitudy sygnału i detali, kolejnym analizowanym parametrem opisującym dekompozycję sygnału za pomocą transformaty falkowej był podział na poszczególne detale i aproksymację całkowitej energii sygnału, EN zdefiniowanej równaniem:

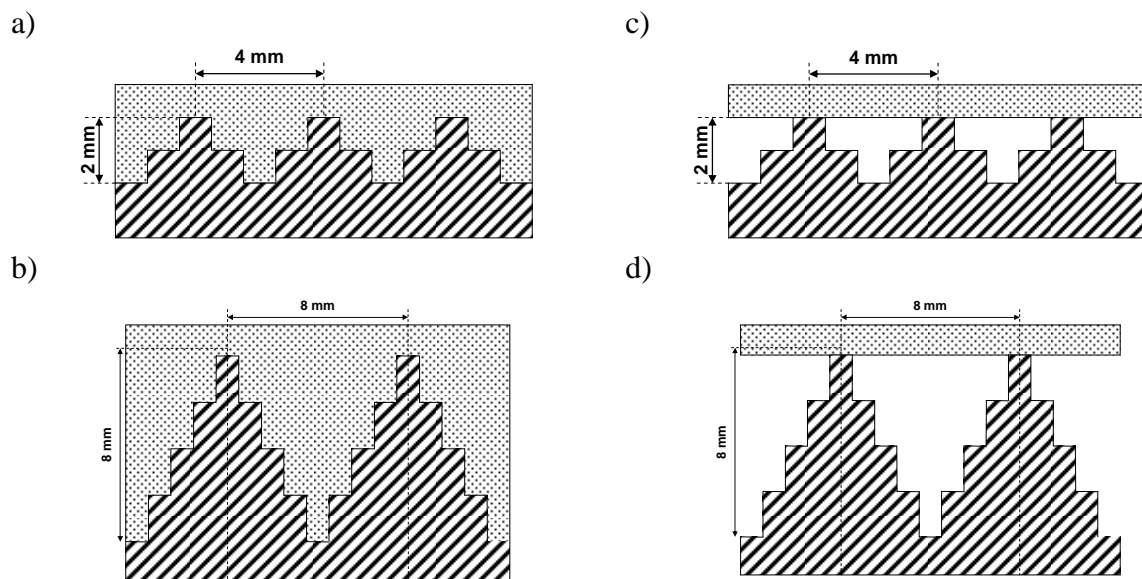
$$EN = \int_t s^2(t) dt, \quad (39)$$

Obliczane wartości energii aproksymacji, EN_a i detalu, EN_d opisują ich procentowy udział energetyczny w całkowitej energii sygnału, EN .

5.7. Analiza falkowa wyników symulacji komputerowej układów z chropowatą powierzchnią podkładu

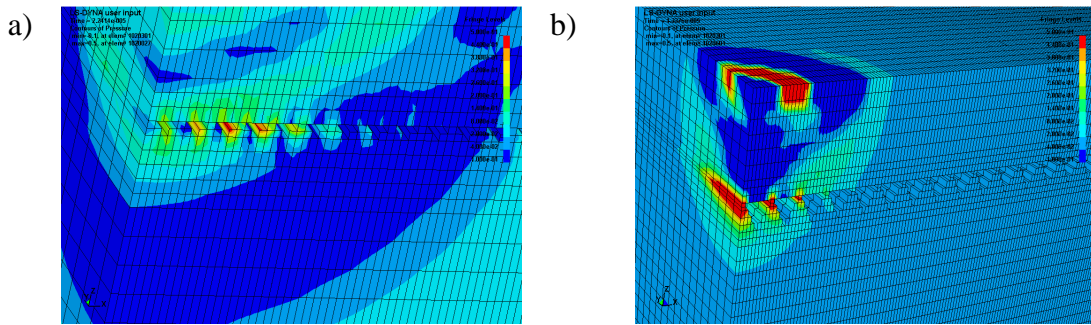
Symulacje komputerowe przeprowadzone Metodą Elementów Skończonych, MES , pozwalają na wyodrębnienie wyraźniejszych zmian w zależności od jakości zespolenia oraz na określenie układu referencyjnego, wobec którego mogą być zweryfikowane wyniki badań eksperymentalnych. Sansalone i Jiunn-Ming na podstawie symulacji komputerowych [94] zweryfikowanych eksperymentalnie [95] wykazali, że płaszczyzna zespolenia dwóch materiałów, stanowi płaszczyznę odbicia fali sprężystej, jeśli współczynnik odbicia (iloraz różnicy przez sumę impedancji akustycznych materiałów) jest większy niż $\pm 0,24$. Garbacz i Kwaśniewski [51] przeprowadzili symulacje dla trzech materiałów naprawczych o zróżnicowanym module sprężystości i gęstości, a w konsekwencji różnym współczynniku

odbicia. Wyniki potwierdziły, iż przy pewnej różnicy modułu sprężystości w stosunku do podkładu betonowego następuje odbicie fali sprężystej od powierzchni podkładu. Odnotowano także przesunięcie piku częstotliwości odpowiadającego powierzchni rozdziału w kierunku częstotliwości płyty wraz ze wzrostem grubości warstwy materiału naprawczego. Zaobserwowano również intensyfikację piku od powierzchni rozdziału w widmie częstotliwości w przypadku występowania delaminacji (braku połączenia między warstwami modelu matematycznego). Podobna symulacja została przeprowadzona dla podkładów betonowych o chropowatej powierzchni i wymiarach zbliżonych do występujących w badaniach eksperymentalnych. Przy projektowaniu modelu *MES* wykorzystano rzeczywistą charakterystykę podłoża betonowego w odniesieniu do chropowatości powierzchni [28]. Na tej podstawie dobrano wysokości profilu odpowiadające powierzchniom dla próbek *Grupy A* po piaskowaniu, *SB-D* i obróbce hydrodynamicznej, *HD* (Rys.69). Analizowano układ naprawczy z wypełnieniem pustek w profilu powierzchni (oznaczenie *Sym_SB-D* i *Sym_HD*) oraz z pustkami (oznaczenie *Sym_SB-D_p*, *Sym_HD_p*).



Rys.69. Schemat układu naprawczego w modelu *MES* w przypadku: profilu wypełnionego *Sym_SB-D* (a) i *Sym_HD* (b) oraz niewypełnionego *Sym_SB-D_p* (c) i *Sym_HD_p* (d)

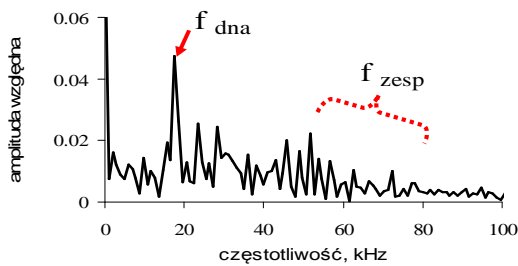
Wyniki symulacji komputerowych *MES* propagacji fali sprężystej w układzie naprawczym wskazują na wyraźne zaburzenia na pustkach zlokalizowanych na powierzchni rozdziału (Rys.70). Widma częstotliwości otrzymane w wyniku symulacji *MES* dla dwóch typów układów naprawczych o zróżnicowanej szorstkości powierzchni podkładu betonowego wykazują dużą zgodność z widmami rzeczywistymi, szczególnie w przypadku modelu zawierającego pustki na powierzchni zespolenia (Rys.71).



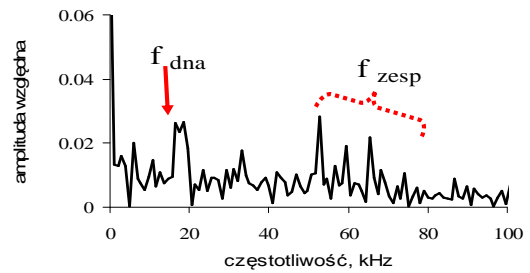
Rys.70. Wizualizacja zaburzenia propagacji fali sprężystej na pustkach zlokalizowanych na powierzchni zespolenia dla układu naprawczego *Sym_SB-D_p* (a) *Sym_HD_p* (b) [51]

We wszystkich przypadkach pik odpowiadający odbiciu fali od przeciwległej powierzchni próbki rejestrowano dla zbliżonej wartości częstotliwości - ok. 17 kHz, a zakres częstotliwości widma (50-80kHz) odpowiadający interakcji fali sprężystej z powierzchnią zespolenia miał zbliżony rozmyty charakter. Uzyskane wyniki wskazują, że chropowatość podkładu betonowego oraz obecność większych pustek w płaszczyźnie zespolenia wpływa na propagację fali sprężystej w układzie naprawczym.

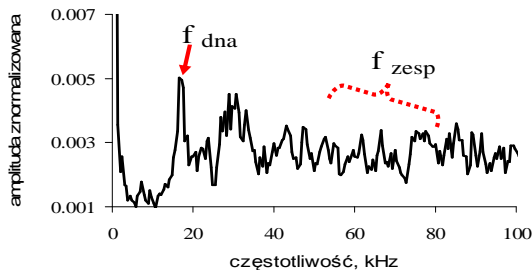
a) *SB-D*



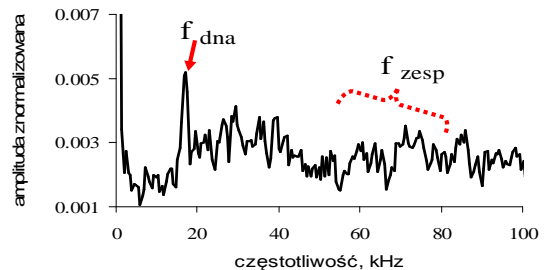
d) *HD*



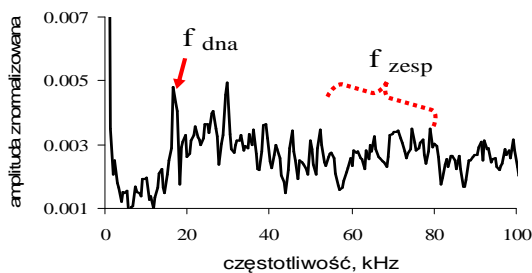
b) *Sym_SB-D*



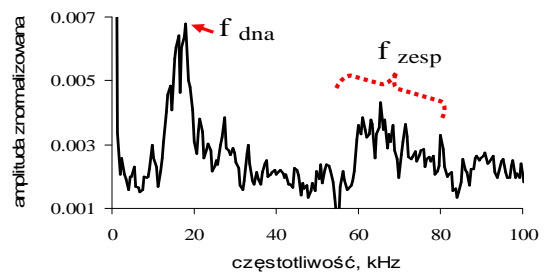
e) *Sym_HD*



c) *Sym_SB-D_p*

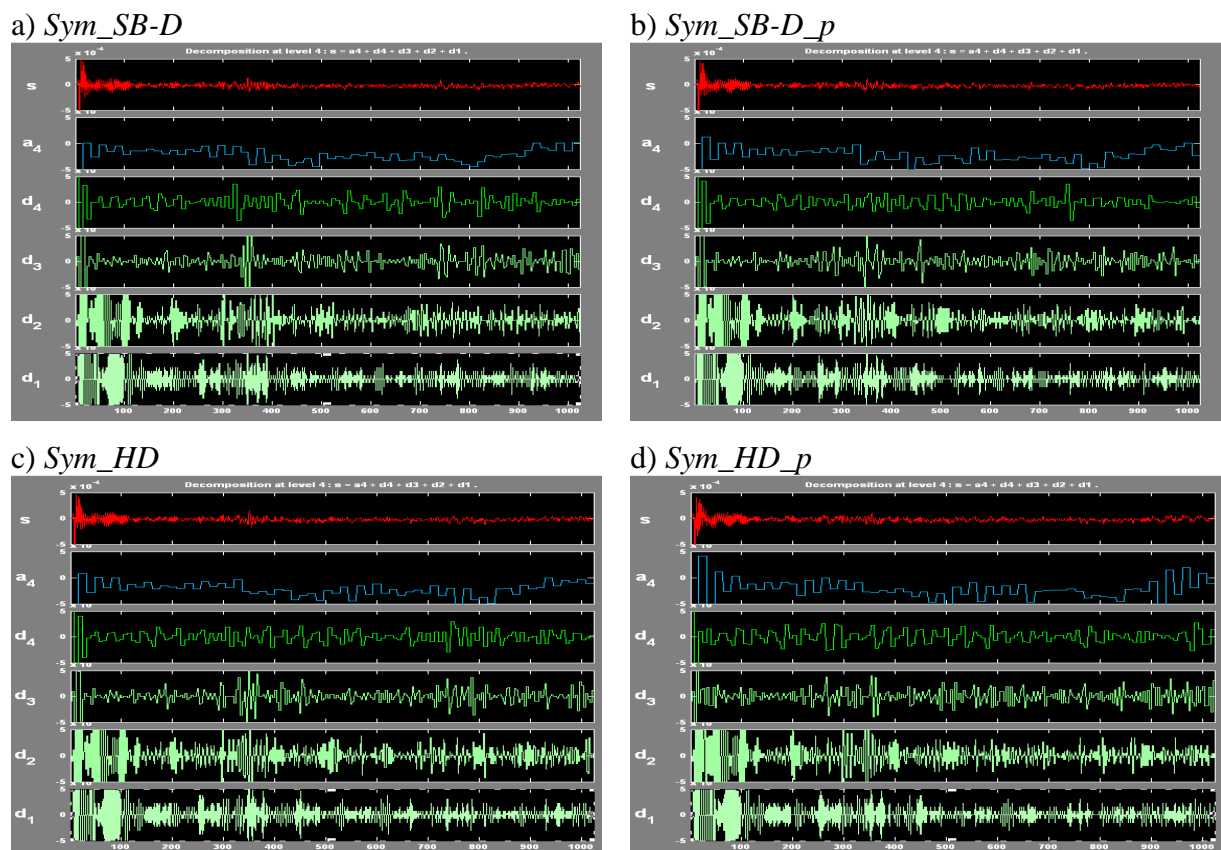


f) *Sym_HD_p*



Rys.71. Widma częstotliwości rzeczywistych układów naprawczych (a,d) oraz wyniki symulacji MES dla układu o wypełnionym profilu podkładu betonowego (b,e) i dla układu o niewypełnionym profilu - pustki w płaszczyźnie zespolenia (c,f)

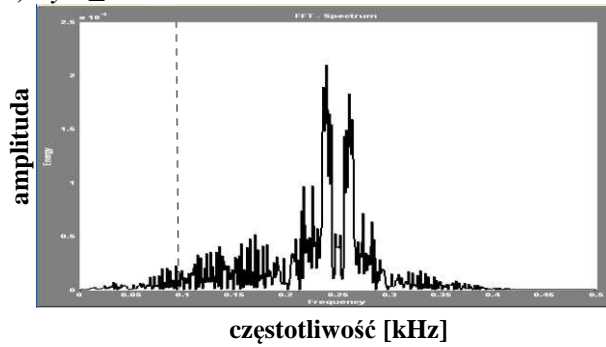
Autor rozprawy przeprowadził analizę falkową sygnałów otrzymanych z symulacji MES. Wpływ obecności pustek na propagację fali sprężystej potwierdzają również wyniki analizy falkowej *DWT* sygnałów symulacji komputerowych przeprowadzone przy użyciu falki Haara (Rys.72). Najmniejsze różnice występują na poziomie detalu *D1* który to odpowiada dużym częstotliwościom, które najczęściej są utożsamiane z szumem. Od poziomu *D2* do *D4* można już zaobserwować pewne różnice w przebiegu składowych sygnału, natomiast nie wykazuje ich już aproksymacja sygnału na poziomie 4.



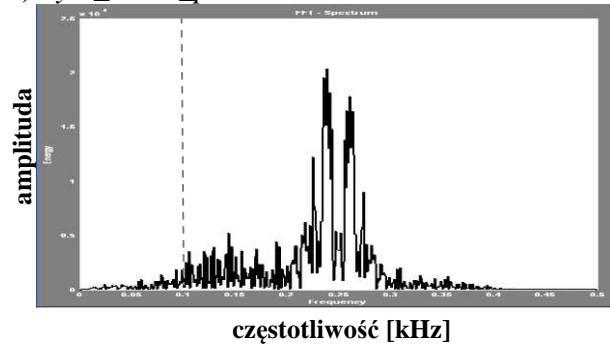
Rys.72. Wyniki analizy *DWT* sygnałów symulacji komputerowych

Wyniki analizy *FFT* przeprowadzone na poszczególnych detalach potwierdzają zaobserwowane różnice (Rys.73). Dla układu naprawczego *Sym_HD_p* o wysokiej amplitudzie profilu i z pustkami na powierzchni rozdziału w *D2* pojawia się wyraźny pik o dużej amplitudzie i częstotliwości odpowiadającej odbiciu od powierzchni rozdziału (Rys.73d). Również w *D3* dla tego układu naprawczego w okolicy tej częstotliwości piki mają względnie najwyższą amplitudę (Rys.74).

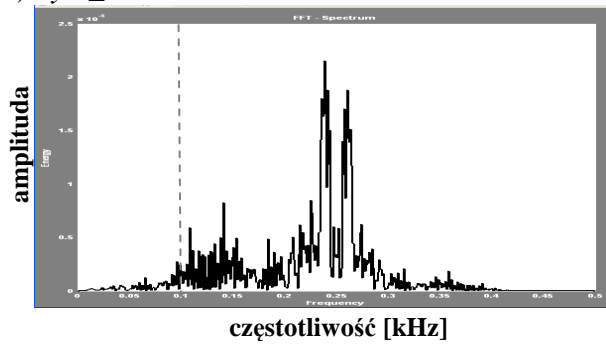
a) *Sym_SB-D*



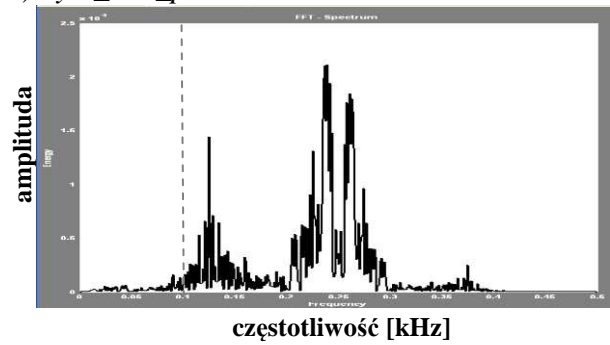
b) *Sym_SB-D_p*



c) *Sym_HD*

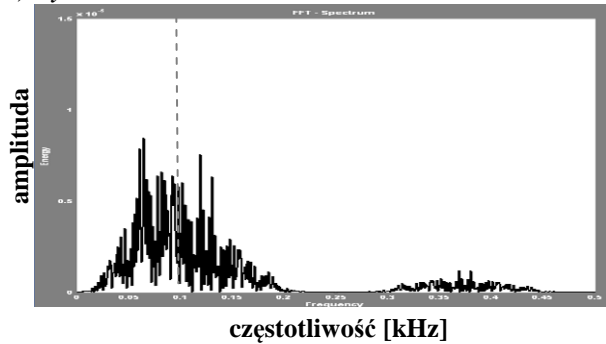


d) *Sym_HD_p*

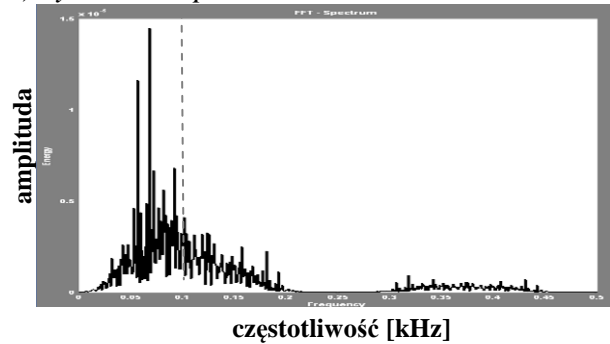


Rys.73. FFT detalu D2 sygnałów symulacji komputerowych propagacji fali sprężystej w układach naprawczych; objaśnienie symboli na Rys.69 – wynik z Matlab Wavelet Toolbox

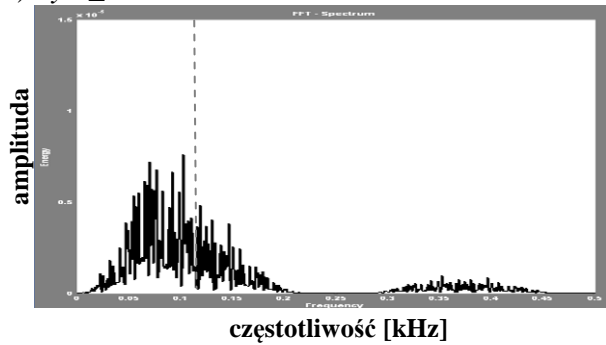
a) *Sym_SB-D*



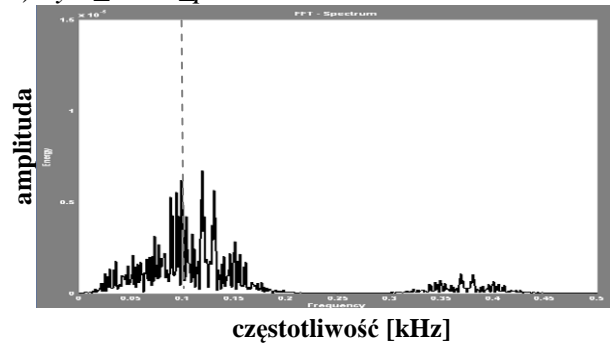
b) *Sym_SB-D_p*



a) *Sym_SB-D*



b) *Sym_SB-D_p*

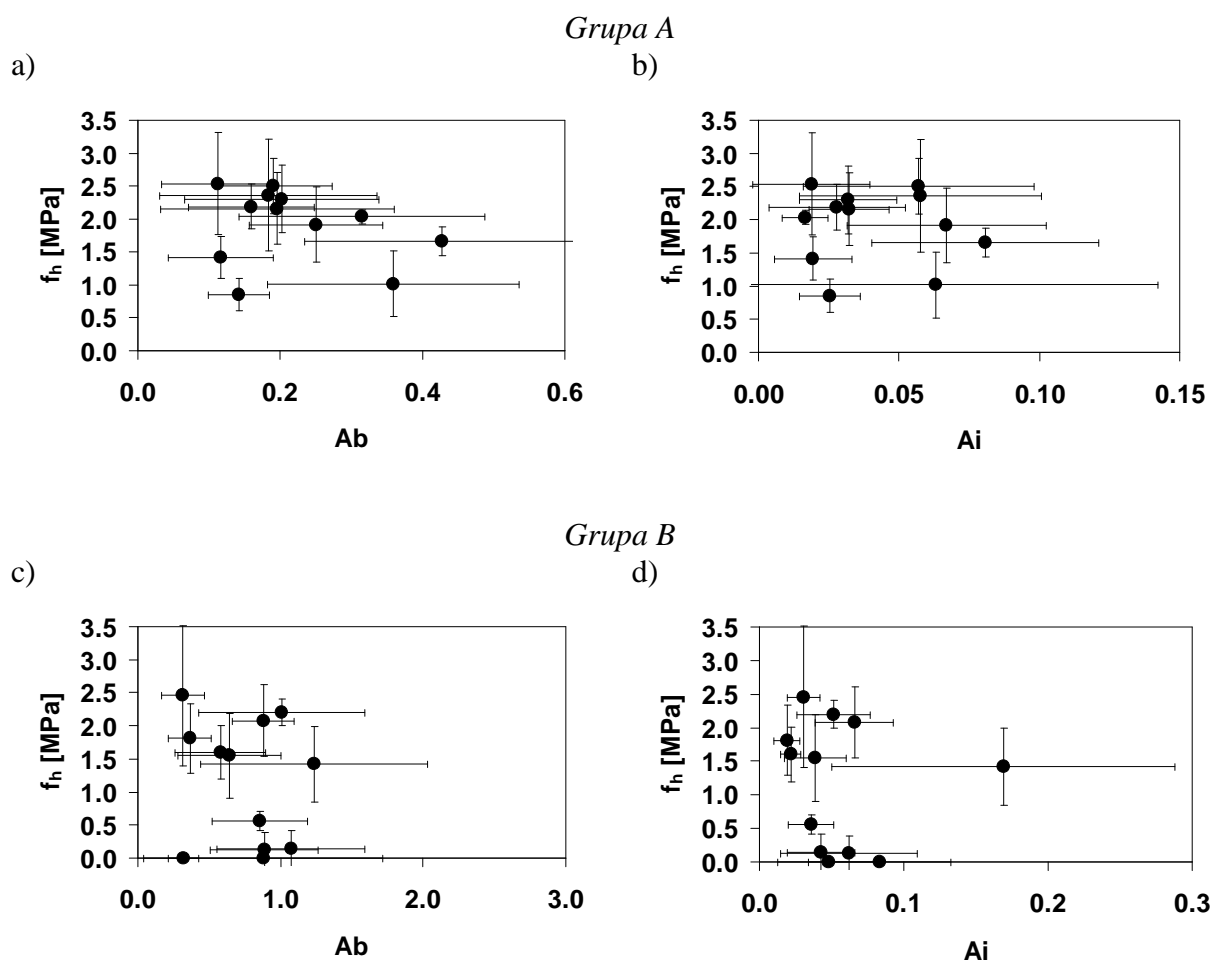


Rys.74. FFT detalu D3 sygnałów symulacji komputerowych propagacji fali sprężystej w układach naprawczych; objaśnienie symboli na Rys.69 – wynik z Matlab Wavelet Toolbox

6. ANALIZA ZALEŻNOŚCI MIĘDZY PRZYCZEPNOŚCIĄ A PARAMETRAMI OPISUJĄCYMI JAKOŚĆ PODŁOŻA BETONOWEGO I PROPAGACJĘ FALI SPRĘŻYSTEJ W METODZIE *IMPACT-ECHO*

6.1. Amplitudy charakterystycznych pików w widmie częstotliwości

Analiza wysokości charakterystycznych pików w widmie częstotliwości (szczegółowe wyniki zawiera Załącznik V) wykazała brak statystycznie istotnej zależności między średnimi wartościami amplitud pików Ab i Ai , oraz jakością zespolenia wyrażoną przyczepnością przy odrywaniu, f_h (Rys.75).



Rys.75. Zestawienie maksymalnych amplitud charakterystycznych pików (Ab, Ai) i przyczepności *pull-off, f_h*

Również współczynnik korelacji regresji wielorakiej R dla zmiennych objaśniających Ab i Ai jest niski i świadczy o braku zależności statystycznej: odpowiednio $R = 0,29$ dla *Grupy A* i $R = 0,19$ dla *Grupy B* (Tab.27 i Tab.28). Uzyskane wyniki wskazują, że amplituda Ab wnosi większy wkład w objaśnienie poziomu przyczepności niż amplituda Ai - w przypadku obu grup większy współczynnik regresji β występuje dla pików od dna Ab ,

a spodziewano się zlokalizowania informacji o jakości zespolenia raczej w obszarze częstotliwości odpowiadającej odbiciu fali od powierzchni rozdziału niż od dna. Na tej podstawie można stwierdzić, że maksymalne amplitudy charakterystycznych pików są parametrami, które są niewystarczające, aby można było na ich podstawie oszacować przyczepność warstwy naprawczej do podłoża betonowego. Wynika to z faktu, że sama wysokość charakterystycznych pików jest związana nie tylko z poziomem przyczepności, ale na jej wartość ma wpływ chropowatość oraz mikrozarzysowanie. Na przykład, w przypadku obróbki hydrodynamicznej, *HD*, w niektórych sygnałach zaobserwowano kilka wysokich pików w obszarze odpowiadającym powierzchni rozdziału. W widmie dla próbki poddanej groszkowaniu, *JH* z kolei maksymalny pik jest przesunięty w kierunku niższych częstotliwości (Rys.58).

Tab.27. Wyniki regresji wielorakiej dla zmiennej zależnej, f_h i zmiennych objaśniających: Ab i Ai (Grupa A)

Grupa A; zmienne zależna: f_h $R= 0,29$ $R^2= 0,08$ $p<0,68$ $BSE: 0,59$					
$n = 12$	β	$SD \beta$	B	$SD B$	p
<i>Ab</i>	-0,364	0,421	-2,067	2,396	0,411
<i>Ai</i>	0,152	0,421	3,873	10,710	0,726
W. wolny			2,210	0,448	0,001

Tab.28. Wyniki regresji wielorakiej dla zmiennej zależnej, f_h i zmiennych objaśniających: Ab i Ai (Grupa B)

Grupa B; zmienne zależna: f_h $R= 0,19$ $R^2= 0,04$ $p<0,84$ $BSE: 1,01$					
$n = 12$	β	$SD \beta$	B	$SD B$	p
<i>Ab</i>	-0,203	0,435	-0,621	1,326	0,651
<i>Ai</i>	0,017	0,435	0,402	10,086	0,969
W. wolny			1,606	0,812	0,079

Z tego powodu w następnym etapie analizy regresji uwzględniono wskaźnik chropowatości, *SRI* i stopień mikrozarzysowania, które to mogą mieć wpływ na propagację fali sprężystej. Po uwzględnieniu w modelu korelacji parametrów charakteryzujących podkład *SRI* i f_{hs} , których statystyczną istotność wykazano w rozdziale 5.5, współczynniki korelacji regresji wielorakiej wzrastają odpowiednio do: $R = 0,70$ - Grupa A, $R = 0,85$ - Grupa B (Tab.29 i Tab.30).

Tab.29. Wyniki regresji wielorakiej dla zmiennej zależnej, f_h i zmiennych objaśniających: Ab i Ai oraz SRI i f_{hs} (Grupa A)

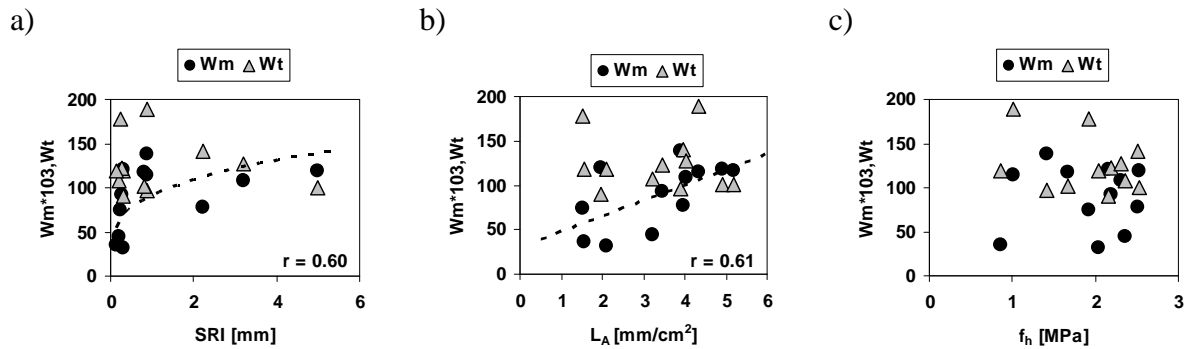
Grupa A; zmienna zależna: f_h					
$R= 0,70$ $R^2= 0,49$					
$p<0,26$ $BSE: 0,50$					
$n = 12$	β	$SD \beta$	B	$SD B$	p
SRI	0,765	0,337	0,283	0,125	0,057
f_{hs}	0,631	0,349	1,355	0,749	0,113
Ab	0,109	0,415	0,619	2,358	0,801
Ai	-0,101	0,389	-2,557	9,879	0,803
W. wolny			-3,495	2,987	0,280

Tab.30. Wyniki regresji wielorakiej dla zmiennej zależnej, f_h i zmiennych objaśniających: Ab i Ai oraz SRI i f_{hs} (Grupa B)

Grupa B; zmienna zależna: f_h					
$R= 0,85$ $R^2= 0,71$					
$p<0,44$ $BSE: 0,63$					
$n = 12$	β	$SD \beta$	B	$SD B$	p
f_{hs}	-0,830	0,244	-1,011	0,297	0,011
Ai	0,289	0,277	6,716	6,432	0,331
Ab	-0,246	0,284	-0,752	0,865	0,414
SRI	0,053	0,264	0,276	1,383	0,847
W. wolny			4,920	1,754	0,026

6.2. Parametry amplitudowe rozkładu amplitudy widm częstotliwości

Parametry amplitudowe określano dla rozkładu amplitud 10 widm *impact-echo* uzyskanych dla próbek Grupy A (por. rozdział 0). Nie stwierdzono istnienia statystycznie istotnej zależności między parametrami statystycznymi rozkładu, a przyczepnością przez odrywanie (Rys.76a). Zaobserwowano pewne trendy w relacji między tymi parametrami, a charakterystyką jakości podkładu betonowego. Zarówno stopień mikrozarzysowania w warstwie przypowierzchniowej, jak i chropowatość wpływają na wzrost minimalnej amplitudy widma częstotliwości *impact-echo* (parametr Wm), co można tłumaczyć jako wzrost poziomu szumu w sygnale (Rys.76b,c). W przypadku Wt , jak i innych parametrów rozkładu amplitudy 3D nie stwierdzono statystycznej zależności.

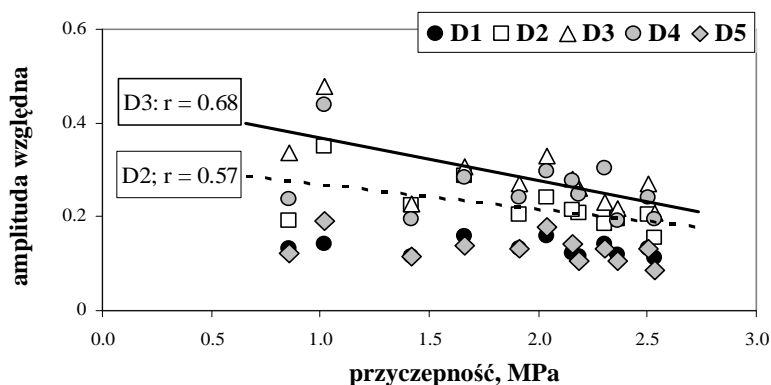


Rys.76. Związek między minimalną (Wm) i maksymalną (Wt) wysokością amplitudy rozkładu 3D spektrum częstotliwości oraz wskaźnikiem chropowatości powierzchni, *SRI* (a) i skumulowaną długością rys, L_A (b) oraz przyczepnością *pull-off*, f_h (c) [81]

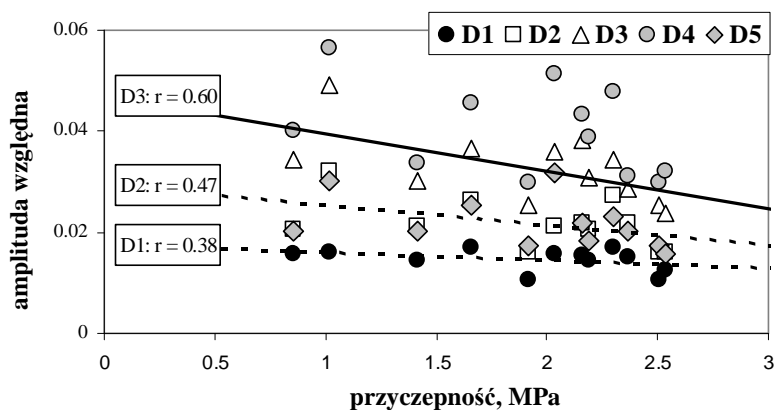
6.3. Parametry rozkładu współczynników falkowych detali

Badania wstępne przeprowadzone zostały na wybranych sygnałach próbek *Grupy A* przy zastosowaniu falki db4. Analiza statystyczna wyników *DWT* wskazuje, że najbardziej statystycznie istotną zależność uzyskano dla relacji między przyczepnością a zakresem wartości, *RG* (Rys.77a) oraz odchyleniem standardowym, *SD* (Rys.77b) detali *D2* i *D3* ($r > 0.50$). Tego rodzaju zależności dla pozostałych detali oraz aproksymacji były mniej istotne. Wartość średnia oraz bezwzględne odchylenie standardowe nie różnicowały układów o różnej jakości zespolenia – zależności między tymi parametrami a przyczepnością nie były statystycznie istotne. Wyniki te potwierdzają, że do charakteryzowania jakości zespolenia badanego układu naprawczego najbardziej przydatny jest zakres średniej częstotliwości sygnału detali *D2* i *D3* (por. Tab.26). Ogólną tendencją obserwowaną przy badaniu układów o zróżnicowanej jakości zespolenia jest spadek wartości parametrów opisujących rozkład detali sygnału ze wzrostem przyczepności, co jest zgodne z założeniem, że w przypadku układu naprawczego poziomy i zmienność amplitudy sygnału odpowiadająca częstotliwościom dla powierzchni rozdziału maleje ze wzrostem jakości zespolenia.

a)

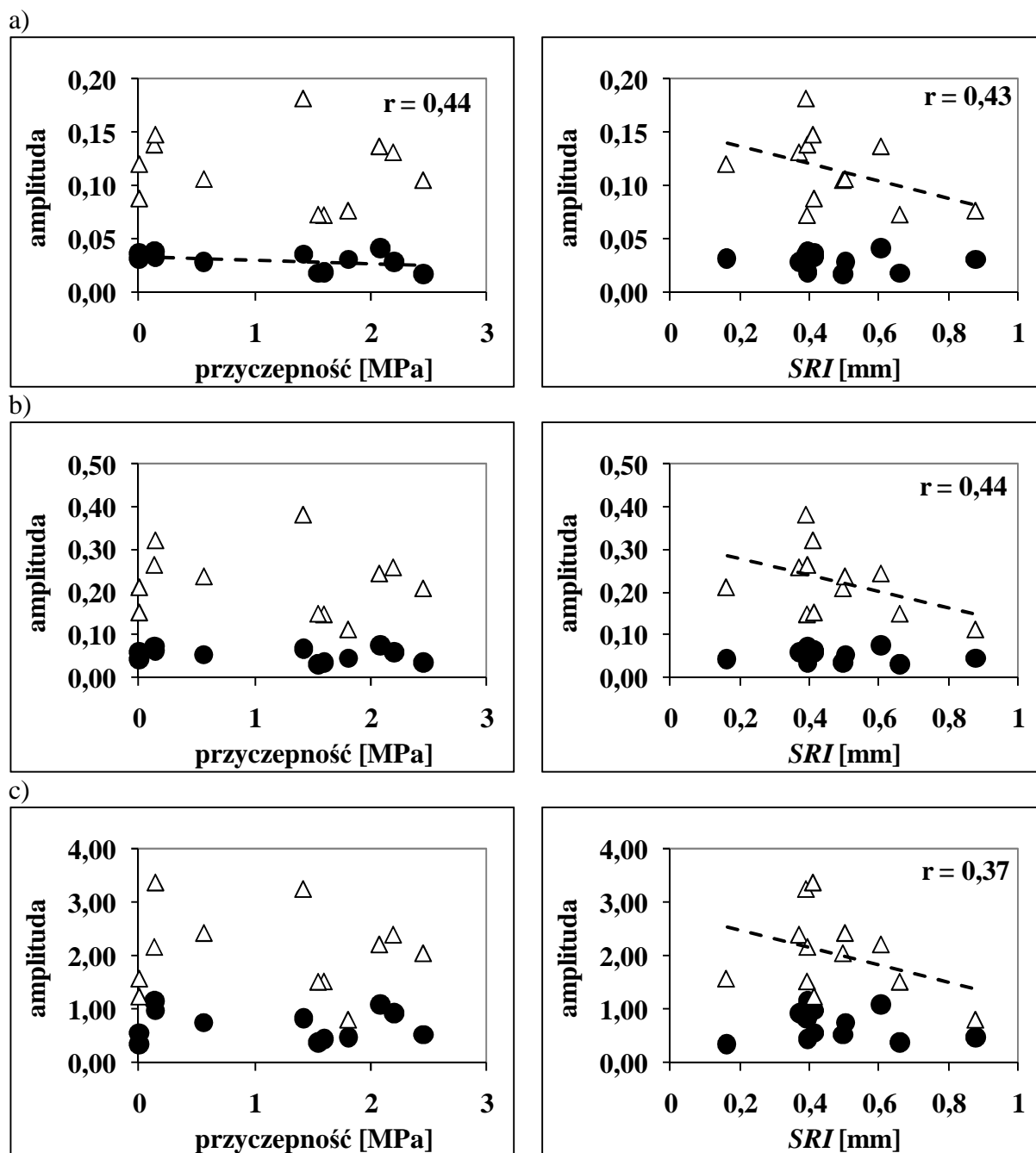


b)



Rys.77. Zależność między przyczepnością a parametrami statystycznymi rozkładu współczynników falkowych DWT detali $D1-D5$ dla próbek Grupy A: RG (a), SD (b) [53]

W przypadku próbek Grupy B (Rys.78) powyższe zależności uzyskane w badaniach wstępnych przeprowadzonych na wybranych sygnałach były mniej istotne. Jedynie w przypadku bezwzględnego odchylenia standardowego MAD dla D2 zaobserwowano trend spadku wartości tego parametru z przyczepnością ($r = 0,44$). Zależności dla pozostałych parametrów nie były statystycznie istotne. Zaobserwowano również, że wartości parametrów statystycznych detalu D3 wykazują trend spadkowy ze wzrostem szorstkości.



Rys.78. Zależność między przyczepnością (lewa) i *SRI* (prawa) a parametrami statystycznymi rozkładu współczynników falkowych *DWT* detali *D2* (●) i *D3* (Δ) dla wybranych próbek *Grupy B*: *MAD* (a), *SD* (b), *RG* (c)

Podobnie jak w przypadku maksymalnych amplitud charakterystycznych pików w widmie częstotliwości przeprowadzono analizę regresji wielorakiej między parametrami *MAD*, *SD* i *RG* dla detali *D2* i *D3*, a przyczepnością warstwy naprawczej do podłoża betonowego. Otrzymane współczynniki korelacji regresji wielorakiej dla tych parametrów są wyższe niż dla amplitudy pików, odpowiednio: $R = 0,68$ wobec $R = 0,29$ dla *Grupy A* (Tab.31) i $R = 0,85$ wobec $R = 0,19$ dla *Grupy B* (Tab.32). Wynika z tego, że parametry rozkładu poszczególnych

detali są lepszym parametrem opisującym propagację fali sprężystej niż maksymalne wysokości charakterystycznych pików.

Tab.31. Wyniki regresji wielorakiej dla zmiennej zależnej, f_h i zmiennych objaśniających: parametrów rozkładu amplitudy MAD , SD i RG dla detali $D2$ i $D3$ (Grupa A)

Grupa A; zmienna zależna: f_h $R= 0,68$ $R^2= 0,47$ $p<0,65$ $BSE: 0,61$					
$n = 12$	β	$SD \beta$	B	$SD B$	p
D3_SD	6,708	7,216	166,324	178,920	0,395
D3_MAD	-4,945	5,779	-177,868	207,868	0,431
D2_RG	-1,723	1,923	-11,953	13,342	0,411
D3_RG	-1,058	2,223	-4,035	8,480	0,654
D2_SD	0,901	5,903	47,112	308,721	0,885
D2_MAD	-0,365	4,713	-26,675	344,609	0,941
W. wolny			2,421	2,140	0,309

Tab.32. Wyniki regresji wielorakiej dla zmiennej zależnej, f_h i zmiennych objaśniających: parametrów rozkładu amplitudy MAD , SD i RG dla detali $D2$ i $D3$ (Grupa B)

Grupa B; zmienna zależna: f_h $R= 0,85$ $R^2= 0,72$ $p<0,21$ $BSE: 0,73$					
$n = 12$	β	$SD \beta$	B	$SD B$	p
D3_MAD	-6,456	4,062	-210,080	132,193	0,173
D3_SD	6,169	6,821	128,390	141,951	0,407
D2_RG	0,775	0,980	4,457	5,635	0,465
D3_RG	-0,506	2,605	-1,423	7,330	0,854
D2_MAD	-0,135	2,710	-11,828	237,847	0,962
D2_SD	0,097	3,824	5,073	200,336	0,981
W. wolny			1,562	1,002	0,180

Po uwzględnieniu w modelu korelacji parametrów charakteryzujących podkład SRI i f_{hs} , których istotność wykazano w rozdziale 5.5, współczynniki korelacji regresji wielorakiej wzrastają odpowiednio do: $R = 0,88$ - Grupa A, $R = 0,87$ - Grupa B przy standardowym błędzie estymacji $BSE: 0,50$ i $0,88$ MPa (Tab.33-34).

Tab.33. Wyniki regresji wielorakiej dla zmiennej zależnej, f_h i zmiennych objaśniających: parametrów rozkładu amplitudy MAD , SD i RG dla detali $D2$ i $D3$ oraz SRI i f_{hs} (Grupa A)

Grupa A; zmienna zależna: f_h					
$R= 0,88$ $R^2= 0,78$					
$p<0,45$ $BSE: 0,50$					
$n = 12$	β	$SD \beta$	B	$SD B$	p
SRI	0,812	0,451	0,301	0,167	0,169
f_{hs}	0,771	0,466	1,655	1,002	0,197
$D2_RG$	-1,886	2,007	-13,084	13,926	0,417
$D3_RG$	-1,101	2,030	-4,202	7,745	0,625
$D2_MAD$	-2,279	4,616	-166,629	337,513	0,655
$D3_SD$	3,215	7,054	79,718	174,910	0,680
$D2_SD$	2,883	6,488	150,770	339,283	0,687
$D3_MAD$	-0,907	5,482	-32,641	197,198	0,879
W. wolny			-5,930	4,437	0,274

Tab.34. Wyniki regresji wielorakiej dla zmiennej zależnej, f_h i zmiennych objaśniających: parametrów rozkładu amplitudy MAD , SD i RG dla detali $D2$ i $D3$ oraz SRI i f_{hs} (Grupa B)

Grupa B; zmienna zależna: f_h					
$R= 0,87$ $R^2= 0,76$					
$p<0,49$ $BSE: 0,88$					
$n = 12$	β	$SD \beta$	B	$SD B$	p
$D3_MAD$	-5,793	5,637	-188,503	183,444	0,380
$D3_SD$	6,708	8,262	139,596	171,939	0,476
$D2_RG$	0,955	1,398	5,491	8,040	0,544
SRI	0,212	0,465	1,111	2,431	0,679
$D2_MAD$	1,458	4,041	127,985	354,644	0,742
$D3_RG$	-1,342	3,777	-3,777	10,626	0,746
$D2_SD$	-1,924	5,686	-100,802	297,913	0,757
f_{hs}	-0,259	1,075	-0,316	1,311	0,825
W. wolny			1,560	5,283	0,787

6.4. Energia detali

Podobnie jak w przypadku pozostałych parametrów otrzymanych z analizy wyników badań *impact-echo* przeprowadzono analizę regresji wielorakiej między wartościami energii poszczególnych detali $D2_EN$ i $D3_EN$ (szczegółowe wyniki zawiera Załącznik IX), a przyczepnością warstwy naprawczej do podłoża betonowego (Tab.35-36). Współczynniki korelacji regresji wielorakiej wynoszą odpowiednio: $R = 0,50$ dla Grupy A ($BSE = 0,54$ MPa) i $R = 0,68$ dla Grupy B ($BSE = 0,76$ MPa).

Tab.35. Wyniki regresji wielorakiej dla zmiennej zależnej, f_h i zmiennych objaśniających: energia dla detali D2 i D3 (*Grupa A*)

Grupa A; zmienna zależna: f_h $R= 0,50$ $R^2= 0,25$ $p<0,28$ BSE: 0,54					
$n = 12$	β	SD β	B	SD B	p
D2_EN	-0,474	0,410	-0,182	0,158	0,277
D3_EN	-0,034	0,410	-0,007	0,089	0,935
W. wolny			3,895	1,177	0,009

Tab.36. Wyniki regresji wielorakiej dla zmiennej zależnej, f_h i zmiennych objaśniających: energia dla detali D2 i D3 (*Grupa B*)

Grupa B; zmienna zależna: f_h $R= 0,68$ $R^2= 0,46$ $p<0,07$ BSE: 0,76					
$n = 12$	β	SD β	B	SD B	p
D2_EN	1,155	0,607	0,472	0,248	0,089
D3_EN	-0,570	0,607	-0,083	0,088	0,372
W. wolny			-0,707	0,748	0,370

Podobną analizę przeprowadzono także dla sumy energii detali D2 i D3 - D23_EN (Tab.37-38). Zastąpienie wartości energii poszczególnych parametrów ich sumą spowodowało obniżenie współczynnika korelacji wielorakiej na $R = 0,45$ - *Grupa A* (BSE = 0,53 MPa) i $R = 0,53$ - *Grupa B* (BSE = 0,83 MPa).

Tab.37. Wyniki regresji wielorakiej dla zmiennej zależnej, f_h i zmiennej objaśniającej: suma energii dla detali D2 i D3 (*Grupa A*)

Grupa A; zmienna zależna: f_h $R= 0,45$ $R^2= 0,20$ $p<0,15$ BSE: 0,53					
$n = 12$	β	SD β	B	SD B	p
D23_EN	-0,448	0,283	-0,067	0,042	0,145
W. wolny			3,653	1,110	0,008

Tab.38. Wyniki regresji wielorakiej dla zmiennej zależnej, f_h i zmiennej objaśniającej: suma energii dla detali D2 i D3 (*Grupa B*)

Grupa B; zmienna zależna: f_h $R= 0,53$ $R^2= 0,28$ $p<0,07$ BSE: 0,83					
$n = 12$	β	SD β	B	SD B	p
D23_EN	0,533	0,268	0,058	0,029	0,074
W. wolny			-0,296	0,769	0,708

Podobnie jak w przypadku pozostałych parametrów otrzymanych z analizy wyników badań *impact-echo*, po uwzględnieniu w modelu korelacji parametrów charakteryzujących podkład *SRI* i f_{hs} , których istotność wykazano w rozdziale 5.5, współczynniki korelacji regresji wielorakiej znacznie wzrastają odpowiednio do: $R = 0,77$ - *Grupa A*, $R = 0,83$ - *Grupa B*, przy błędzie standardowym estymacji, *BSE*: 0,45 i 0,65 MPa dla wartości energii poszczególnych detali (Tab.39 i Tab.40) oraz do: $R = 0,70$ - *Grupa A* i $R = 0,83$ - *Grupa B* przy *BSE*: 0,47 i 0,61 MPa dla sumy energii (Tab.41 i Tab.42).

Tab.39. Wyniki regresji wielorakiej dla zmiennej zależnej, f_h i zmiennych objaśniających: energia dla detali *D2* i *D3* oraz *SRI* i f_{hs} (*Grupa A*)

		<i>Grupa A</i> ; zmienna zależna: f_h				
		$R= 0,77$ $R^2= 0,59$ $p<0,14$ <i>BSE</i> : 0,45				
$n = 12$		β	<i>SD</i> β	B	<i>SD</i> B	ρ
f_{hs}		0,734	0,345	1,576	0,741	0,071
<i>SRI</i>		0,667	0,327	0,247	0,121	0,081
<i>D2_EN</i>		-0,516	0,398	-0,199	0,153	0,236
<i>D3_EN</i>		0,436	0,426	0,095	0,093	0,340
W. wolny				-3,712	3,462	0,319

Tab.40. Wyniki regresji wielorakiej dla zmiennej zależnej, f_h i zmiennych objaśniających: energia dla detali *D2* i *D3* oraz *SRI* i f_{hs} (*Grupa B*)

		<i>Grupa B</i> ; zmienna zależna: f_h				
		$R= 0,83$ $R^2= 0,69$ $p<0,06$ <i>BSE</i> : 0,65				
$n = 12$		β	<i>SD</i> β	B	<i>SD</i> B	ρ
f_{hs}		-0,639	0,379	-0,779	0,462	0,136
<i>SRI</i>		0,120	0,257	0,628	1,345	0,654
<i>D3_EN</i>		0,101	0,603	0,015	0,088	0,872
<i>D2_EN</i>		0,101	0,725	0,041	0,296	0,893
W. wolny				3,155	2,796	0,296

Tab.41. Wyniki regresji wielorakiej dla zmiennej zależnej, f_h i zmiennych objaśniających: suma energii dla detali *D2* i *D3* oraz *SRI* i f_{hs} (*Grupa A*)

		<i>Grupa A</i> ; zmienna zależna: f_h				
		$R= 0,70$ $R^2= 0,49$ $p<0,13$ <i>BSE</i> : 0,47				
$n = 12$		β	<i>SD</i> β	B	<i>SD</i> B	ρ
<i>SRI</i>		0,695	0,340	0,257	0,126	0,075
f_{hs}		0,550	0,327	1,181	0,701	0,131
<i>D23_EN</i>		-0,066	0,311	-0,010	0,046	0,838
W. wolny				-2,530	3,473	0,487

Tab.42. Wyniki regresji wielorakiej dla zmiennej zależnej, f_h i zmiennych objaśniających: suma energii dla detali *D2* i *D3* oraz *SRI* i f_{hs} (*Grupa B*)

Grupa B; zmienna zależna: f_h $R= 0,83$ $R^2= 0,69$ $p<0,02$ BSE: 0,61					
$n = 12$	β	$SD \beta$	B	$SD B$	p
f_{hs}	-0,656	0,275	-0,799	0,335	0,044
D23_EN	0,188	0,235	0,021	0,026	0,447
SRI	0,117	0,238	0,614	1,244	0,635
W. wolny			3,280	2,031	0,145

6.5. Szacowanie przyczepności w układach naprawczych

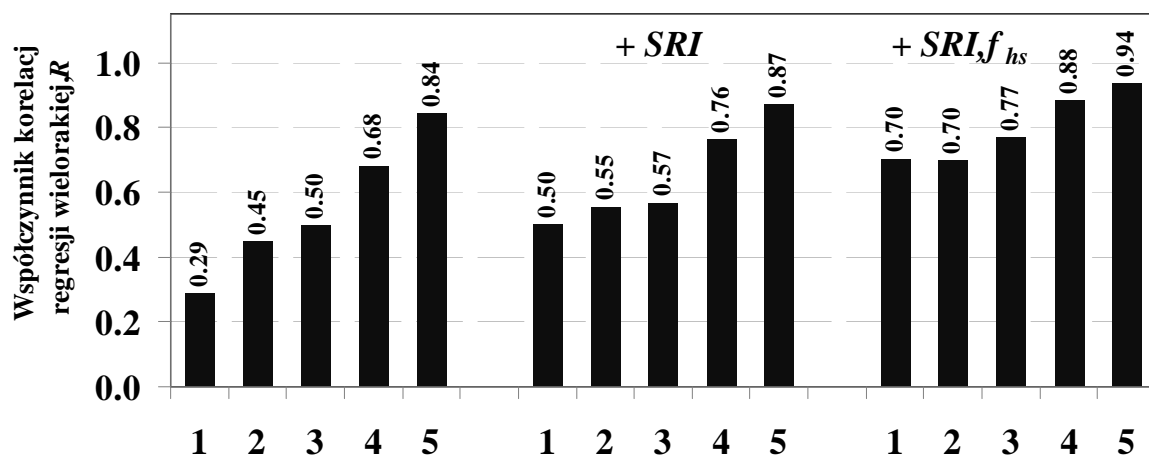
Szacowanie przyczepności w układach naprawczych przeprowadzono metodą regresji wielorakiej. Do budowy modelu regresji wykorzystano parametry sygnału *impact-echo* analizowane w rozdziałach 6.1 do 6.4, które pogrupowano w następujące zbiory zmiennych objaśniających:

- 1 – maksymalne wysokości charakterystycznych pików Ab i Ai ;
- 2 – suma energii detalu $D2$ i $D3$: $D23_EN$;
- 3 – energia poszczególnych detali $D2$ i $D3$: $D2_EN$ i $D3_EN$;
- 4 – parametry rozkładu amplitudy detali $D2$ i $D3$ w tym MAD , SD i RG ;
- 5 – energia poszczególnych detali $D2$ i $D3$ i parametry rozkładu amplitudy detali $D2$ i $D3$.

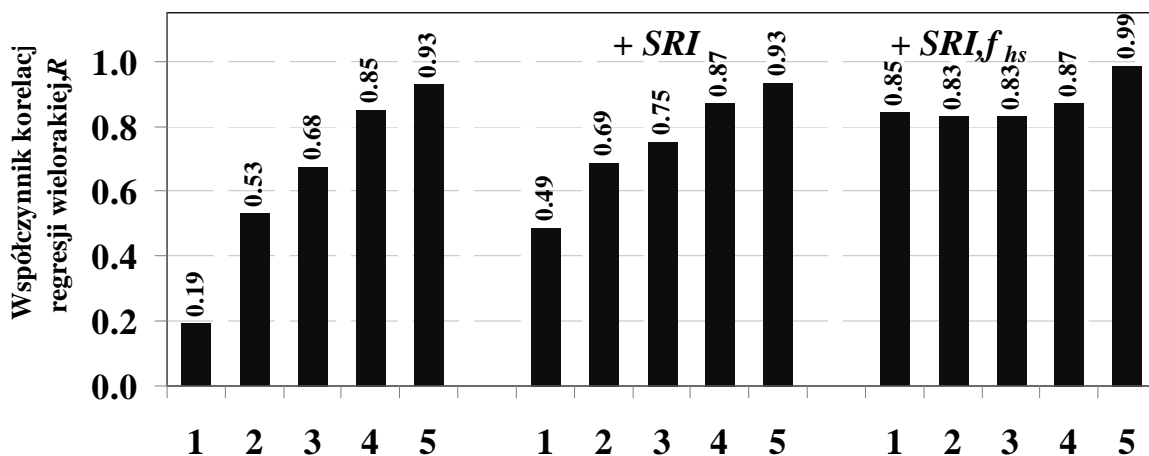
Na podstawie wartości obliczonych współczynników korelacji wielorakiej (Rys.79) można stwierdzić, że:

- a) jeżeli w szacowaniu przyczepności uwzględniać jedynie parametry z analizy sygnału *impact-echo* to ich przydatność można uszeregować wg rosnącej statystycznej istotności w następującej kolejności: wysokość amplitudy charakterystycznych pików (Ai, Ab), parametry statystyczne rozkładu amplitudy detali odpowiadających powierzchni rozdziału (MAD, SD, RG) i energia poszczególnych detali odpowiadających powierzchni rozdziału (EN);
- b) uwzględnienie w analizie sygnału *impact-echo* jakości podłoża betonowego scharakteryzowanej parametrami: SRI czy f_{hs} pozwala na dokładniejszą ocenę jakości zespolenia układu naprawczego i oszacowanie przyczepności warstwy naprawczej do podłoża betonowego; potwierdza to wzrost współczynników korelacji regresji wielorakiej po ich uwzględnieniu (dla zmiennych objaśniających ze zbioru 3: $R = 0,52 \rightarrow 0,63 \rightarrow 0,72$ oraz ze zbioru 4: $R = 0,67 \rightarrow 0,71 \rightarrow 0,75$). W przypadku uwzględnienia wszystkich zmiennych objaśniających (zbiór 5) wzrost ten jest mniej wyraźny ($R = 0,82 \rightarrow 0,84 \rightarrow 0,84$);

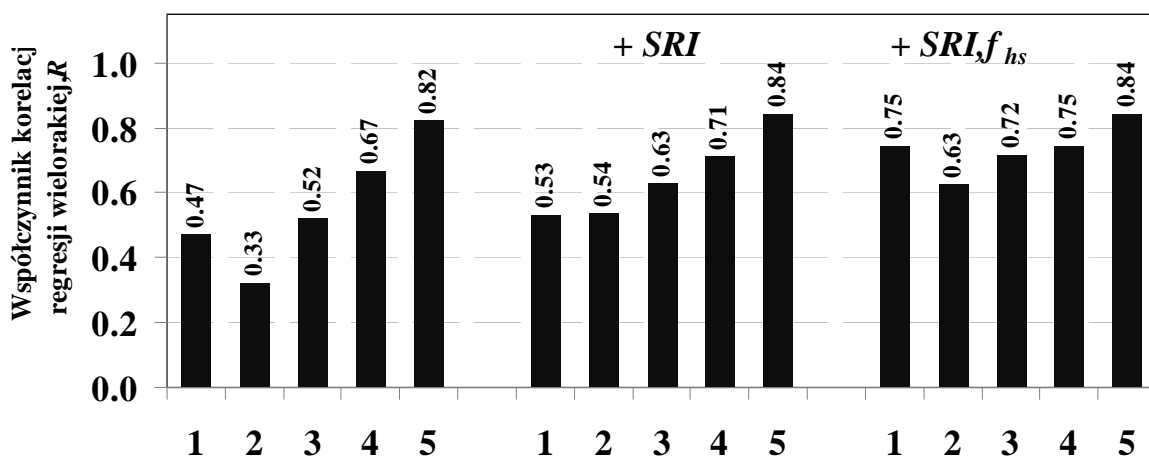
a) Grupa A



b) Grupa B



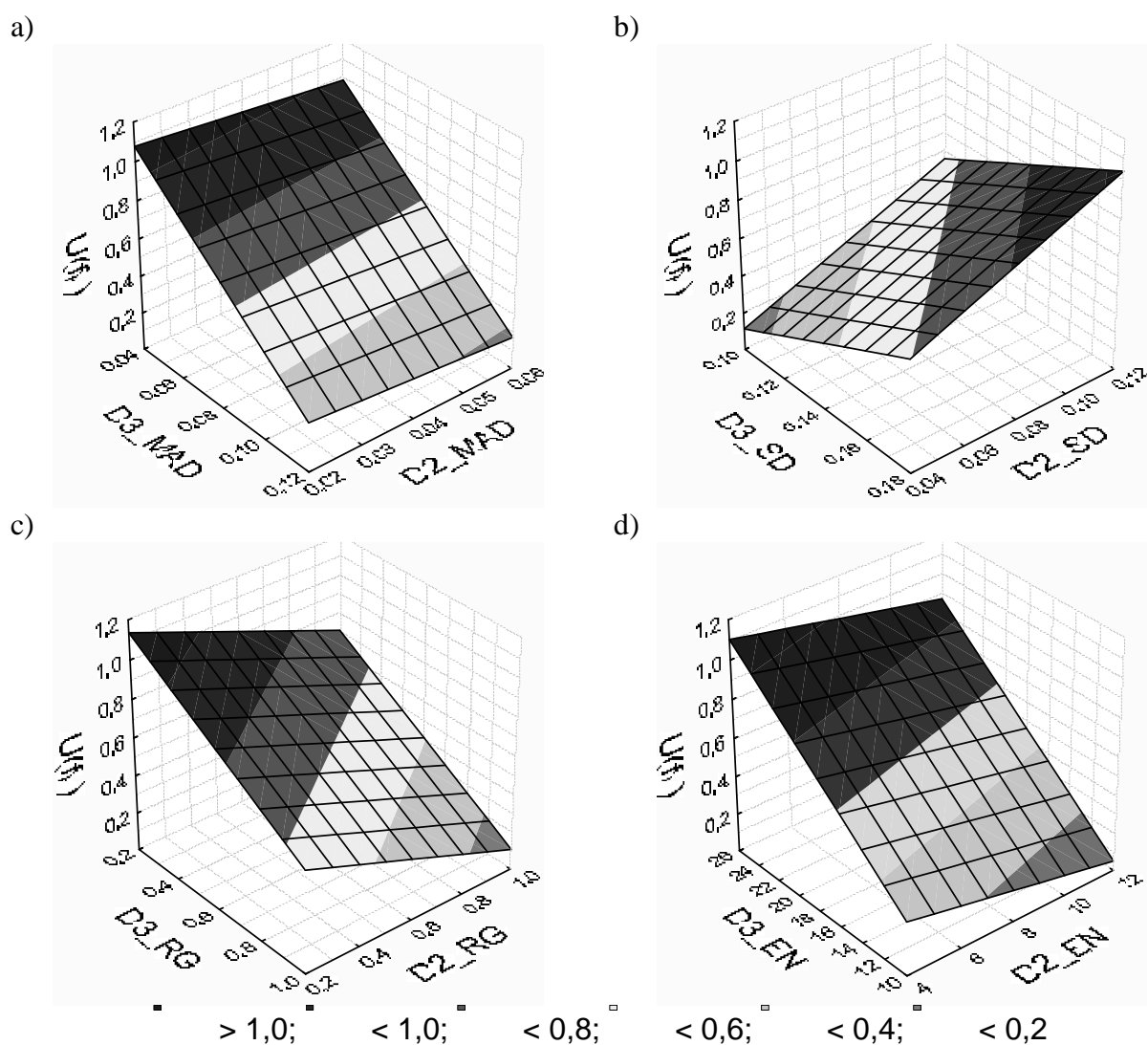
c) Grupa A i B (łącznie)



Specyfikacja zbiorów parametrów					
Oznaczenie zbioru	1	2	3	4	5
Parametry	Ai+Ab	D23 EN	D2 i D3: EN	D2 i D3: MAD,SD,RG	D2 i D3: MAD,SD,RG,EN

Rys.79. Współczynniki korelacji regresji wielorakiej, R dla zbiorów parametrów opisujących propagację fali sprężystej w metodzie *impact-echo* jako zmiennych objaśniających zmienną zależną f_h

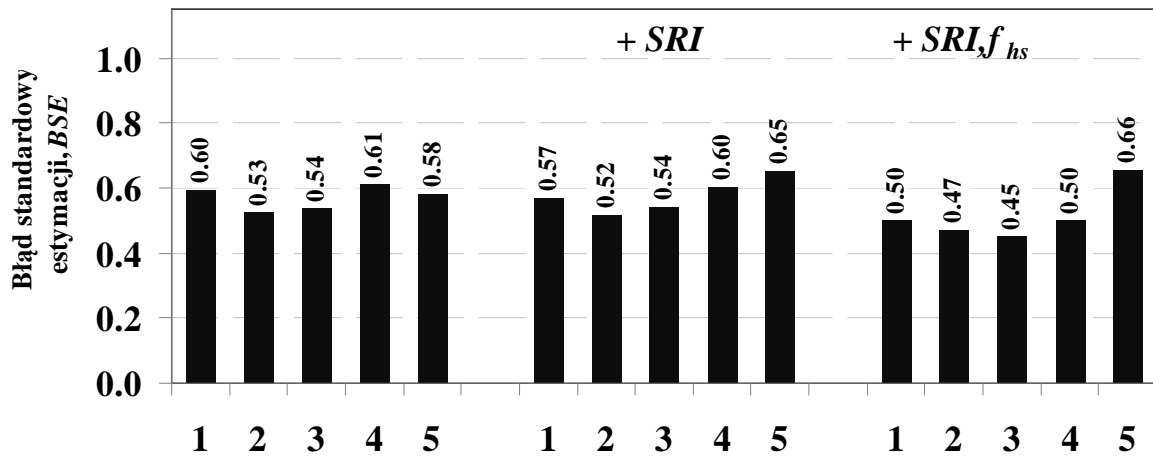
Prezentacja graficzna 3D modelu regresji wielorakiej dla 5 zbioru zmiennych objaśniających (bez f_{hs} i SRI) w postaci wykresów użyteczności, $U(f_h)$ wskazuje na odmienny wpływ odchylenia standardowego, SD w stosunku do pozostałych parametrów amplitudowych opisujących propagację fali sprężystej w metodzie *impact-echo* – MAD, RG (Rys.80). Wpływ energii, EN jest zmienny, tzn. ze wzrostem energii detalu D2 użyteczność maleje, a ze wzrostem energii D3 – rośnie.



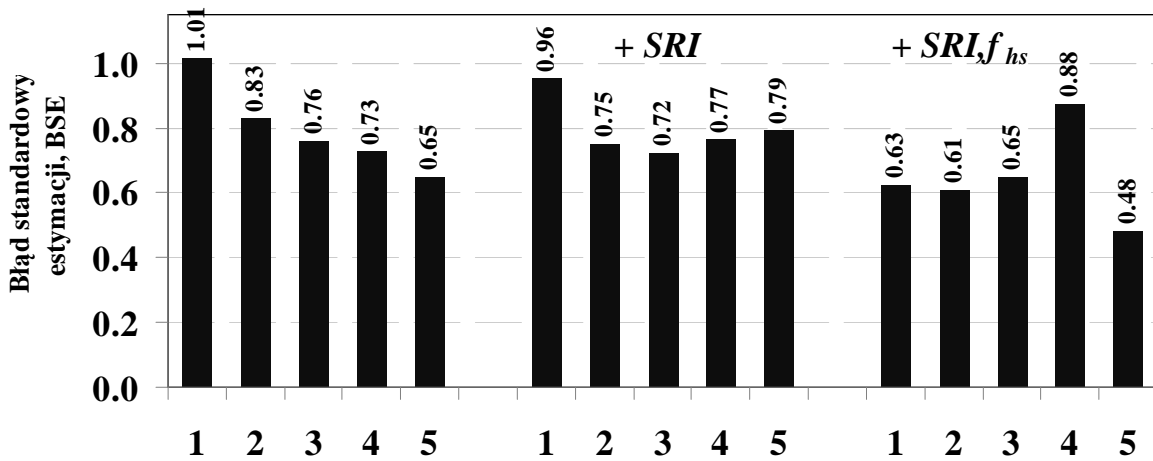
Rys.80. Wybrane powierzchnie użyteczności $U(f_h)$ modelu regresji wielorakiej dla 5 zbioru zmiennych objaśniających Grupa A i B (łącznie)

Błąd standardowy estymacji wynosił $BSE = 0,45 \div 0,66$ MPa dla Grupy A, $BSE = 0,48 \div 1,01$ MPa dla Grupy B i $BSE = 0,58 \div 0,82$ MPa dla obu grup łącznie (Rys.81). Wartości te można rozumieć jako dokładność szacowania przyczepności na podstawie analizy sygnału *impact-echo*. Z uwagi na najwyższe współczynniki korelacji regresji wielorakiej, R a także niskie wartości oraz stosunkowo małą zmienność BSE , do dalszej analizy wybrano parametry tworzące zbiory 3, 4 i 5.

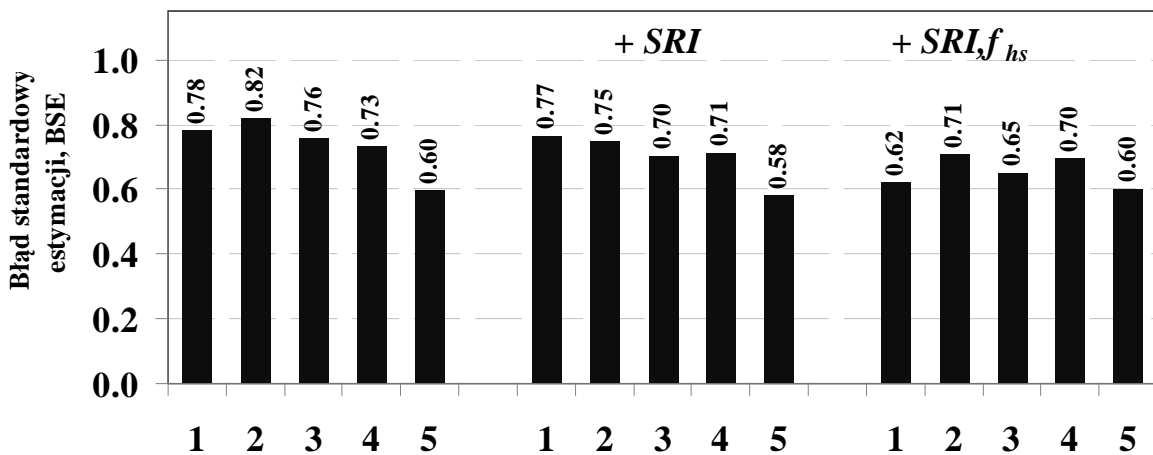
a) Grupa A



b) Grupa B



c) Grupa A i B (łącznie)



Specyfikacja zbiorów parametrów					
Oznaczenie zbioru	1	2	3	4	5
Parametry	Ai+Ab	D23 EN	D2 i D3: EN	D2 i D3: MAD,SD,RG	D2 i D3: MAD,SD,RG,EN

Rys.81. Błąd standardowy estymacji regresji wielorakiej, BSE dla zbiorów parametrów opisujących propagację fali sprężystej w metodzie *impact-echo* jako zmiennych objaśniających zmienną zależną f_h

W wyniku analizy korelacji wielorakiej wyznaczono równania regresji służące do oszacowania wartości przyczepności, $f_{h,IE}$ na podstawie wybranych zbiorów parametrów (por. Rys.79,81) opisujących propagację fali sprężystej w metodzie *impact-echo* (Tab.43).

Tab.43. Równania regresji wielorakiej do szacowania przyczepności, $f_{h,IE}$ na podstawie wybranych zbiorów parametrów opisujących propagację fali sprężystej w metodzie *impact-echo* (por. Rys.79 i 81)

zbiór parametrów		równanie	
Grupa A	3	$f_{h,IE} = -3,71 + 1,58 \cdot f_{hs} + 0,25 \cdot SRI +$ $- 0,20 \cdot D2_EN + 0,10 \cdot D3_EN$	(40)
	4	$f_{h,IE} = -5,93 + 1,66 \cdot f_{hs} + 0,30 \cdot SRI +$ $- 166,63 \cdot D2_MAD + 150,77 \cdot D2_SD - 13,08 \cdot D2_RG +$ $- 32,64 \cdot D3_MAD + 79,72 \cdot D3_SD - 4,20 \cdot D3_RG$	(41)
	5	$f_{h,IE} = -75,59 + 8,58 \cdot f_{hs} + 1,09 \cdot SRI +$ $- 3945,09 \cdot D2_MAD + 6507,64 \cdot D2_SD - 74,11 \cdot D2_RG +$ $+ 475,77 \cdot D3_MAD - 2481,80 \cdot D3_SD - 28,67 \cdot D3_RG +$ $- 9,53 \cdot D2_EN + 8,84 \cdot D3_EN$	(42)
Grupa B	3	$f_{h,IE} = 3,16 - 0,78 \cdot f_{hs} + 0,63 \cdot SRI +$ $- 0,04 \cdot D2_EN + 0,02 \cdot D3_EN$	(43)
	4	$f_{h,IE} = 1,56 - 0,32 \cdot f_{hs} + 1,11 \cdot SRI +$ $+ 127,99 \cdot D2_MAD - 100,80 \cdot D2_SD + 5,49 \cdot D2_RG +$ $- 188,50 \cdot D3_MAD + 139,60 \cdot D3_SD - 3,78 \cdot D3_RG$	(44)
	5	$f_{h,IE} = 3,41 - 1,96 \cdot f_{hs} - 2,86 \cdot SRI +$ $+ 590,69 \cdot D2_MAD + -190,56 \cdot D2_SD - 16,76 \cdot D2_RG +$ $- 122,61 \cdot D3_MAD + 216,93 \cdot D3_SD - 26,25 \cdot D3_RG +$ $- 0,01 \cdot D2_EN + 0,53 \cdot D3_EN$	(45)
Grupa A i B (łącznie)	3	$f_{h,IE} = 2,74 - 0,59 \cdot f_{hs} + 0,21 \cdot SRI +$ $- 0,15 \cdot D2_EN - 0,03 \cdot D3_EN$	(46)
	4	$f_{h,IE} = 3,50 - 0,51 \cdot f_{hs} + 0,17 \cdot SRI +$ $+ 11,88 \cdot D2_MAD + 47,48 \cdot D2_SD - 0,62 \cdot D2_RG +$ $- 95,39 \cdot D3_MAD + 31,99 \cdot D3_SD + 0,84 \cdot D3_RG$	(47)
	5	$f_{h,IE} = -0,32 + 0,12 \cdot f_{hs} + 0,17 \cdot SRI +$ $- 25,88 \cdot D2_MAD + 129,30 \cdot D2_SD - 2,90 \cdot D2_RG +$ $- 180,11 \cdot D3_MAD + 88,83 \cdot D3_SD - 3,61 \cdot D3_RG +$ $- 0,18 \cdot D2_EN + 0,23 \cdot D3_EN$	(48)
	$f_{h,IE}$	- przewidywana przyczepność przy odrywaniu [MPa]	
	f_{hs}	- przypowierzchniowa wytrzymałość na rozciąganie podłoża betonowego [MPa]	
	SRI	- wskaźnik chropowatości powierzchni [mm]	
	$D2_MAD, D3_MAD$	- średnie odchylenie bezwzględne detali $D2$ i $D3$	
	$D2_SD, D3_SD$	- odchylenie standardowe detali $D2$ i $D3$	
	$D2_RG, D3_RG$	- zakres amplitudy detali $D2$ i $D3$	
	$D2_EN, D3_EN$	- energia detali $D2$ i $D3$	

Na podstawie wyznaczonych równań regresji wielorakiej (40)-(48) (Tab.43) oszacowano wartość przyczepności, $f_{h,IE}$. Zależność między wartością przyczepności wyznaczoną eksperymentalnie, f_h , a wartością oszacowaną na podstawie badań *impact-echo*, $f_{h,IE}$, opisuje linia prosta $f_h = f_{h,IE}$ o współczynnikach korelacji zależnych od zbioru zmiennych objaśniających (Rys.82-84).

Następnym krokiem było oszacowanie przyczepności minimalnej. Założono, że można do tego wykorzystać metody szacowania wytrzymałości betonu na ściskanie na podstawie badań nieniszczących np. metodą sklerometryczną lub ultradźwiękową [88]. Wytrzymałość minimalna była w tego rodzaju badaniach szacowana na podstawie równania:

$$R_{min} = \bar{R} - t_{min} \cdot SD, \quad (49)$$

gdzie: R_{min} - wytrzymałość minimalna, \bar{R} - wytrzymałość średnia, t_{min} - współczynnik rozkładu t-Studenta, SD - odchylenie standardowe,

Dla dostatecznie dużej liczby próbek ($n \geq 15$) użytych do sporządzenia krzywej regresji przyjmowano rozkład normalny i obliczano wartość minimalną, jako kwantyl tego rozkładu rzędu $p = 5\%$ wg równania [11]:

$$f_k = f_m - 1,64 \cdot SD, \quad (50)$$

gdzie: f_k - charakterystyczna wytrzymałość materiałów, f_m - estymator wytrzymałości średniej, SD - odchylenie standardowe.

Podobne podejście zastosowano w ocenie wytrzymałości betonu na podstawie badań n próbek przy opracowaniu tzw. kryteriów zgodności otrzymanych wyników z wymaganiami, przedstawianych w postaci nierówności [9]:

$$f_k \geq f_m - k_n \cdot SD, \quad (51)$$

gdzie: f_k, f_m, SD - jak w równaniu (50), k_n - współczynnik statystyczny.

Współczynnik statystyczny, k_n określano przy wykorzystaniu rachunku prawdopodobieństwa i statystyki matematycznej. Spośród metod wyznaczania tego współczynnika, przedstawionych w ISO 12491, w dokumentach normowych dotyczących betonu (m.in. PN-EN 206-1) odstąpiono od typowego wnioskowania statystycznego. Wartość współczynnika k_n wyznaczono w oparciu o funkcje (krzywe) operacyjno-charakterystyczne - OC (Tab.44).

Tab.44. Wartość współczynnika k_n wg krzywych operacyjno-charakterystycznych wg [104]

liczba wyników, n	Współczynnik, k_n
9	1,67
10	1,62
11	1,58
12	1,55
13	1,52
14	1,50
≥ 15	1,48

Metoda krzywych OC została również wykorzystana w PN-EN 13791, w której przedstawiono wytyczne do określania zależności pomiędzy wynikami badań, uzyskiwanymi za pomocą metod pośrednich (metoda sklerometryczna, ultradźwiękowa, określanie siły wrywającej) a wytrzymałością betonu w konstrukcji oznaczaną na odwiertach rdzeniowych. Opisana w normie procedura określa wartość przesunięcia podstawowej krzywej regresji wg równania:

$$\Delta f_h = \bar{\mathcal{F}}_{m(n)} - 1,48 \cdot SD, \quad (52)$$

gdzie: $\bar{\mathcal{F}}_{m(n)}$ - wartość średnia oraz SD – odchylenie standardowe odległości punktów na wykresie od podstawowej linii regresji dla n par wyników; $\mathcal{F}_i = \mathcal{F}_{h(i)} - \mathcal{F}_{h,IE(i)}; i = 1 \dots n$

Należy zwrócić uwagę, że współczynnik $k_n = 1,48$ przyjęty wg metody OC dla $n \geq 15$ zapewnia poziom ufności $\gamma = 0,30$ [10]. W klasycznym wnioskowaniu statystycznym wymaga się zazwyczaj estymacji kwantyla rozkładu rzędu $p = 0,05$ przy dopuszczalnym poziomie ufności $\gamma \geq 0,50$, kiedy to współczynnik k_n przyjmuje wartość 1,68.

W analizowanym w pracy zagadnieniu szacowania przyczepności na podstawie wyników badań *impact-echo* wykorzystanie krzywych OC w miejsce wnioskowania statystycznego zwiększa ryzyko, że rzeczywista wartość przyczepności, f_h , będzie mniejsza niż wartość oszacowana, $f_{h,IE}$.

Na rysunkach 82-84 przedstawiono oszacowanie minimalnej oszacowanej na podstawie badania *impact-echo* wartości przyczepności $f_{h,IE,min}$ w postaci skorygowanej linii regresji $f_{h,min} = f_{h,IE} - \Delta f_h$, gdzie Δf_h wyznaczono zgodnie z zasadami wnioskowania statystycznego wg równania:

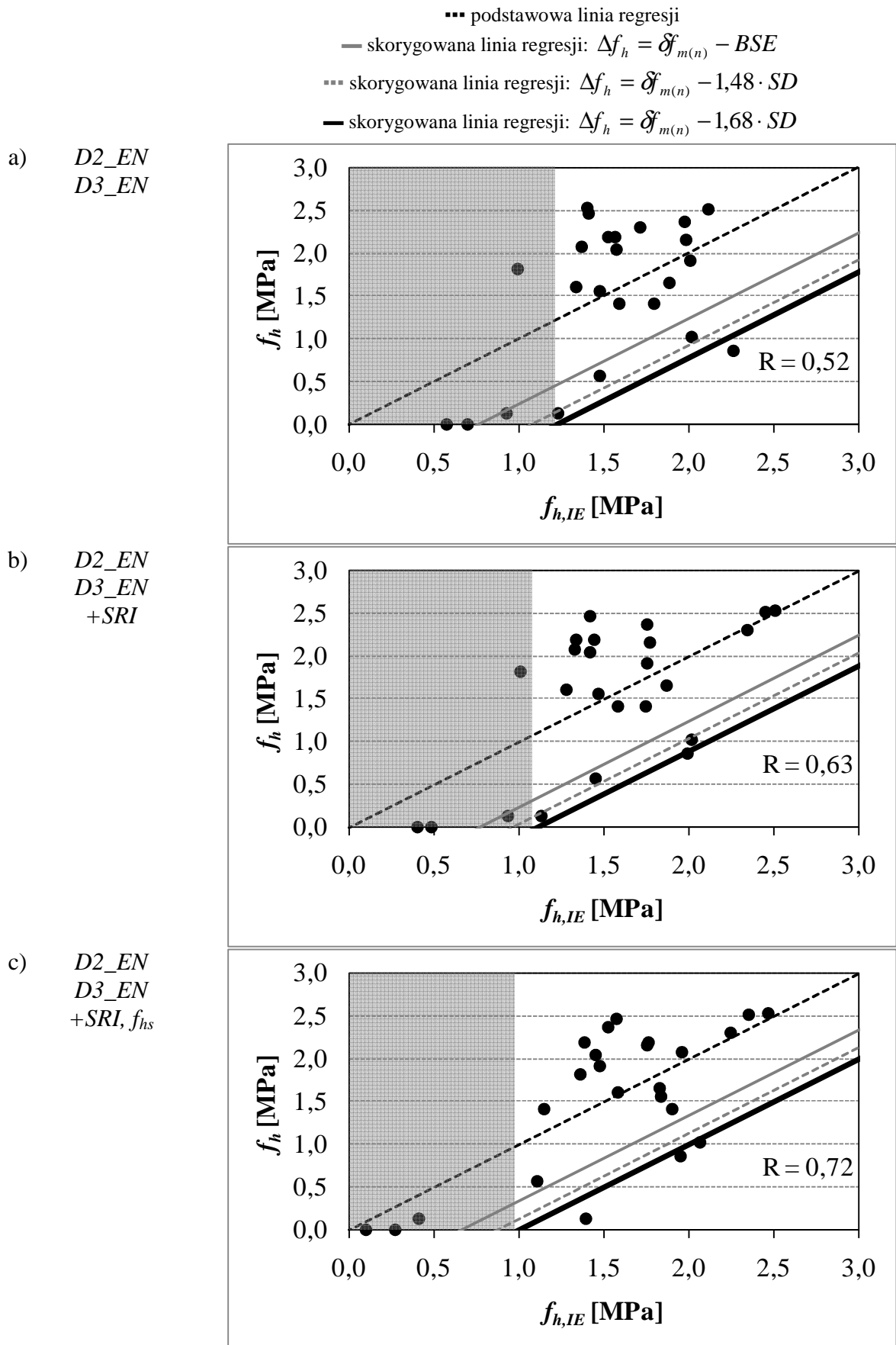
$$\Delta f_h = \bar{\mathcal{F}}_{m(n)} - 1,68 \cdot SD, \quad (53)$$

gdzie: $\bar{\mathcal{F}}_{m(n)}$ oraz SD – jak w równaniu (52).

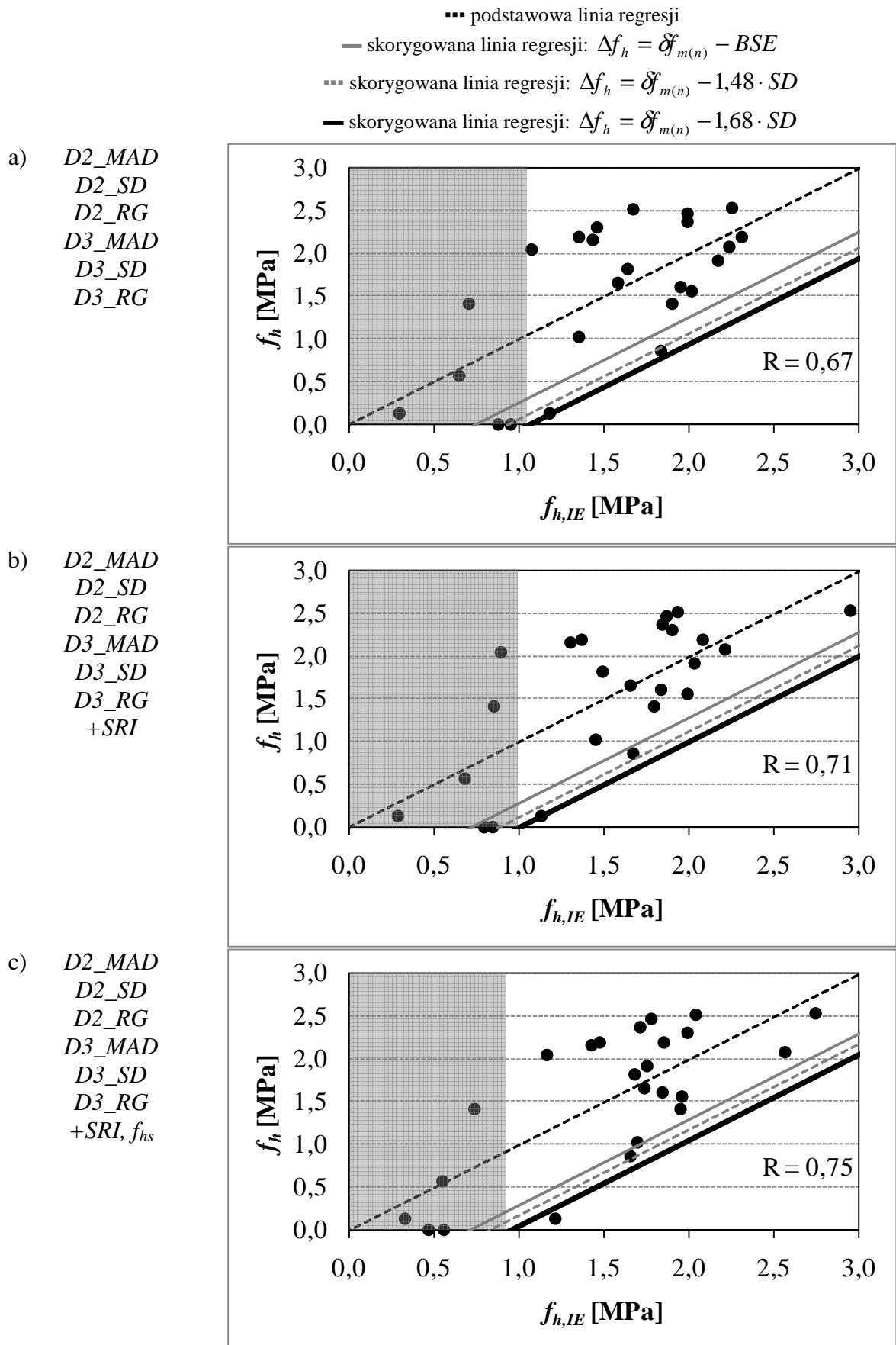
Tak wyznaczona wartość przesunięcia prostej $f_h = f_{h,IE}$ jest większa niż wartość zarówno błędu standardowego estymacji, BSE , jak i przesunięcia wyznaczonego w oparciu o krzywe

OC - por. równanie (52). Szare pole na wykresach o szerokości równej Δf_h przedstawia zakres niepewności oszacowania wartości $f_{h,IE}$ wskazujący na wystąpienie niskiej przyczepności lub nieprawidłowe wykonanie badań *impact-echo* i *pull-off*. W celu weryfikacji poprawności przeprowadzonych badań, w pobliżu punktów, dla których uzyskano takie wyniki, należałoby powtórzyć pomiary. Ponadto, przy doborze miejsc do przeprowadzenia eksperymentalnej weryfikacji nieniszczącego oszacowywania przyczepności, tego rodzaju miejsca powinny być wzięte pod uwagę w pierwszej kolejności.

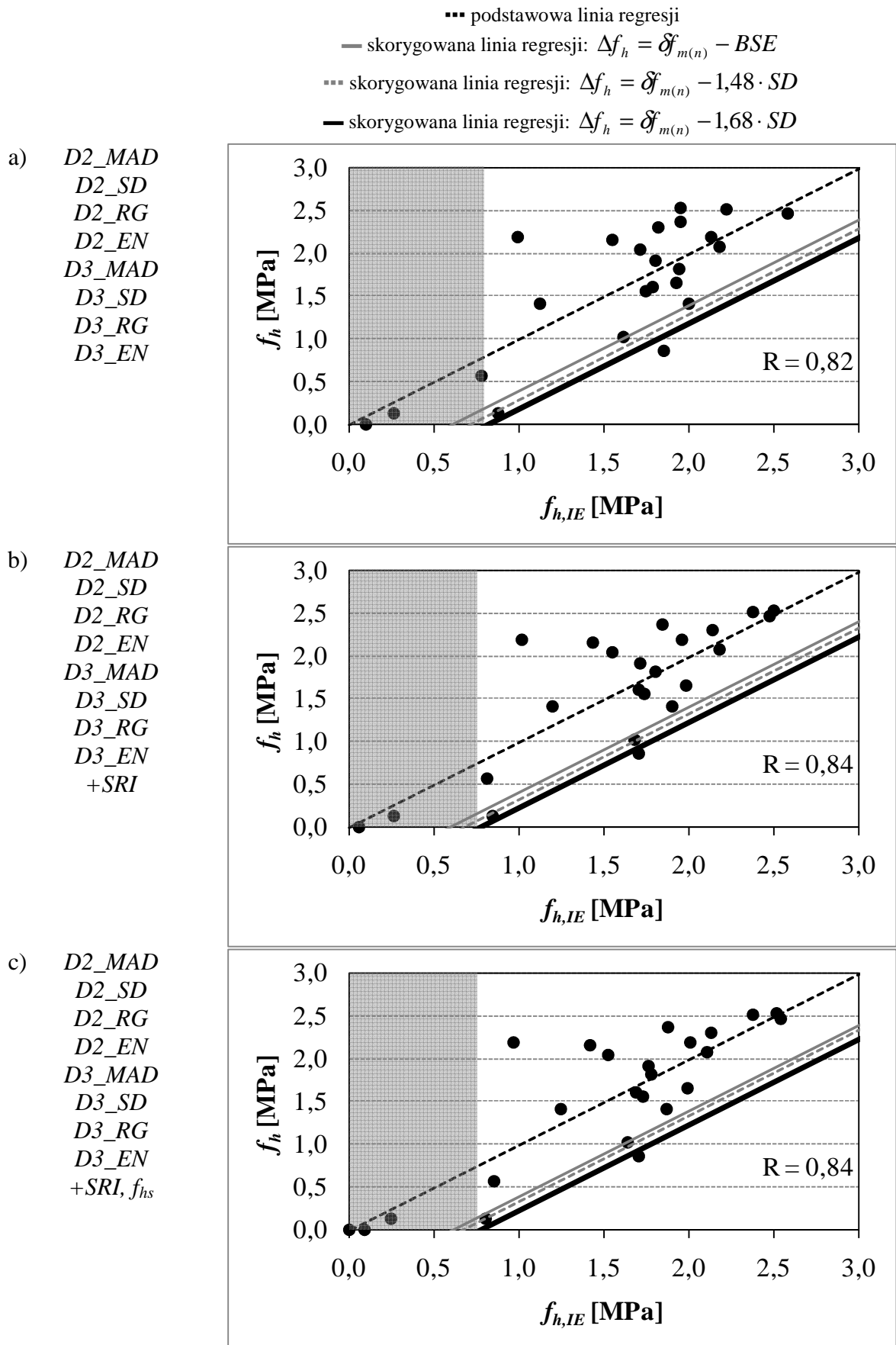
Analizując uzyskane wykresy należy zwrócić uwagę, że kilka punktów leży poniżej skorygowanej linii regresji, czyli wartość oszacowana na podstawie badania *impact-echo* okazała się wyższa od rzeczywistej o więcej niż wynosi Δf_h . Jest to jednak zazwyczaj tylko jeden punkt, co stanowi tylko ok. 4% całego zbioru. Na podstawie zaprezentowanych wykresów można również zaobserwować, że w przypadku uwzględnienia w modelu regresji wielorakiej pełnego zbioru parametrów zaproponowanych do opisu propagacji fali sprężystej w metodzie *impact-echo* prawdopodobieństwo błędnego oszacowania, a także szerokość zakresu niepewności maleje.



Rys.82. Szacowanie przyczepności, f_h na podstawie parametrów grupy 3 (EN) oraz z uwzględnieniem *SRI* (b) i *SRI*+*f_{hs}* (c)



Rys.83. Szacowanie przyczepności, f_h na podstawie parametrów grupy 4 (MAD,SD,RG) (a) oraz z uwzględnieniem SRI (b) i SRI+f_{hs} (c)



Rys.84. Szacowanie przyczepności, f_h na podstawie parametrów grupy 5 (EN+MAD,SD,RG) oraz z uwzględnieniem SRI (b) i SRI+ f_{hs} (c)

7. METODA OCENY JAKOŚCI ZESPOLENIA W UKŁADACH NAPRAWCZYCH BETONU PRZY ZASTOSOWANIU ANALIZY SYGNAŁU *IMPACT-ECHO*

Przedstawiona poniżej metoda oceny jakości zespolenia w układach naprawczych betonu przy zastosowaniu analizy sygnału *impact-echo* polega na szacowaniu przyczepności warstwy naprawczej do podłoża betonowego. Oparta jest ona na prezentowych w niniejszej rozprawie wynikach badań przeprowadzonych na modelowych układach naprawczych oraz założeniach oceny wytrzymałości betonu w konstrukcji za pomocą metod pośrednich opisanych w normie PN-EN 13791.

7.1. Zasada metody

Ocena jakości zespolenia w układach naprawczych betonu przy zastosowaniu analizy sygnału *impact-echo* stanowi metodę pośrednią i należy uwzględnić niepewność wynikającą z relacji między wynikiem badania *impact-echo*, a wartością przyczepności przez odrywanie oznaczaną wg PN-EN 1542, a także specyfikę i wszelkie uwarunkowania samej metody *pull-off* (np. szybkość przyrostu obciążenia, prostopadłość przyłożenia siły, głębokość nacięcia)

7.2. Terminy i definicje

Miejsce pomiarowe - jeden lub kilka obszarów (elementów konstrukcyjnych), co do których wiadomym jest lub przypuszcza się, że należą do tej samej populacji. Miejsce pomiarowe zawiera zbiór punktów pomiarowych.

Para wyników - wynik badania przyczepności przy odrywaniu oraz wynik badania *impact-echo* w tym samym punkcie pomiarowym.

Punkt pomiarowy - okrąg o średnicy 100mm wyznaczony współosiowo do nawiercenia z badania przyczepności. Każdy punkt pomiarowy stanowi jeden odwiert do pomiaru przyczepności przez odrywanie.

Wynik badania przyczepności przy odrywaniu w punkcie pomiarowym - obliczony zgodnie z PN-EN 1542 na podstawie jednego oznaczenia w danym punkcie pomiarowym.

Wynik badania *impact-echo* A1 – analiza jakościowa – charakter sygnału i widma częstotliwości.

Wynik badania *impact-echo* A2 – analiza ilościowa – wartości średnie parametrów opisujących propagację fali sprężystej w metodzie *impact-echo* (por. 7.4 pkt. 4), z co najmniej 7 zarejestrowanych sygnałów w danym punkcie pomiarowym.

7.3. Warianty metody

Wyróżnia się dwa warianty metody (Tab.45) różniące się sposobem wzorcowania wynikającym z ilości par wyników, która jest równa liczbie punktów pomiarowych:

Wariant 1 - polega na określeniu bezpośredniej korelacji między wynikami badania przyczepności przy odrywaniu, a wynikiem badania *impact-echo*.

Wariant 2 - polega na określeniu korelacji pośredniej w oparciu o daną podstawową linię regresji z jej przesunięciem, określonym na podstawie badania przyczepności przez odrywanie i badania *impact-echo* w wybranych punktach pomiarowych.

Bezpośrednią zależność korelacyjną należy wyznaczyć na podstawie, co najmniej 18 par wyników, natomiast korelację pośrednią (przesunięcie podstawowej linii estymacji), z co najmniej 9 par wyników. Powyższe liczby par wyników stanowią niezbędne minimum i w wielu przypadkach, dla wyznaczenia zależności korelacyjnej, korzystne jest dysponowanie znacząco większym liczbowo zbiorem wyników pomiarów. Ze statystycznego punktu widzenia oraz wymagań bezpieczeństwa, do oceny przyczepności zaleca się wykorzystanie jak największej, praktycznie możliwej i ekonomicznie uzasadnionej liczby par wyników. Wyznaczona w wyniku zastosowania tej procedury zależność korelacyjna:

- zakłada możliwość zaniżenia wartości przyczepności o wartość nie większą niż Δf_h ,
- zapewnia poziom bezpieczeństwa, przy którym oczekuje się, że 90% rzeczywistej wartości przyczepności będzie wyższe od wartości wyznaczonej z zależności,
- może być wykorzystywana w zakresie $\pm 1,0$ MPa poza zakresem wyników pomiaru przyczepności, wykorzystanym do jej wyznaczenia (wariant 1) lub przesunięcia podstawowej linii estymacji (wariant 2)

Tab.45. Charakterystyka wariantów procedury oceny przyczepności warstwy naprawczej do podłoża betonowego przy zastosowaniu analizy sygnału *impact-echo*

Wariant	1	2
Korelacja	Bezpośrednia	Pośrednia
Opis metody	Korelacja między wynikami pomiaru A2 i B	Korelacja między wynikami A2 i B w oparciu o daną podstawową linię regresji i jej przesunięcie
Pomiar A	Badanie <i>impact-echo</i> w punkcie pomiarowym ^{*)}	
Wynik A1	Wynik badania <i>impact-echo</i> A1 ^{*)} – charakter sygnału i widma częstotliwości	
Wynik A2	Wynik badania <i>impact-echo</i> A2 ^{*)} – parametry statystyczne	
Pomiar B	Badanie <i>pull-off</i> w punkcie pomiarowym ^{*)}	
Wynik B	Wartość przyczepności przez odrywanie, f_h	
Liczba par wyników ^{*)}	$n \geq 18$	$n \geq 9$

^{*)} definicje w rozdziale 7.2

7.4. Opis metody

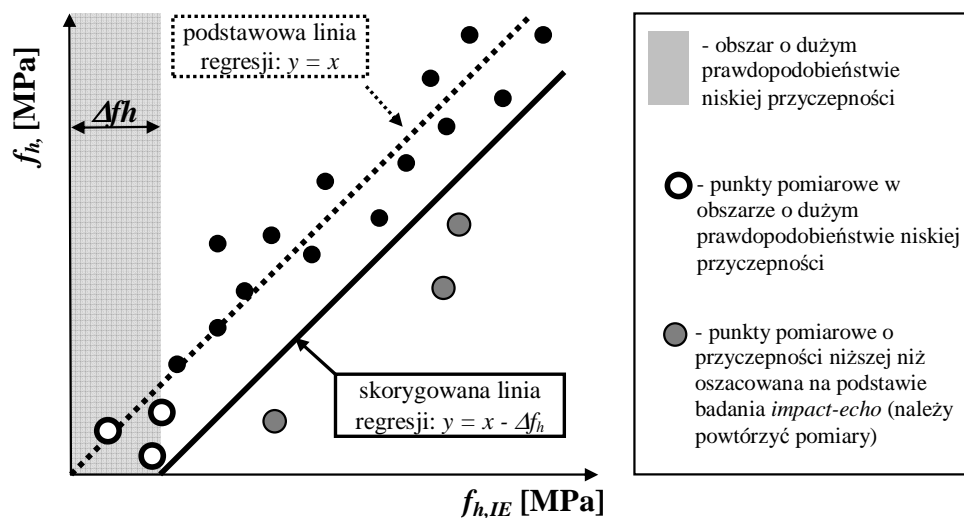
Wariant 1

Wariant 1 obejmuje następujące czynności:

- 1) Wybrać miejsce pomiarowe i wyznaczyć siatkę zawierającą, z co najmniej minimalną liczbą punktów pomiarowych. Standardowo przyjmuje się siatkę punktów pomiarowych 50x50cm;
- 2) W każdym punkcie pomiarowym wykonać pomiar propagacji fali sprężystej metodą *impact-echo* (pomiar A) do badań wstępnych;
- 3) Dokonać analizy jakościowej otrzymanych widm częstotliwości (wynik A1) i wybrać do dalszej analizy punkty pomiarowe, dla których uzyskano reprezentatywne i zróżnicowane widma, które mogą wskazywać na miejsca o zróżnicowanej przyczepności;

UWAGA: Jeśli liczba punktów pomiarowych w siatce przekracza minimalną liczbę punktów pomiarowych, to należy wybrać spośród nich, co najmniej minimalną liczbę. Jeśli liczba punktów pomiarowych w siatce zawiera jedynie minimalną liczbę punktów pomiarowych, to w dalszej części procedury należy uwzględnić wszystkie te punkty.
- 4) Dla każdego wybranego punktu pomiarowego wykonać, co najmniej siedmiokrotny pomiar propagacji fali sprężystej metodą *impact-echo* (pomiar A) do badań właściwych. Z otrzymanego sygnału usunąć falę powierzchniową przez tzw. „zerowanie”. W dalszej analizie uwzględnić pierwszą część sygnału o wyraźnie większej zmienności amplitudy i dużej częstotliwość tych zmian (por. rozdział 4.5);
- 5) Obliczyć zmienne objaśniające (wynik A2), czyli średnie wartości parametrów opisujących propagację fali sprężystej w metodzie *impact-echo*. Parametrami tymi są: *MAD*, *SD*, *RG* oraz *EN* dla detali *DWT*, których pseudoczęstotliwość odpowiada częstotliwości fali odbitej od powierzchni rozdziału. Poziom tych detali należy określić na podstawie charakterystyki układu naprawczego z uwzględnieniem geometrii układu (grubość warstwy naprawczej) i właściwości akustycznych materiału naprawczego (prędkość fali),
- 6) Jeśli dysponuje się dodatkowo wartościami *SRI* i f_{hs} dla wybranych punktów pomiarowych należy je dołączyć do modelu, jako dodatkowe zmienne objaśniające,
- 7) W każdym wybranym punkcie pomiarowym wykonać pomiar przyczepności przez odrywanie wg PN-EN 1542 (pomiar B) i określić wartości zmiennej zależnej, f_h ,
- 8) Wyznaczyć zależność korelacyjną metodą regresji wielorakiej dla zmiennej zależnej, f_h i wybranych zmiennych objaśniających (poziom istotności $\alpha=0,05$),

- 9) Nanieść na wykres (Rys.85) wartości rzeczywistej przyczepności przy odrywaniu, f_h w funkcji wartości przyczepności oszacowanej na podstawie badania *impact-echo*, obliczonej na podstawie modelu regresji wielorakiej, $f_{h,IE}$ oraz narysować podstawową linię regresji,
- 10) Dla uzyskania zależności korelacyjnej między wynikami analizy sygnału *impact-echo* a minimalną wartością przyczepności przez odrywanie przesunąć podstawową linię regresji o wartość Δf_h (Rys.85) obliczoną wg wzoru (53).
- 11) Powtórzyć pomiary *impact-echo* i *pull-off* w pobliżu punktów pomiarowych o rzeczywistej przyczepności, f_h niższej niż oszacowana na podstawie badania *impact-echo*, $f_{h,IE}$ i zastąpić nimi dane w modelu



Rys.85. Zasada wyznaczania zależności korelacyjnej między wynikami analizy sygnału *impact-echo* a wartością, f_h (objaśnienia w tekście)

Wariant 2

Wariant 2 metody stanowi modyfikację wariantu 1 i ma zastosowanie przypadku, gdy dysponuje się modelem regresji wielorakiej. Obecny stan wiedzy nie pozwala na wyznaczenie modelu generalnego i wobec tego, model taki może być znany jedynie dla danej populacji układów naprawczych, na przykład, gdy wielokrotnie badamy układ o tej samej charakterystyce podłoża betonowego i materiału naprawczego, a także procedura naprawy jest niezmienna. Wariant 2 polega na naniesieniu na wykres (Rys.85) wartości rzeczywistej przyczepności przy odrywaniu, f_h w funkcji wartości przyczepności oszacowanej na podstawie badania *impact-echo*, $f_{h,IE}$, obliczonej na podstawie posiadanego modelu regresji wielorakiej, a następnie przesunięciu podstawowej linii regresji o wartość Δf_h . Tak przesunięta podstawowa linia regresji staje się skorygowaną linią regresji wyznaczającą minimalną przyczepność w układzie naprawczym.

8. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Celem pracy było opracowanie metody interpretacji sygnałów rejestrowanych w metodzie *impact-echo* oraz wykazanie skuteczności tej metody w ocenie jakości zespolenia układów naprawczych i szacowaniu przyczepności materiału naprawczego do podłoża betonowego. Na podstawie wyników przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

a) wpływ obróbki powierzchni betonu na przyczepność w układach naprawczych:

- przy doborze obróbki powierzchni betonu należy uwzględnić stopień jej agresywności, uwzględniając zarówno rozwinięcie profilu chropowatości jak i możliwość generowania rys w warstwie przypowierzchniowej,
- parametrem, który bardziej kompleksowo charakteryzuje jakość podłoża betonowego niż parametry rozkładu rys, jest wytrzymałość na rozciąganie warstwy przypowierzchniowej,
- chropowatość powierzchni jest istotnym parametrem kształtującym przyczepność warstwy naprawczej do podłoża betonowego,
- wytrzymałość na ściskanie podłoża betonowego jest mało istotnym parametrem przy szacowaniu przyczepności w układzie naprawczym, natomiast generalnie dla podłoży betonowych klas wytrzymałości na ściskanie $\leq C30/37$ zalecane są mniej agresywne obróbki, które nie generują w warstwie przypowierzchniowej rys obniżających przyczepność, a w przypadku podkładów betonowych wyższych klas korzystne jest stosowanie bardziej agresywnych metod obróbki, które znacznie rozwijają profil powierzchni i poprawiają mechaniczne zakotwienie materiału naprawczego,

b) wpływ jakości podłoża betonowego na propagację fali sprężystej

- zaobserwowano wpływ jakości podłoża betonowego (chropowatość, mikrozarzysowanie) na charakter widm częstotliwości *impact-echo*, w przypadku podłoży o dużej chropowatości widma częstotliwości są bardziej złożone
- nie stwierdzono istnienia statystycznie istotnej zależności między amplitudą charakterystycznych pików a przyczepnością przy odrywaniu oraz parametrami charakteryzującymi jakość podłoża betonowego, z tego względu wartość maksymalnej amplitudy charakterystycznych pików nie są parametrami przydatnymi do oszacowania przyczepności materiału naprawczego do podłoża betonowego,

- nie stwierdzono statystycznie istotnej zależności między parametrami statystycznymi rozkładu amplitud widm częstotliwości, a przyczepnością przez odrywanie, zaobserwowano natomiast wzrost poziomu szumów w widmie ze wzrostem chropowatości powierzchni i stopniem mikrozarzysowania podłoża betonowego,
- szczególnie przydatna do oceny jakości zespolenia w układzie naprawczym i oszacowania przyczepności warstwy naprawczej do podłoża betonowego jest dyskretna analiza falkowa sygnału,
- wykazano przydatność parametrów statystycznych rozkładu amplitudy (MAD, SD, RG) oraz energii (EN) detali, których pseudoczęstotliwość odpowiada odbiciu fali sprężystej od powierzchni rozdziału w szacowaniu przyczepności w układzie naprawczym,
- uwzględnienie w analizie sygnału *impact-echo* cech podłoża betonowego wyrażonych takimi parametrami, jak: *SRI* czy f_{hs} pozwala na dokładniejszą ocenę jakości zespolenia układu naprawczego i lepsze oszacowanie przyczepności warstwy naprawczej do podłoża betonowego.

Podsumowując wyniki uzyskane w pracy potwierdzają postawioną w pracy tezę, że analiza sygnału *impact-echo*, po uwzględnieniu cech podłoża betonowego, pozwala na ocenę jakości zespolenia układu naprawczego i oszacowanie przyczepności warstwy naprawczej do podkładu.

LITERATURA

- [1] Adams R.D., Drinkwater B.W., Nondestructive testing of adhesively bonded joints, *NDT&E International*, vol. 30, 1997, s.93-98;
- [2] Aggelis D.G., Shiotani T., Kasai K., *Evaluation of grouting in tunnel lining using impact-echo*, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23(6) 2008, 629-637;
- [3] Algernon D., Wiggenhauser H., Schubert F., *A new approach for the investigation of geometry effects in impact-echo measurements – experimental results and numerical simulations*, Proceedings of ECNDT 2006, Berlin, Germany, September 25-29, 2006;
- [4] Alver N., Ohtsu M., *BEM analysis of dynamic behavior of concrete in impact-echo test*, *Construction and Building Materials*, Volume 21, Issue 3, March 2007, Pages 519-526;
- [5] Alver N., Ohtsu M., *BEM analysis of dynamic behavior of concrete in impact-echo test*, *Construction and Building Materials* 21 (2007) 519–526;
- [6] Ata N., Mihara S., Ohtsu M., *Imaging of ungrouted tendon ducts in prestressed concrete by improved SIBIE*, *NDT & E International*, Volume 40, Issue 3, April 2007, Pages 258-264;
- [7] Barnes C.L., Trottier J.F., *Hybrid analysis of surface wavefield data from Portland cement and asphalt concrete plates*, *NDT & E International*, Volume 42, Issue 2, March 2009, Pages 106-112;
- [8] Białasiewicz J.T., *Falki i aproksymacje*, WNT, Warszawa 2004;
- [9] Brunarski L., *Nowe kryteria zgodności wytrzymałości betonu*, *Polski Cement – Budownictwo-Technologie-Architektura*, 2/2004, 28-30;
- [10] Brunarski L., *Podstawy matematyczne kształtowania kryteriów zgodności wytrzymałości materiałów*, Wyd. ITB, Warszawa 2009;
- [11] Brunarski L., Runkiewicz L., *Podstawy i przykłady stosowania metod nieniszczących w badaniach konstrukcji z betonu*, Wyd. ITB, Warszawa, 1983;
- [12] Chang TP., Lin HC., Chang WT., Hsiao JF., *Engineering properties of lightweight aggregate concrete assessed by stress wave propagation methods*, *Cement & Concrete Composites* 28 (2006), 57–68;
- [13] Cheng CC., Cheng TM., Chiang CH., *Defect detection of concrete structures using both infrared thermography and elastic waves*, *Automation in Construction*, Volume 18, Issue 1, December 2008, Pages 87-92;
- [14] Cheng CC., Lin Y., Hsiao CM. Chang, HC., *Evaluation of simulated transfer functions of concrete plate derived by impact-echo method*, *NDT&E International* 40 (2007), 239–249;
- [15] Cheng C., Sansalone M., *The effects of steel bars and cracking around bars on impact-echo signals*, *ACI Materials J.*, vol. 90, 1993, 421-434;
- [16] Chung H.W., Law K.S., *Assessing fire damage of concrete by the ultrasonic pulse technique*, *Cement, Concrete and Aggregates*, vol. 7, 1985, s.84–88
- [17] Chmielewska B., *On the methods of bond strength measurement in concrete repair systems*, *Adhesion in Interfaces of Building Materials: a Multi-scale Approach* (ed. L. Czarnecki and A. Garbacz), *Advances in Materials Science and Restoration AMSR No. 2*, Aedificatio Publishers, 2007, 29-45;
- [18] Cleland D.J., Long A.E., *The pull-off test for concrete patch repairs*, *Proc. Inst. Civ. Engrs Structs & Bldgs*, 1997, 122, Nov., 451-460;
- [19] Colla C., Krause M., Maierhofer Ch., Hohberger H.J., Sommer H., *Combination of NDT techniques for site investigation of non-ballasted railway tracks*, *NDT&E International* 35 (2001), 95-105;

- [20] Courard L., *Parametric study for the creation of the interface between concrete and repairs products*, Materials and Structures, 33 (2000), 65-72;
- [21] Courard L., *Contribution à l'analyse des paramètres influençant la création de l'interface entre un béton et un système de réparation*, These de doctorat, 1999;
- [22] Courard L., Bissonnette B., Belair N., *Effect of surface preparation techniques on the cohesion of superficial concrete: comparison between jack-hammering and water-jetting*, CD Proc. of the Int. Conf. on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting ICCRRR (ed. M.Alexander, H.-D Beushausen, F.Dehn, P.Moyo), Taylor&Francis, Cape Town 2006;
- [23] Courard L., Garbacz A., Moczulski G., *Evaluation of the effect of load eccentricity on pull-off strength*, Proc. of the 2nd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, Cape Town, listopad 2008;
- [24] Courard L., Garbacz A., Niewięgłowska-Mazurkiewicz A., Piotrowski T., *Inżynieria powierzchni betonu. Część 2. Wpływ obróbki na powstawanie rys*, Materiały Budowlane, 12 (2006), 8-11;
- [25] Courard L., Garbacz A., Piotrowski T., *Effects of concrete surface quality on adhesion of repair mortars*, CCC 2008 – Challenges for Civil Construction, Porto, Portugalia, 16 18.04.2008, 198-199;
- [26] Courard L., Garbacz A., Piotrowski T., *Inżynieria powierzchni betonu. Część 3. Termodynamiczne uwarunkowania adhezji*, Materiały Budowlane, 2 (2007), 6-7;
- [27] Courard L., Nélis M., *Surface analysis of mineral substrates for repair works: roughness evaluation by profilometry and surfometry analysis*, Magazine of Concrete Research, vol. 55, 2003, s.355-366;
- [28] Courard L., Schwall D., Piotrowski T., *Concrete surface roughness characterization by means of opto-morfology technique*, Adhesion in Interfaces of Building Materials: a Multi-scale Approach (ed. L. Czarnecki and A. Garbacz), Advances in Materials Science and Restoration AMSR No. 2, Aedificatio Publishers, 2007, 107-115;
- [29] Courard L., Schwall D., Garbacz A., Piotrowski T., *Effect of concrete substrate texture on the adhesion properties of PCC repair mortar*, Proc. of Inter. Symposium on Polymers in Concrete. ISPIC 2006, Guimaraes, Portugal (2-4 April 2006), 99-110;
- [30] Czarnecki L., *Adhesion – a challenge for concrete repair*, Proc. of the 2nd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, Cape Town, listopad 2008;
- [31] Czarnecki L., praca zbiorowa pod kierunkiem, *Beton według normy PN-EN 206-1 – komentarz*, Wyd. Polski Cement, Kraków, 2004;
- [32] Czarnecki L., Chmielewska B., *Uwarunkowania adhezji w złączach budowlanych*, Cement Wapno Beton, 2, 2005, 74-85;
- [33] Czarnecki L., Chmielewska B., Krupa P., *Influence of selected factors on the results of pull-off test for industrial floors*, Industrial Floors'03, 5th International Colloquium Industrial Floors'03, Technische Akademie Esslingen, January 2003 str.163-168;
- [34] Czarnecki L., Clifton J., *Technical evaluation system of concrete-polymer composites*, Materiały Międzynarodowego Sympozjum RILEM, Oostende, 1995, str.107-114;
- [35] Czarnecki L., Emmons P., *Naprawa i ochrona konstrukcji betonowych*, Wyd. Polski Cement, Kraków, 2002;
- [36] Czarnecki L., Garbacz A., Kostana K., *The effect of concrete surface roughness on adhesion in industrial floor systems*, Proc. of the 5th Colloquium Industrial Floors (ed. P.Seidler), Esslingen, 2003, s.169-174;

- [37] Czarnecki L., Garbacz A., Krystosiak M., *On the ultrasonic assessment of adhesion between polymer coating and concrete substrate*, Cement Concrete Composites, vol. 28, 2006, s.360-369;
- [38] Czarnecki L., Głodkowska W., Piątek Z., *Estimation of compatibility of polymer and polymer-cement composites with ordinary concrete under short-time load conditions*, Archives of Civil Engineering, L (1) (2004), 133-150;
- [39] Czarnecki L., Głodkowska W., Wiąckowska A., *Model of compatibility of polymer composite-cement concrete (PC-CC) system*, Int. Colloquium "Durability of polymer based composite systems for structural application", Brussels, 1991, 484-493;
- [40] Czarnecki L., Łukowski P., *Naprawy i ochrona konstrukcji betonowych w świetle norm europejskich*. Budownictwo Technologie Architektura, 4, 2008, 52-55;
- [41] Derobert X., Aubagnac C., Abraham O., *Comparison of NDT techniques on a post-tensioned beam before its autopsy*, NDT&E International 35 (2002), 541-548;
- [42] Fiebrich, M.H., *Scientific aspects of adhesion phenomena in the interface mineral substrate-polymers*, Proc. of the 2nd Bolomey Workshop, Adherence of young and old concrete (ed. F.H.Wittman), Aedificato Verlag, 1994, s.25-58;
- [43] Fukuzawa K., Mitsui M., Numao T., *Surface roughness indexes for evaluation of bond strengths between CRFP sheet and concrete*, CD Proceedings of the 10th Int. Congress on Polymers in Concrete - ICPIIC 2001 (ed. D.W.Fowler), Honolulu, 2001;
- [44] Flaga K., Dohnalik M., *Próba wykorzystania fal ultradźwiękowych do badania korozji siarczanowej betonu*, Archiwum Inżynierii Lądowej, vol2, 1970, 389-396;
- [45] Garbacz A., *Evaluation of industrial floor quality with impact-echo*, Theoretical Foundations of Civil Engineering, Polish-Lithanian Transactions, v.16, 2008, 413-420;
- [46] Garbacz A., *Nieniszczące badania betonopodobnych kompozytów polimerowych za pomocą fal sprężystych – ocena skuteczności napraw*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2007;
- [47] Garbacz A., Courard L., Kostana K., *Characterization of concrete surface roughness and its relation to adhesion in repair systems*, Materials Characterization, vol. 56, 2006, s.281-289;
- [48] Garbacz A., Courard L., Piotrowski T., *Znaczenie inżynierii powierzchni w naprawach betonu*, Współczesne metody naprawcze w obiektach budowlanych (Ed. M.Kamiński, J.Jasiczak, W.Buczowski, T.Błaszczński), Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, 2009, 59-76;
- [49] Garbacz A., Czarnecki L., Kwaśniewski L., Piotrowski T., *Wykorzystanie analizy falkowej do oceny przyczepności w układach naprawczych*, Raport MNiI nr 4 T07 027 27, Warszawa, 2006;
- [50] Garbacz A., Gorka M., Courard L., *On the effect of concrete surface treatment on adhesion in repair systems*, Magazine of Concrete Research, Vol. 57, 2005, s.49-60;
- [51] Garbacz A., Kwaśniewski L., *Modeling of stress wave propagation in repair systems tested with impact-echo method*, Brittle Matrix Composites 8 – BMC8 (ed. A.Brandt, A.Marschall, V.Li), Warszawa, 2006, s.303-314;
- [52] Garbacz A., Piotrowski T., *Inżynieria Powierzchni w naprawach konstrukcji betonowych*, Trwałość i skuteczność napraw obiektów budowlanych (Ed. M.Kamiński, J.Jasiczak, W.Buczowski, T.Błaszczński), Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, 2007, 31-41;
- [53] Garbacz A., Piotrowski T., Courard L., *Analysis of stress wave propagation in repair systems using wavelet approach*, RILEM PRO 51 (CD): 2nd International Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering (Ed. J.

- Marchand, B.Bissonnette, R.Gagne, M.Jolin, F.Paradis), Quebec, Canada (11-13.09.2006);
- [54] Garbacz A., Piotrowski T., Courard L., Inżynieria powierzchni betonu. Część 1. Struktura geometryczna powierzchni, *Materiały Budowlane*, 9 (2006), 3-7;
- [55] Garbacz A., Piotrowski T., Niewęglowska-Mazurkiewicz A., *Wavelet approach in repair efficiency evaluation with stress waves*, CCC 2008 – Challenges for Civil Construction, Porto, Portugalia, 16 18.04.2008, 68-69;
- [56] Glabisz W., Pakietowa analiza falkowa w zagadnieniach mechaniki, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2004;
- [57] Glinicki M.A., Litorowicz A., *Digital analysis of microscopic images for crack system evaluation in concrete elements*, Adhesion in Interfaces of Building Materials: a Multi-scale Approach (ed. L. Czarnecki and A. Garbacz), Advances in Materials Science and Restoration AMSR No. 2, Aedificatio Publishers, 2007,127-139;
- [58] Hoła J., Stawiski B., *Badania przydatności metody ultradźwiękowej do szybkiej oceny jakości konstrukcji wykonanych z betonu*, 32 Krajowa Konf. Badań Nieniszczących, Międzyzdroje, 2003,111-114;
- [59] Hsiao C., Cheng CC., Liou T., Juang Y., *Detecting flaws in concrete blocks using the impact-echo method*, NDT&E International 41 (2008); 98–107;
- [60] Ki-Il S., Gye-Chun C., *Bonding state evaluation of tunnel shotcrete applied onto hard rocks using the impact-echo method*, NDT&E International 42 (2009),487-500;
- [61] Krause M., Barmann M., Frielinghaus R., Kretschmar F., Kroggel O., Langenberg K.J., Maierhofer C., Muller W., Neisecke J., Schickert M., Schmitz V., Wiggenhauser H., Wollbold F., *Comparison of pulse-echo methods for testing concrete*, NDT&E International, 30 (4) 1997, 195 204;
- [62] Lewińska-Romicka A., *Badania nieniszczące. Podstawy defektoskopii*, WNT, Warszawa, 2000;
- [63] Lewis Ch., Mohsen J.P., A case study: *The impact-echo metod of nondestructive testing of concrete using rayleigh surface wave speed method for estimating concrete plate thickness*, University of Louisville Report, 1997;
- [64] Liang MT., Su PJ., *Detection of the corrosion damage of rebar in concrete using impact-echo method*, Cement and Concrete Research 31 (2001) 1427–1436;
- [65] Lin JM., Sansalone M., Poston R., *Impact-echo studies of interfacial bond quality in concrete: part II – effects of bond tensile strength*, ACI Materials Journal, 93(4)1996, 318-326;
- [66] Lin CC., Liu PL., Yeh PL., *Application of empirical mode decomposition in the impact-echo test*, NDT & E International, In Press, Corrected Proof, Available online 5 April 2009;
- [67] Lin Y., Chang C., Kuo SF., Liou HC., *A simple device for detecting impact time in impact-echo testing of concrete*, NDT&E International 37 (2004), 1–8;
- [68] Liubimov V., Oczóś K., Struktura geometryczna powierzchni, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 2003;
- [69] Łukowski P., *Przyczepność betonopodobnych kompozytów polimerowo-cementowych do podłoża*, Cement Wapno Beton, 3 (2005), 142-147;
- [70] Maćkowski R., *Wpływ sposobu przygotowania podłoża na jakość napraw konstrukcji betonowych*, XII Konf. Nauk.-Techn. Trwałość Budowli i Ochrona przed Korozją – KONTRA 2000, Zakopane, 2000, s.221-226;
- [71] Malhorta V.M., Carino N.J., Handbook on nondestructive testing of concrete, CRC Press, 2004;
- [72] Martin J., Hardy M.S.A., Usmani A.S., Forde M.C., *Accuracy of NDE in bridge assessment*, *Engineering structures*, 20(11) 1998, 979-984;

- [73] Migdalski J., praca zbiorowa pod kierunkiem, *Poradnik niezawodności*, Wydawnictwa Przemysłu Maszynowego "WEMA", Warszawa 1982;
- [74] Moczko A., Moczko M., *Możliwości wykorzystania metody impact-echo do lokalizacji wad w kablobetonowych konstrukcjach mostowych*, 30 Krajowa Konf. Badań Nieniszczących CD, Szczyrk, 2001;
- [75] Muldoon R., Chalker A., Forde M.C., Ohtsu M., Kunisue F., *Identifying voids in plastic ducts in post-tensioning prestressed concrete members by resonant frequency of impact-echo, SIBIE and tomography*, Construction and Building Materials, Volume 21, Issue 3, March 2007, Pages 527-537;
- [76] Ni S-H., Lo K-F., Lehmann L., Huang Y-H., *Time-frequency analyses of pile integrity testing using wavelet transform*, Computers and Geotechnics, 35(4)2008, 600-607;
- [77] Niewęglowska-Mazurkiewicz A., Piotrowski T., *Mikrozarysowanie jako efekt obróbki powierzchniowej podkładu betonowego*, V Konferencja Naukowo-techniczna Zagadnienia Materiałowe w Inżynierii Lądowej, MATBUD'2007, Kraków 2007, 381-389;
- [78] Ovanosova A. V., Suárez L. E., *Applications of wavelet transforms to damage detection in frame structures*, Engineering Structures, 26(1)2004, 39-49;
- [79] Ohtsu M., Alver N., *Development of non-contact SIBIE procedure for identifying ungrouted tendon duct*, NDT & E International, Volume 42, Issue 2, March 2009, Pages 120-127;
- [80] Pretorius J., Kruger D., *The influence of surface roughness on the bond strength of concrete repairs*, CD Proc. of the 10th Int. Congress on Polymers in Concrete – ICPIC'01 (ed. D.W.Fowler), Honolulu, 2001;
- [81] Piotrowski T., *Wpływ obróbki powierzchniowej podłoża betonowego na ocenę jakości złącz naprawionego metodą impact-echo*, Problemy naukowo-badawcze budownictwa, Tom V: Zagadnienia materiałowo-technologiczne infrastruktury i budownictwa, Wydawnictwo Politechniki Białostockiej 2008, 371-378;
- [82] Piotrowski T., Garbacz A., Schwall A., Courard L., *On the effect of concrete substrate roughness on stress wave propagation in repair systems*, Adhesion in Interfaces of Building Materials: a Multi-scale Approach (ed. L. Czarnecki and A. Garbacz), Advances in Materials Science and Restoration AMSR No. 2, Aedificatio Publishers, 2007, 247-257;
- [83] Piotrowski T., Niewęglowska-Mazurkiewicz A., *Wpływ obróbki powierzchniowej na przyczepność w układach naprawionych*, V Konferencja Naukowo-Techniczna Zagadnienia Materiałowe w Inżynierii Lądowej, MATBUD'2007, Kraków 2007, 431-438;
- [84] Popovics J., *Recent developments in NDT and SHM in the United States*, Non-Destructive Testing in Civil Engineering, Nantes, France, 30 June- 3July, 2009, CD;
- [85] Quek S-T., Wang Q, Zhang L., Ang K-K., *Sensitivity analysis of crack detection in beams by wavelet technique*, International Journal of Mechanical Sciences, 43(12)2001, 2899-2910;
- [86] Rucka M., Wilde K., *Application of continuous wavelet transform in vibration based damage detection method for beams and plates*, Journal of Sound and Vibration 297 (2006) 536–550;
- [87] Rucka M., Wilde K., *Crack identification using wavelets on experimental static deflection profiles*, Engineering Structures 28 (2006) 279–288;
- [88] Runkiewicz L., *Badania konstrukcji żelbetowych*, Wyd. Biuro Gamma, 2002;
- [89] Runkiewicz L., *Radiografia konstrukcji budowlanych z betonu*, Wyd. ITB, Warszawa 1980;

- [90] Sadri A., *Application of impact-echo technique in diagnoses and repair of stone masonry structures*, NDT&E International 36 (2003) 195–202;
- [91] Salazar A., Vergara L., Igual J., Gosalbez J., *Blind source separation for classification and detection of flaws in impact-echo testing*, Mechanical Systems and Signal Processing 19 (2005) 1312–1325;
- [92] Sansalone M., Carino N. J., *Detecting delaminations in reinforced concrete slab with and without asphalt overlays using impact-echo method*, ACI Materials J., vol.86, 1989, 175-184;
- [93] Sansalone M., Carino N.J., *Impact-echo: A Method for Flaw Detection in Concrete Using Transient Stress Wave*, NBSIR 86-3452, National Bureau of Standards, Gaithersburg, 1986;
- [94] Sansalone M., Jiunn-Ming L., *Impact-echo Response of Hollow Cylindrical Concrete Structures Surrounded by Soil and Rock, Part I – Numerical Studies*, Geotechnical Testing Journal, June, 1994;
- [95] Sansalone M., Jiunn-Ming L., *Impact-echo Response of Hollow Cylindrical Concrete Structures Surrounded by Soil and Rock, Part II – Experimental Studies*, American Society for Testing Material, 1916 Race Street Philadelphia PA 19013, 1994;
- [96] Sansalone M., Lin J.M., Streett W.B, *A Procedure for Determining Concrete Pavement Thickness Using P-Wave Speed Measurements and the Impact-Echo Method*, Innovations in nondestructive testing (ed. S.Pessiki and L.Olson), American Concrete Institute, Farmington Hills, 1997, 167-184;
- [97] Sansalone M., Street W.B., *Impact–echo. Nondestructive evaluation of concrete and masonry*, Bulbrier Press, Ithaca NY, 1997;
- [98] Sasse H.R., *Polimer adhesion to concrete – theories and engineering aspects*, Adhesion in Interfaces of Building Materials: a Multi-scale Approach (ed. L. Czarnecki and A. Garbacz), Advances in Materials Science and Restoration AMSR No. 2, Aedificatio Publishers, 2007, 7-19;
- [99] Siewczyńska M., *Wpływ wybranych parametrów betonu na przyczepność powłok ochronnych*, Rozprawa Doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań, 2008;
- [100] Siewczyńska M., Jasiczak J., Kołodziej P., Nietopiel A., *The influence of aggregate on surface tensile strength of concrete substrate*. w “Adhesion in Interfaces of Building Materials: a Multi-scale Approach” (ed. L. Czarnecki and A. Garbacz), Advances in Materials Science and Restoration AMSR No. 2, Aedificatio Publishers, 2007, 239-245;
- [101] Silfwerbrand J., *Improving concrete bond in repair bridge decks*, Concrete International, 12 (9)1990, 61-66;
- [102] Silfwerbrand J., Beushausen H., *Bonded concrete overlays – bond strength issues*, Proc. of the ICCRRR, Cape Town, South Africa, 21-23 Nov 2005, 19-21;
- [103] Silfwerbrand J., Paulsson J., *Better bonding of bridge deck overlays*. Concrete International 1998;10:56-61;
- [104] Taerwe L., *Evaluation of compound compliance criteria for concrete strength*, Materials and Structures, 21, 1998, 13-20;
- [105] Teodoru G.V.M., Herf J., *Engineering Society Cologne presents itself (NDT methods)*, Proc. of the 14th World Conference on NDT, New Delhi, 1996, s.939–943;
- [106] Watanabea T., Morita T., Hashimoto C., Ohtsu M., *Detecting voids in reinforced concrete slab by SIBIE*, Construction and Building Materials 18 (2004), 225–231;
- [107] Whiting D., Ost B., Nagi M., Cady P.D., *Condition Evaluation of Concrete Bridges Relative to Reinforcement Corrosion Volume 5: Methods for Evaluating the Effectiveness of Penetrating Sealers*, SHRP, Washington, DC 1992;

- [108] Wiggenhauser H., Advanced NDT methods for quality assurance of concrete structures, NDTCE'09, Non-Destructive Testing in Civil Engineering, Nantes, France, 30June-3July, 2009, CD;
- [109] Yang X., Tso SK., *Detection and classification of flaws in concrete structure using bispectra and neural networks*, NDT&E International, 35, 2002, 19-27;
- [110] Yeh PL., Liu PL., *Application of the wavelet transform and the enhanced Fourier spectrum in the impact-echo test*, NDT&E International (2008) in print;
- [111] Yeh PL., Liu PL., *Imaging of internal cracks in concrete structures using the surface rendering technique*, NDT & E International, 42(3)April 2009, 181-187;
- [112] Statistica PL dla Windows: Tom I-III, Wyd. Statsoft, 1997;
- [113] Misti M., Misti Y., Oppenheim G., Poggi J-M., Wavelet Toolbox User's Guide, Mathworks Inc., 1997-2006;

PRZYWOŁANE NORMY, INSTRUKCJE I WYTYCZNE

- [114] ASTM C1383-04 *Standard test method for measuring the p-wave speed and the thickness of concrete plates using the impact-echo method*, ASTM International, West Conshohocken, PA;
- [115] *Concrete Repair Manual*, ACI International, Farmington Hills, MI, USA, 2003
- [116] ISO 12491:1997 *Statistical methods for quality control of building materials and components*;
- [117] PN-EN 12504-2:2002 *Badania betonu w konstrukcjach. Część 2 : Badania nieniszczące. Oznaczanie liczby odbicia*;
- [118] PN-EN 13036-1:2005 *Cechy powierzchniowe nawierzchni drogowych i lotniskowych. Część 1: Pomiar głębokości makrotekstury metodą objętościową*;
- [119] PN-EN 13791:2008 *Ocena wytrzymałości betonu na ściskanie w konstrukcjach i prefabrykowanych wyrobach betonowych*;
- [120] PN-EN 1504-3:2006 *Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych. Definicje, wymagania, sterowanie jakością i ocena zgodności. Część 3: Naprawy konstrukcyjne i niekonstrukcyjne*;
- [121] ENV 1504-9:1997 *Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych. Definicje, wymagania, sterowanie jakością i ocena zgodności. Część 9: Ogólne zasady stosowania wyrobów i systemów*;
- [122] PN-EN 1504-10:2005 *Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych. Definicje, wymagania, sterowanie jakością i ocena zgodności. Część 10: Stosowanie wyrobów i systemów na placu budowy oraz kontrola jakości prac*;
- [123] PN-EN 1542:2000 *Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych. Metody badań. Pomiar przyczepności przez odrywanie*;
- [124] PN-EN 1766:2001 *Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych. Metody badań. Betony wzorcowe do badań*;
- [125] PN-EN 206-1:2003, *Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność*;
- [126] PN-EN ISO 4287 *Specyfikacje geometrii wyrobów. Struktura geometryczna powierzchni: metoda profilowa. Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni*;
- [127] PN-EN ISO 9000:2006 *Systemy zarządzania jakością. Podstawy i terminologia*;
- [128] Instrukcja ITB nr 361/99, *zasady oceny bezpieczeństwa konstrukcji żelbetowych*, Wyd. ITB, Warszawa 1999;
- [129] International Concrete Repair Institute, 1997, *Selecting and Specifying Concrete Surface, Preparation for Sealers, Coating, and Polymer Overlays, Technical Guideline No. 03732*;

ZAŁĄCZNIKI

Załącznik I

Skład mieszanki betonowej podkładów i formularz weryfikacji klasy wytrzymałości betonu na ściskanie

Załącznik II

Parametry rozkładu rys po obróbce w warstwie przypowierzchniowej (*Grupa A*)

Załącznik III

Wytrzymałość na rozciąganie w warstwie przypowierzchniowej podłoża betonowego

Załącznik IV

Wytrzymałość na rozciąganie przy odrywaniu warstwy naprawczej od podłoża betonowego

Załącznik V

Wartości maksymalnych amplitud charakterystycznych pików w widmie częstotliwości (A_b, A_i)

Załącznik VI

Wartości średniego odchylenia bezwzględnego detali (*MAD*)

Załącznik VII

Wartości odchylenia standardowego detali (*SD*)

Załącznik VIII

Wartości zakresu detali (*RG*)

Załącznik IX

Wartości energii detali (*EN*)

Załącznik I

Skład mieszanki betonowej podkładów 60x80x10cm - grupa A

		C30A	C40A	C45A
CEM I 52,5 N	[kg/m ³]	275	325	375
Piasek S-RRWSC-7 (0/2)	[kg/m ³]	765	729	676
Kruszywo łamane G-12 (2/8)	[kg/m ³]	255	230	206
Kruszywo łamane G-13 (8/14)	[kg/m ³]	569	576	601
Kruszywo łamane G-14 (14/20)	[kg/m ³]	390	401	412
Woda	[kg/m ³]	197	192	188
W/C		0,72	0,59	0,50

Skład mieszanki betonowej podkładów 50x50x7cm - grupa B

		C25B	C35B	C50B
CEM I 32,5 R	[kg/m ³]	350	407	488
Piasek kwarcowy (0/2)	[kg/m ³]	610	611	604
Żwir 2/8	[kg/m ³]	666	667	658
Żwir 8/16	[kg/m ³]	574	575	567
Woda	[kg/m ³]	189	170	152
Superplastyfikator	[kg/m ³]	-	1,63	7,32
W/C		0,54	0,42	0,31

Formularz weryfikacji klasy wytrzymałości betonu na ściskanie dla próbek grupy A i B

projektowana klasa wytrzymałości na ściskanie	Grupa A			Grupa B		
	C30/37	C40/50	C50/60	C25/30	C35/45	C50/60
próbka	cylinder	cylinder	cylinder	kostka	kostka	kostka
f _{ck1} [MPa]	37.55	47.05	52.52	36.8	48.7	66.1
f _{ck2} [MPa]	39.39	45.41	51.43	35.1	49.6	65.4
f _{ck3} [MPa]	39.94	43.57	54.36	34.5	50.7	66.8
f _{cm} [MPa]	39.0	45.3	52.8	35.5	49.7	66.1
kryterium 1 [MPa]	34.96	41.34	48.77	31.47	45.67	62.10
kryterium 2 [MPa]	41.55	47.57	55.43	38.50	52.70	69.40
f _{ck,cyl} (r) [MPa]	34.96	41.34	48.77	-	-	-
f _{ck,cube} (r) [MPa]	-	-	-	31.47	45.67	62.10

otrzymana klasa wytrzymałości na ściskanie	C30/37	C40/50	C45/55	C25/30	C35/45	C50/60
f _{ck,cyl} (t) [MPa]	30.00	40.00	45.00	25.00	35.00	50.00
f _{ck,cube} (t) [MPa]	37.00	50.00	55.00	30.00	45.00	60.00
sprawdzenie	PRAWDA	PRAWDA	PRAWDA	PRAWDA	PRAWDA	PRAWDA

następna klasa wytrzymałości na ściskanie	C35/45	C45/55	C50/60	C30/37	C40/50	C55/67
f _{ck,cyl} (t) [MPa]	35.00	45.00	50.00	30.00	40.00	55.00
f _{ck,cube} (t) [MPa]	45.00	55.00	60.00	37.00	50.00	67.00
sprawdzenie	FAŁSZ	FAŁSZ	FAŁSZ	FAŁSZ	FAŁSZ	FAŁSZ

Załącznik II

Parametry rozkładu rys po obróbce w warstwie przypowierzchniowej dla próbek *Grupy A*

obróbka	beton	próbka	liczba rys n_l	l_{total}	$l_{x,total}$	X_{lx}	L_A	R_l
				[mm]	[mm]	[mm/cm]	[mm/cm ²]	[%]
polerowanie PL	C30A	1	6	17	11	0,14	1,08	64,7%
		2	8	31	25	0,32	1,96	80,6%
	C40A	1	20	63	39	0,49	3,99	61,9%
		2	8	39	22	0,28	2,47	56,4%
	C45A	1	12	31	20	0,25	1,96	64,5%
		2	6	18	13	0,16	1,14	72,2%
	średnia			10	33	22	0,27	2,10
SD			5,37	16,88	10,03	0,13	1,07	8,52
piaskowanie SB-D	C30A	1	6	29	17	0,22	1,84	58,6%
		2	10	37	20	0,25	2,34	54,1%
	C40A	1	20	66	32	0,41	4,18	48,5%
		2	18	43	21	0,27	2,72	48,8%
	C45A	1	16	39	18	0,23	2,47	46,2%
		2	8	23	17	0,22	1,46	73,9%
	średnia			13	40	21	0,26	2,50
SD			5,76	14,86	5,71	0,07	0,94	10,30
groszkowanie JH	C30A	1	21	70	33	0,42	4,43	47,1%
		2	20	67	33	0,42	4,24	49,3%
	C40A	1	20	48	21	0,27	3,04	43,8%
		2	28	75	32	0,41	4,75	42,7%
	C45A	1	14	53	22	0,28	3,35	41,5%
		2	22	111	45	0,57	7,03	40,5%
	średnia			21	71	31	0,39	4,47
SD			4,49	22,29	8,79	0,11	1,41	3,39
obróbka hydrodynamiczna HD	C30A	1	16	67	28	0,35	4,24	41,8%
		2	17	58	34	0,43	3,67	58,6%
	C40A	1	20	60	33	0,42	3,80	55,0%
		2	25	95	45	0,57	6,01	47,4%
	C45A	1	17	74	48	0,61	4,68	64,9%
		2	16	54	27	0,34	3,42	50,0%
	średnia			19	68	36	0,45	4,30
SD			3,51	15,01	8,75	0,11	0,95	8,28

Załącznik III

Wytrzymałość na rozciąganie w warstwie przypowierzchniowej podłoża betonowego
 f_{hs} - Grupa A

PL									
nr	C30 [kN]	C30 [MPa]	typ zniszczenia	C40 [kN]	C40 [MPa]	typ zniszczenia	C45 [kN]	C45 [MPa]	typ zniszczenia
1	7.75	3.95	A3	9.20	4.69	A3	6.55	3.34	A3
2	9.15	4.66	A3	7.50	3.82	A2	8.00	4.07	A3
3	8.65	4.41	A3	8.60	4.38	A3	7.00	3.57	A3
4	7.60	3.87	A3	6.15	3.13	A2	7.70	3.92	A3
5	9.00	4.58	A3	8.50	4.33	A3	7.15	3.64	A3
średnia	8.43	4.29	średnia	7.99	4.07	średnia	7.28	3.71	
	SD	0.36		SD	0.61		SD	0.29	
A1 = 0% A2+A3 = 100% A2 = 13% A3 = 87%									

SB-D									
nr	C30 [kN]	C30 [MPa]	typ zniszczenia	C40 [kN]	C40 [MPa]	typ zniszczenia	C45 [kN]	C45 [MPa]	typ zniszczenia
1	6.80	3.46	A3	7.30	3.72	A3	5.95	3.03	A3
2	7.10	3.62	A3	8.35	4.25	A3	7.15	3.64	A3
3	8.15	4.15	A3	8.10	4.13	A3	8.15	4.15	A3
4	7.05	3.59	A3	9.40	4.79	A1	6.90	3.51	A3
5	7.20	3.67	A3	5.40	2.75	A2	8.80	4.48	A3
średnia	7.26	3.70	średnia	7.71	3.93	średnia	7.39	3.76	
	SD	0.26		SD	0.76		SD	0.57	
A1 = 7% A2+A3 = 93% A2 = 7% A3 = 87%									

JH									
nr	C30 [kN]	C30 [MPa]	typ zniszczenia	C40 [kN]	C40 [MPa]	typ zniszczenia	C45 [kN]	C45 [MPa]	typ zniszczenia
1	7.30	3.72	A3	7.75	3.95	A1	5.90	3.00	A1
2	7.20	3.67	A3	6.35	3.23	A1	6.75	3.44	A1
3	4.30	2.19	A1	6.00	3.06	A1	7.50	3.82	A1
4	7.50	3.82	A1	8.55	4.35	A3	7.15	3.64	A1
5	6.95	3.54	A1	5.85	2.98	A3	7.85	4.00	A1
średnia	6.65	3.39	średnia	6.90	3.51	średnia	7.03	3.58	
	SD	0.68		SD	0.61		SD	0.38	
A1 = 73% A2+A3 = 27% A2 = 0% A3 = 27%									

HD									
nr	C30 [kN]	C30 [MPa]	typ zniszczenia	C40 [kN]	C40 [MPa]	typ zniszczenia	C45 [kN]	C45 [MPa]	typ zniszczenia
1	6.15	3.13	A3	7.40	3.77	A3	6.40	3.26	A1
2	7.10	3.62	A3	7.75	3.95	A3	7.85	4.00	A3
3	7.85	4.00	A1	5.90	3.00	A1	6.80	3.46	A3
4	6.15	3.13	A1	7.15	3.64	A3	8.25	4.20	A3
5	7.45	3.79	A3	6.55	3.34	A2	5.90	3.00	A3
średnia	6.94	3.53	średnia	6.95	3.54	średnia	7.04	3.59	
	SD	0.39		SD	0.37		SD	0.50	
A1 = 27% A2+A3 = 73% A2 = 7% A3 = 67%									

Załącznik III c.d.

Wytrzymałość na rozciąganie w warstwie przypowierzchniowej podłoża betonowego
 f_{hs} - Grupa B

LC									
nr	C30 [kN]	C30 [MPa]	typ zniszczenia	C40 [kN]	C40 [MPa]	typ zniszczenia	C50 [kN]	C50 [MPa]	typ zniszczenia
1	5.36	2.73	A3	7.87	4.01	A3	10.78	5.49	A3
2	5.26	2.68	A1	7.66	3.90	A3	9.48	4.83	A3
3	7.17	3.65	A3	7.97	4.06	A2	9.07	4.62	A3
średnia	5.93	3.02	średnia	7.83	3.99	średnia	9.78	4.98	
	SD	0.55		SD	0.08		SD	0.45	
A1 = 7% A2+A3 = 93% A2 = 15% A3 = 78%									

NT									
nr	C25 [kN]	C25 [MPa]	typ zniszczenia	C35 [kN]	C35 [MPa]	typ zniszczenia	C50 [kN]	C50 [MPa]	typ zniszczenia
1	5.34	2.72	A1	6.89	3.51	A2	9.60	4.89	A3
2	6.13	3.12	A1	6.52	3.32	A1/A2	9.13	4.65	A1:A2
3	6.81	3.47	A3	6.44	3.28	A3	8.99	4.58	A1:A2:A3
średnia	6.09	3.10	średnia	6.62	3.37	średnia	9.24	4.71	
	SD	0.38		SD	0.12		SD	0.16	
A1 = 33% A2+A3 = 67% A2 = 22% A3 = 45%									

SB-W									
nr	C30 [kN]	C30 [MPa]	typ zniszczenia	C40 [kN]	C40 [MPa]	typ zniszczenia	C50 [kN]	C50 [MPa]	typ zniszczenia
1	7.21	3.67	A3	5.56	2.83	A2:A3	9.50	4.84	A1
2	4.69	2.39	A1/A2	4.77	2.43	A1	8.29	4.22	A1
3	6.64	3.38	A1	5.32	2.71	A1	8.58	4.37	A1
średnia	6.18	3.15	średnia	5.22	2.66	średnia	8.79	4.48	
	SD	0.67		SD	0.21		SD	0.32	
A1 = 77% A2+A3 = 23% A2 = 9% A3 = 14%									

SC									
nr	C30 [kN]	C30 [MPa]	typ zniszczenia	C40 [kN]	C40 [MPa]	typ zniszczenia	C50 [kN]	C50 [MPa]	typ zniszczenia
1	6.87	3.50	A1	7.38	3.76	A1:A2	7.48	3.81	A1
2	5.20	2.65	A1	6.72	3.42	A1	8.11	4.13	A1
3	5.30	2.70	A1	5.89	3.00	A1	8.52	4.34	A2:A3
średnia	5.79	2.95		6.66	3.39		8.04	4.09	
	SD	0.48		SD	0.38		SD	0.27	
A1 = 80% A2+A3 = 20% A2 = 11% A3 = 9%									

Załącznik IV

Wytrzymałość na rozciąganie przy odrywaniu warstwy naprawczej od podłoża betonowego
 f_h -Grupa A

PL									
nr	C30 [kN]	C30 [MPa]	typ zniszczenia	C40 [kN]	C40 [MPa]	typ zniszczenia	C50 [kN]	C50 [MPa]	typ zniszczenia
1	5.40	2.75	A/B	3.30	1.68	A/B	2.20	1.12	A/B
2	4.40	2.24	A/B	7.20	3.67	A/B	1.00	0.51	A/B
3	3.30	1.68	A/B	3.30	1.68	A/B	1.60	0.81	A/B
4	2.90	1.48	A/B	5.40	2.75	A/B	1.50	0.76	A/B
5	2.80	1.43	A/B	4.00	2.04	A/B	2.10	1.07	A/B
średnia	3.76	1.91	średnia	4.64	2.36	średnia	1.68	0.86	
	SD	0.57		SD	0.85		SD	0.25	
	B = 0%			A/B = 100.00%			A = 0%		

SB-D									
nr	C30 [kN]	C30 [MPa]	typ zniszczenia	C40 [kN]	C40 [MPa]	typ zniszczenia	C50 [kN]	C50 [MPa]	typ zniszczenia
1	4.00	2.04	A/B	4.50	2.29	A/B	5.50	2.80	B
2	3.80	1.94	A	4.30	2.19	A/B	3.00	1.53	A
3	4.10	2.09	A/B	3.20	1.63	A/B	4.20	2.14	A/B
4	4.30	2.19	A/B	5.00	2.55	A/B	3.40	1.73	A
5	3.80	1.94	A/B	4.50	2.29	A/B	5.10	2.60	A/B
średnia	4.00	2.04	średnia	4.30	2.19	średnia	4.24	2.16	
	SD	0.11		SD	0.34		SD	0.54	
	B = 7%			A/B = 73.33%			A = 20%		

JH									
nr	C30 [kN]	C30 [MPa]	typ zniszczenia	C40 [kN]	C40 [MPa]	typ zniszczenia	C50 [kN]	C50 [MPa]	typ zniszczenia
1	3.30	1.68	A	2.50	1.27	A	3.20	1.63	A
2	2.80	1.43	A	3.70	1.88	A	2.90	1.48	A
3	1.20	0.61	A	2.70	1.38	A	3.70	1.88	A
4	1.30	0.66	A	3.00	1.53	A	3.70	1.88	A
5	1.40	0.71	A	2.00	1.02	A	2.80	1.43	A
średnia	2.00	1.02	średnia	2.78	1.42	średnia	3.26	1.66	
	SD	0.50		SD	0.32		SD	0.22	
	B = 0%			A/B = 0.00%			A = 100%		

HD									
nr	C30 [kN]	C30 [MPa]	typ zniszczenia	C40 [kN]	C40 [MPa]	typ zniszczenia	C50 [kN]	C50 [MPa]	typ zniszczenia
1	4.80	2.44	A	4.10	2.09	A	5.60	2.85	A/B
2	5.00	2.55	A	5.70	2.90	B	3.00	1.53	A/B
3	3.60	1.83	A	5.70	2.90	A/B	5.10	2.60	A/B
4	5.60	2.85	A	6.60	3.36	A	4.10	2.09	A/B
5	5.60	2.85	A/B	2.80	1.43	B	4.80	2.44	A/B
średnia	4.92	2.51	średnia	4.98	2.54	średnia	4.52	2.30	
	SD	0.42		SD	0.77		SD	0.51	
	B = 13%			A/B = 46.67%			A = 40%		

Załącznik IV c.d.

Wytrzymałość na rozciąganie przy odrywaniu warstwy naprawczej od podłoża betonowego
 f_h -Grupa B

LC									
nr	C30 [kN]	C30 [MPa]	typ zniszczenia	C40 [kN]	C40 [MPa]	typ zniszczenia	C50 [kN]	C50 [MPa]	typ zniszczenia
1	4.91	2.50	A/B	1.59	0.81	A/B	0.00	0.00	A/B
2	4.06	2.07	B	2.65	1.35	A/B	0.00	0.00	A/B
3	4.08	2.08	A	2.57	1.31	A/B	0.00	0.00	A/B
4	4.18	2.13	A	4.30	2.19	A/B	0.00	0.00	A/B
średnia	4.31	2.20	średnia	2.78	1.42	średnia	0.00	0.00	
	SD	0.21		SD	0.57		SD	0.00	
	B = 8%			A/B = 75%			A = 17%		

NT									
nr	C25 [kN]	C25 [MPa]	typ zniszczenia	C35 [kN]	C35 [MPa]	typ zniszczenia	C50 [kN]	C50 [MPa]	typ zniszczenia
1	3.67	1.87	A/B	0.00	0.00	A/B	0.00	0.00	A/B ^{*)}
2	1.96	1.00	A/B	0.00	0.00	A/B	0.00	0.00	A/B ^{*)}
3	3.34	1.70	A/B	1.00	0.51	A/B	0.00	0.00	A/B ^{*)}
4	3.57	1.82	A/B	0.00	0.00	A/B	0.00	0.00	A/B ^{*)}
średnia	3.14	1.60	średnia	0.25	0.13	średnia	0.00	0.00	
	SD	0.40		SD	0.26		SD	0.00	
	B = 0%			A/B = 100%			A = 0%		

SB-W									
nr	C30 [kN]	C30 [MPa]	typ zniszczenia	C40 [kN]	C40 [MPa]	typ zniszczenia	C50 [kN]	C50 [MPa]	typ zniszczenia
1	1.71	0.87	B	4.40	2.24	A/B	0.00	0.00	A/B ^{*)}
2	5.95	3.03	A	3.57	1.82	A	0.00	0.00	A/B ^{*)}
3	5.77	2.94	A	2.95	1.50	A/B	0.00	0.00	A/B ^{*)}
4	5.89	3.00	A	5.38	2.74	A	1.08	0.55	A/B
średnia	4.83	2.46	średnia	4.07	2.08	średnia	0.27	0.14	
	SD	1.06		SD	0.54		SD	0.28	
	B = 8%			A/B = 50%			A = 42%		

SC									
nr	C30 [kN]	C30 [MPa]	typ zniszczenia	C40 [kN]	C40 [MPa]	typ zniszczenia	C50 [kN]	C50 [MPa]	typ zniszczenia
1	4.87	2.48	A	3.85	1.96	A	0.90	0.46	A/B
2	2.65	1.35	A	2.55	1.30	B	1.02	0.52	A/B
3	2.69	1.37	A	4.87	2.48	B	1.53	0.78	A/B
4	1.96	1.00	A	2.95	1.50	A	0.94	0.48	A/B
średnia	3.04	1.55	średnia	3.55	1.81	średnia	1.10	0.56	
	SD	0.64		SD	0.53		SD	0.15	
	B = 16%			A/B = 42%			A = 42%		

^{*)} zniszczenie przy wierceniu

Załącznik V

Wartości maksymalnych amplitud charakterystycznych pików w widmie częstotliwości
Ab - Grupa A

PL											
nr	C30	nr	C30	nr	C40	nr	C40	nr	C45	nr	C45
1	0.564	6	0.304	1	0.154	6	0.159	1	0.526	6	0.246
2	0.625	7	0.384	2	0.194	7	0.082	2	0.067	7	0.409
3	0.125	8	0.389	3	0.123	8	0.081	3	0.084	8	0.258
4	0.182	9	0.187	4	0.168	9	0.031	4	0.167	9	0.067
5	0.162	10	0.228	5	0.304	10	0.294	5	0.046	10	0.088
średnia			0.315	średnia			0.159	średnia			0.196
SD			0.173	SD			0.088	SD			0.164

SB-D											
nr	C30	nr	C30	nr	C40	nr	C40	nr	C45	nr	C45
1	0.674	6	0.401	1	0.112	6	0.041	1	0.165	6	0.455
2	0.541	7	0.315	2	0.167	7	0.092	2	0.225	7	0.172
3	0.479	8	0.130	3	0.044	8	0.161	3	0.572	8	0.604
4	0.264	9	0.162	4	0.288	9	0.101	4	0.589	9	0.532
5	0.425	10	0.196	5	0.100	10	0.059	5	0.660	10	0.303
średnia			0.359	średnia			0.116	średnia			0.428
SD			0.177	SD			0.074	SD			0.193

JH											
nr	C30	nr	C30	nr	C40	nr	C40	nr	C45	nr	C45
1	0.162	6	0.182	1	0.111	6	0.333	1	0.115	6	0.111
2	0.142	7	0.283	2	0.027	7	0.236	2	0.111	7	0.066
3	0.247	8	0.361	3	0.044	8	0.083	3	0.160	8	0.131
4	0.326	9	0.400	4	0.517	9	0.170	4	0.165	9	0.179
5	0.265	10	0.133	5	0.236	10	0.074	5	0.173	10	0.212
średnia			0.250	średnia			0.183	średnia			0.142
SD			0.094	SD			0.153	SD			0.043

HD											
nr	C30	nr	C30	nr	C40	nr	C40	nr	C45	nr	C45
1	0.168	6	0.290	1	0.109	6	0.072	1	0.196	6	0.404
2	0.326	7	0.144	2	0.038	7	0.014	2	0.040	7	0.324
3	0.134	8	0.113	3	0.111	8	0.074	3	0.091	8	0.142
4	0.113	9	0.292	4	0.220	9	0.053	4	0.089	9	0.294
5	0.121	10	0.206	5	0.242	10	0.193	5	0.066	10	0.375
średnia			0.191	średnia			0.113	średnia			0.202
SD			0.083	SD			0.079	SD			0.136

Załącznik V c.d.

Wartości maksymalnych amplitud charakterystycznych pików w widmie częstotliwości
Ai - Grupa A

PL											
nr	C30	nr	C30	nr	C40	nr	C40	nr	C45	nr	C45
1	0.026	6	0.018	1	0.010	6	0.036	1	0.040	6	0.059
2	0.021	7	0.032	2	0.039	7	0.005	2	0.027	7	0.051
3	0.014	8	0.007	3	0.034	8	0.006	3	0.023	8	0.030
4	0.007	9	0.011	4	0.079	9	0.005	4	0.038	9	0.018
5	0.016	10	0.016	5	0.049	10	0.016	5	0.016	10	0.024
średnia			0.017	średnia			0.028	średnia			0.032
SD			0.008	SD			0.024	SD			0.014

SB-D											
nr	C30	nr	C30	nr	C40	nr	C40	nr	C45	nr	C45
1	0.278	6	0.053	1	0.039	6	0.005	1	0.059	6	0.134
2	0.086	7	0.054	2	0.027	7	0.006	2	0.083	7	0.061
3	0.028	8	0.010	3	0.010	8	0.008	3	0.050	8	0.165
4	0.029	9	0.035	4	0.044	9	0.016	4	0.059	9	0.099
5	0.047	10	0.010	5	0.024	10	0.016	5	0.051	10	0.046
średnia			0.063	średnia			0.019	średnia			0.081
SD			0.079	SD			0.014	SD			0.040

JH											
nr	C30	nr	C30	nr	C40	nr	C40	nr	C45	nr	C45
1	0.101	6	0.115	1	0.088	6	0.144	1	0.020	6	0.011
2	0.034	7	0.054	2	0.030	7	0.051	2	0.016	7	0.029
3	0.075	8	0.028	3	0.042	8	0.018	3	0.021	8	0.026
4	0.085	9	0.020	4	0.106	9	0.064	4	0.017	9	0.034
5	0.112	10	0.046	5	0.012	10	0.022	5	0.031	10	0.049
średnia			0.067	średnia			0.058	średnia			0.025
SD			0.035	SD			0.043	SD			0.011

HD											
nr	C30	nr	C30	nr	C40	nr	C40	nr	C45	nr	C45
1	0.008	6	0.018	1	0.065	6	0.004	1	0.038	6	0.034
2	0.023	7	0.118	2	0.016	7	0.002	2	0.012	7	0.066
3	0.060	8	0.052	3	0.022	8	0.007	3	0.021	8	0.012
4	0.040	9	0.108	4	0.046	9	0.006	4	0.041	9	0.042
5	0.032	10	0.110	5	0.017	10	0.005	5	0.014	10	0.040
średnia			0.057	średnia			0.019	średnia			0.032
SD			0.041	SD			0.021	SD			0.017

Załącznik V c.d.

Wartości maksymalnych amplitud charakterystycznych pików w widmie częstotliwości
Ab - Grupa B

LC					
nr	C25	nr	C35	nr	C50
1	0.444	1	1.153	1	0.497
2	1.292	2	0.500	2	0.772
3	1.792	3	0.418	3	0.367
4	1.556	4	0.818	4	1.292
5	0.294	5	1.389	5	2.606
6	1.120	6	2.717	6	0.208
7	0.559	7	1.655	7	0.410
średnia	1.008	średnia	1.236	średnia	0.879
SD	0.583	SD	0.794	SD	0.841

NT					
nr	C25	nr	C35	nr	C50
1	0.713	1	0.364	1	0.420
2	0.220	2	0.590	2	0.344
3	0.254	3	0.689	3	0.381
4	1.009	4	1.429	4	0.114
5	0.605	5	1.027	5	0.245
6	0.331	6	1.268	6	0.342
7	0.917	7	0.833	7	0.391
średnia	0.578	średnia	0.886	średnia	0.320
SD	0.320	SD	0.379	SD	0.107

SB-W					
nr	C25	nr	C35	nr	C50
1	0.464	1	0.928	1	0.781
2	0.301	2	0.454	2	2.101
3	0.289	3	0.876	3	0.899
4	0.212	4	1.096	4	1.105
5	0.153	5	1.083	5	1.146
6	0.230	6	0.916	6	0.428
7	0.572	7	0.804	7	1.050
średnia	0.317	średnia	0.879	średnia	1.073
SD	0.149	SD	0.216	SD	0.516

SC					
nr	C25	nr	C35	nr	C50
1	0.947	1	0.333	1	1.138
2	0.565	2	0.488	2	0.908
3	0.839	3	0.525	3	1.416
4	1.204	4	0.193	4	0.628
5	0.332	5	0.230	5	0.674
6	0.265	6	0.250	6	0.785
7	0.345	7	0.536	7	0.439
średnia	0.642	średnia	0.365	średnia	0.855
SD	0.361	SD	0.148	SD	0.332

Załącznik V c.d.

Wartości maksymalnych amplitud charakterystycznych pików w widmie częstotliwości
Ab - Grupa B

LC					
nr	C25	nr	C35	nr	C50
1	0.024	1	0.352	1	0.066
2	0.048	2	0.162	2	0.082
3	0.069	3	0.029	3	0.118
4	0.046	4	0.015	4	0.088
5	0.042	5	0.161	5	0.169
6	0.099	6	0.245	6	0.026
7	0.030	7	0.219	7	0.034
średnia	0.051	średnia	0.169	średnia	0.083
SD	0.025	SD	0.119	SD	0.049

NT					
nr	C25	nr	C35	nr	C50
1	0.032	1	0.012	1	0.122
2	0.027	2	0.078	2	0.026
3	0.022	3	0.062	3	0.056
4	0.025	4	0.159	4	0.015
5	0.015	5	0.038	5	0.038
6	0.011	6	0.043	6	0.033
7	0.020	7	0.041	7	0.046
średnia	0.022	średnia	0.062	średnia	0.048
SD	0.007	SD	0.047	SD	0.035

SB-W					
nr	C25	nr	C35	nr	C50
1	0.015	1	0.099	1	0.025
2	0.051	2	0.043	2	0.086
3	0.032	3	0.071	3	0.029
4	0.023	4	0.063	4	0.043
5	0.033	5	0.104	5	0.057
6	0.032	6	0.037	6	0.018
7	0.028	7	0.045	7	0.041
średnia	0.031	średnia	0.066	średnia	0.043
SD	0.011	SD	0.027	SD	0.023

SC					
nr	C25	nr	C35	nr	C50
1	0.030	1	0.031	1	0.040
2	0.040	2	0.028	2	0.040
3	0.066	3	0.021	3	0.057
4	0.071	4	0.016	4	0.045
5	0.027	5	0.009	5	0.038
6	0.016	6	0.020	6	0.021
7	0.021	7	0.009	7	0.010
średnia	0.039	średnia	0.019	średnia	0.036
SD	0.022	SD	0.009	SD	0.016

Załącznik VI

Wartości średniego odchylenia bezwzględnego detali

D2_MAD - Grupa A

PL											
nr	C30	nr	C30	nr	C40	nr	C40	nr	C45	nr	C45
1	0.0460	6	0.0469	1	0.0484	6	0.0630	1	0.0358	6	0.0306
2	0.0363	7	0.0452	2	0.0343	7	0.0367	2	0.0329	7	0.0442
3	0.0377	8	0.0408	3	0.0316	8	0.0213	3	0.0363	8	0.0331
4	0.0330	9	0.0362	4	0.0658	9	0.0447	4	0.0354	9	0.0381
5	0.0421	10	0.0297	5	0.0279	10	0.0257	5	0.0444	10	0.0485
średnia		0.0394		średnia		0.0399		średnia		0.0379	
SD		0.0058		SD		0.0153		SD		0.0058	

SB-D											
nr	C30	nr	C30	nr	C40	nr	C40	nr	C45	nr	C45
1	0.0391	6	0.0438	1	0.0257	6	0.0383	1	0.0488	6	0.0391
2	0.0379	7	0.0482	2	0.0394	7	0.0182	2	0.0328	7	0.0457
3	0.0254	8	0.0287	3	0.0387	8	0.0183	3	0.0278	8	0.0367
4	0.0294	9	0.0282	4	0.0515	9	0.0130	4	0.0463	9	0.0359
5	0.0295	10	0.0343	5	0.0384	10	0.0341	5	0.0260	10	0.0365
średnia		0.0344		średnia		0.0316		średnia		0.0376	
SD		0.0076		SD		0.0122		SD		0.0077	

JH											
nr	C30	nr	C30	nr	C40	nr	C40	nr	C45	nr	C45
1	0.0811	6	0.0566	1	0.0387	6	0.0184	1	0.0454	6	0.0580
2	0.0654	7	0.0470	2	0.0317	7	0.0238	2	0.0354	7	0.0444
3	0.0538	8	0.0233	3	0.0217	8	0.0313	3	0.0562	8	0.0751
4	0.0506	9	0.0277	4	0.0374	9	0.0329	4	0.0475	9	0.0663
5	0.0440	10	0.0325	5	0.0296	10	0.0291	5	0.0493	10	0.0448
średnia		0.0482		średnia		0.0295		średnia		0.0522	
SD		0.0176		SD		0.0065		SD		0.0118	

HD											
nr	C30	nr	C30	nr	C40	nr	C40	nr	C45	nr	C45
1	0.0338	6	0.0378	1	0.0379	6	0.0191	1	0.0436	6	0.0490
2	0.0422	7	0.0367	2	0.0207	7	0.0106	2	0.0259	7	0.0423
3	0.0481	8	0.0339	3	0.0276	8	0.0166	3	0.0233	8	0.0240
4	0.0411	9	0.0494	4	0.0367	9	0.0168	4	0.0355	9	0.0441
5	0.0352	10	0.0498	5	0.0308	10	0.0211	5	0.0292	10	0.0488
średnia		0.0408		średnia		0.0238		średnia		0.0366	
SD		0.0064		SD		0.0091		SD		0.0102	

Załącznik VI c.d.

Wartości średniego odchylenia bezwzględnego detali

D3_MAD - Grupa A

PL											
nr	C30	nr	C30	nr	C40	nr	C40	nr	C45	nr	C45
1	0.0829	6	0.0691	1	0.0716	6	0.1112	1	0.0681	6	0.0673
2	0.0526	7	0.0745	2	0.0471	7	0.0711	2	0.0606	7	0.0631
3	0.0529	8	0.0749	3	0.0572	8	0.0547	3	0.0741	8	0.0608
4	0.0556	9	0.0736	4	0.1367	9	0.0710	4	0.0658	9	0.0773
5	0.0794	10	0.0548	5	0.0672	10	0.0506	5	0.0777	10	0.0907
średnia			0.0670	średnia			0.0738	średnia			0.0705
SD			0.0118	SD			0.0285	SD			0.0094

SB-D											
nr	C30	nr	C30	nr	C40	nr	C40	nr	C45	nr	C45
1	0.0811	6	0.0826	1	0.0505	6	0.0719	1	0.1066	6	0.0902
2	0.1035	7	0.0945	2	0.0747	7	0.0315	2	0.0565	7	0.0988
3	0.0609	8	0.0615	3	0.0779	8	0.0352	3	0.0620	8	0.0867
4	0.0651	9	0.0629	4	0.0855	9	0.0329	4	0.0776	9	0.0625
5	0.0754	10	0.0638	5	0.0867	10	0.0637	5	0.0409	10	0.0628
średnia			0.0751	średnia			0.0610	średnia			0.0745
SD			0.0150	SD			0.0218	SD			0.0209

JH											
nr	C30	nr	C30	nr	C40	nr	C40	nr	C45	nr	C45
1	0.1382	6	0.0919	1	0.0697	6	0.0341	1	0.0846	6	0.1304
2	0.1338	7	0.0924	2	0.0678	7	0.0477	2	0.0794	7	0.0917
3	0.0880	8	0.0582	3	0.0331	8	0.0648	3	0.0999	8	0.1591
4	0.0922	9	0.0781	4	0.0923	9	0.0544	4	0.1042	9	0.1228
5	0.1122	10	0.0656	5	0.0589	10	0.0468	5	0.1054	10	0.0898
średnia			0.0950	średnia			0.0570	średnia			0.1067
SD			0.0264	SD			0.0179	SD			0.0244

HD											
nr	C30	nr	C30	nr	C40	nr	C40	nr	C45	nr	C45
1	0.0592	6	0.0929	1	0.0461	6	0.0476	1	0.0953	6	0.0923
2	0.0851	7	0.0653	2	0.0429	7	0.0260	2	0.0497	7	0.1016
3	0.0683	8	0.0594	3	0.0447	8	0.0450	3	0.0470	8	0.0583
4	0.0621	9	0.1087	4	0.0700	9	0.0454	4	0.0580	9	0.0982
5	0.0624	10	0.1084	5	0.0660	10	0.0520	5	0.0393	10	0.1063
średnia			0.0772	średnia			0.0486	średnia			0.0746
SD			0.0200	SD			0.0123	SD			0.0263

Załącznik VI c.d.

Wartości średniego odchylenia bezwzględnego detali
D2_MAD - Grupa B

LC					
nr	C25	nr	C35	nr	C50
1	0.0346	1	0.0658	1	0.0423
2	0.0519	2	0.0519	2	0.0547
3	0.0659	3	0.0389	3	0.0513
4	0.0540	4	0.0447	4	0.0538
5	0.0365	5	0.0624	5	0.0721
6	0.0553	6	0.1458	6	0.0292
7	0.0353	7	0.0931	7	0.0369
średnia	0.0476	średnia	0.0718	średnia	0.0486
SD	0.0122	SD	0.0371	SD	0.0140

NT					
nr	C25	nr	C35	nr	C50
1	0.0417	1	0.0320	1	0.0621
2	0.0309	2	0.0360	2	0.0458
3	0.0281	3	0.0391	3	0.0571
4	0.0441	4	0.0592	4	0.0265
5	0.0336	5	0.0468	5	0.0392
6	0.0264	6	0.0480	6	0.0358
7	0.0459	7	0.0426	7	0.0435
średnia	0.0358	średnia	0.0434	średnia	0.0443
SD	0.0080	SD	0.0090	SD	0.0122

SB-W					
nr	C25	nr	C35	nr	C50
1	0.0359	1	0.0561	1	0.0583
2	0.0401	2	0.0390	2	0.0670
3	0.0376	3	0.0542	3	0.0420
4	0.0247	4	0.0495	4	0.0521
5	0.0248	5	0.0579	5	0.0517
6	0.0290	6	0.0420	6	0.0292
7	0.0429	7	0.0468	7	0.0434
średnia	0.0336	średnia	0.0493	średnia	0.0491
SD	0.0074	SD	0.0072	SD	0.0123

SC					
nr	C25	nr	C35	nr	C50
1	0.0428	1	0.0316	1	0.0463
2	0.0362	2	0.0367	2	0.0481
3	0.0483	3	0.0358	3	0.0539
4	0.0543	4	0.0309	4	0.0441
5	0.0325	5	0.0212	5	0.0503
6	0.0266	6	0.0302	6	0.0424
7	0.0335	7	0.0249	7	0.0282
średnia	0.0392	średnia	0.0302	średnia	0.0448
SD	0.0097	SD	0.0056	SD	0.0083

Załącznik VI c.d.

Wartości średniego odchylenia bezwzględnego detali

D3_MAD - Grupa B

LC					
nr	C25	nr	C35	nr	C50
1	0.0777	1	0.1676	1	0.0944
2	0.1399	2	0.1055	2	0.1181
3	0.1381	3	0.0966	3	0.1413
4	0.1428	4	0.1145	4	0.1216
5	0.0902	5	0.1838	5	0.1557
6	0.1315	6	0.3691	6	0.0785
7	0.0927	7	0.2645	7	0.0751
średnia	0.1161	średnia	0.1859	średnia	0.1121
SD	0.0280	SD	0.0997	SD	0.0308

NT					
nr	C25	nr	C35	nr	C50
1	0.0906	1	0.0812	1	0.1277
2	0.0582	2	0.0911	2	0.0959
3	0.0598	3	0.0996	3	0.1365
4	0.1080	4	0.1571	4	0.0583
5	0.0830	5	0.1082	5	0.0817
6	0.0738	6	0.1192	6	0.0843
7	0.1373	7	0.1278	7	0.1030
średnia	0.0872	średnia	0.1120	średnia	0.0982
SD	0.0281	SD	0.0255	SD	0.0272

SB-W					
nr	C25	nr	C35	nr	C50
1	0.1023	1	0.1109	1	0.1544
2	0.0852	2	0.0896	2	0.1690
3	0.0883	3	0.1190	3	0.1203
4	0.0785	4	0.1193	4	0.1397
5	0.0711	5	0.0962	5	0.1268
6	0.0786	6	0.1180	6	0.0924
7	0.1046	7	0.1216	7	0.1251
średnia	0.0870	średnia	0.1106	średnia	0.1325
SD	0.0125	SD	0.0127	SD	0.0249

SC					
nr	C25	nr	C35	nr	C50
1	0.1154	1	0.0766	1	0.1357
2	0.0984	2	0.0866	2	0.1431
3	0.0876	3	0.0807	3	0.1190
4	0.1155	4	0.0883	4	0.1204
5	0.0721	5	0.0495	5	0.1122
6	0.0756	6	0.0815	6	0.1050
7	0.0804	7	0.0646	7	0.0735
średnia	0.0921	średnia	0.0754	średnia	0.1156
SD	0.0181	SD	0.0138	SD	0.0227

Załącznik VII

Wartości odchylenia standardowego detali

D2_SD -Grupa A

PL											
nr	C30	nr	C30	nr	C40	nr	C40	nr	C45	nr	C45
1	0.0710	6	0.0718	1	0.0706	6	0.0886	1	0.0572	6	0.0499
2	0.0541	7	0.0716	2	0.0521	7	0.0562	2	0.0542	7	0.0627
3	0.0565	8	0.0637	3	0.0484	8	0.0437	3	0.0593	8	0.0556
4	0.0495	9	0.0593	4	0.0990	9	0.0684	4	0.0602	9	0.0656
5	0.0662	10	0.0492	5	0.0465	10	0.0430	5	0.0653	10	0.0767
średnia		0.0613		średnia		0.0617		średnia		0.0607	
SD		0.0088		SD		0.0196		SD		0.0075	

SB-D											
nr	C30	nr	C30	nr	C40	nr	C40	nr	C45	nr	C45
1	0.0648	6	0.0627	1	0.0455	6	0.0597	1	0.0787	6	0.0673
2	0.0617	7	0.0659	2	0.0683	7	0.0387	2	0.0549	7	0.0689
3	0.0444	8	0.0502	3	0.0658	8	0.0372	3	0.0466	8	0.0599
4	0.0472	9	0.0467	4	0.0851	9	0.0300	4	0.0667	9	0.0593
5	0.0501	10	0.0545	5	0.0635	10	0.0567	5	0.0448	10	0.0631
średnia		0.0548		średnia		0.0550		średnia		0.0610	
SD		0.0082		SD		0.0170		SD		0.0103	

JH											
nr	C30	nr	C30	nr	C40	nr	C40	nr	C45	nr	C45
1	0.1173	6	0.0846	1	0.0592	6	0.0317	1	0.0747	6	0.0862
2	0.0998	7	0.0695	2	0.0526	7	0.0435	2	0.0631	7	0.0724
3	0.0856	8	0.0417	3	0.0388	8	0.0512	3	0.0898	8	0.1188
4	0.0759	9	0.0469	4	0.0586	9	0.0549	4	0.0766	9	0.1027
5	0.0692	10	0.0525	5	0.0506	10	0.0467	5	0.0784	10	0.0718
średnia		0.0743		średnia		0.0488		średnia		0.0834	
SD		0.0237		SD		0.0087		SD		0.0166	

HD											
nr	C30	nr	C30	nr	C40	nr	C40	nr	C45	nr	C45
1	0.0522	6	0.0573	1	0.0621	6	0.0367	1	0.0615	6	0.0763
2	0.0659	7	0.0601	2	0.0371	7	0.0226	2	0.0397	7	0.0725
3	0.0718	8	0.0554	3	0.0453	8	0.0324	3	0.0406	8	0.0434
4	0.0633	9	0.0768	4	0.0605	9	0.0327	4	0.0537	9	0.0712
5	0.0556	10	0.0716	5	0.0539	10	0.0372	5	0.0444	10	0.0767
średnia		0.0630		średnia		0.0421		średnia		0.0580	
SD		0.0083		SD		0.0130		SD		0.0154	

Załącznik VII c.d.

Wartości odchylenia standardowego detali

D3_SD -Grupa A

PL											
nr	C30	nr	C30	nr	C40	nr	C40	nr	C45	nr	C45
1	0.1208	6	0.0895	1	0.1060	6	0.1649	1	0.0968	6	0.0971
2	0.0796	7	0.1051	2	0.0660	7	0.1035	2	0.0830	7	0.0952
3	0.0786	8	0.1147	3	0.0805	8	0.0810	3	0.1011	8	0.0923
4	0.0826	9	0.1069	4	0.2094	9	0.1106	4	0.0884	9	0.1167
5	0.1188	10	0.0845	5	0.0994	10	0.0814	5	0.1065	10	0.1293
średnia			0.0981	średnia			0.1103	średnia			0.1006
SD			0.0169	SD			0.0441	SD			0.0138

SB-D											
nr	C30	nr	C30	nr	C40	nr	C40	nr	C45	nr	C45
1	0.1164	6	0.1116	1	0.0788	6	0.1045	1	0.1361	6	0.1261
2	0.1407	7	0.1274	2	0.1072	7	0.0552	2	0.0875	7	0.1389
3	0.0869	8	0.0908	3	0.1091	8	0.0577	3	0.0885	8	0.1156
4	0.0974	9	0.0889	4	0.1249	9	0.0631	4	0.1059	9	0.0911
5	0.1052	10	0.0970	5	0.1293	10	0.0934	5	0.0615	10	0.0921
średnia			0.1062	średnia			0.0923	średnia			0.1043
SD			0.0178	SD			0.0273	SD			0.0247

JH											
nr	C30	nr	C30	nr	C40	nr	C40	nr	C45	nr	C45
1	0.2043	6	0.1274	1	0.0935	6	0.0559	1	0.1251	6	0.2036
2	0.2004	7	0.1318	2	0.0921	7	0.0774	2	0.1173	7	0.1368
3	0.1277	8	0.0860	3	0.0606	8	0.0955	3	0.1453	8	0.2320
4	0.1329	9	0.1072	4	0.1249	9	0.0775	4	0.1661	9	0.1817
5	0.1616	10	0.0899	5	0.0839	10	0.0682	5	0.1515	10	0.1318
średnia			0.1369	średnia			0.0829	średnia			0.1591
SD			0.0409	SD			0.0201	SD			0.0369

HD											
nr	C30	nr	C30	nr	C40	nr	C40	nr	C45	nr	C45
1	0.0845	6	0.1265	1	0.0666	6	0.0737	1	0.1375	6	0.1287
2	0.1180	7	0.1008	2	0.0630	7	0.0441	2	0.0719	7	0.1369
3	0.1057	8	0.0847	3	0.0668	8	0.0666	3	0.0709	8	0.0868
4	0.0985	9	0.1573	4	0.1041	9	0.0690	4	0.0884	9	0.1441
5	0.0896	10	0.1539	5	0.1056	10	0.0811	5	0.0563	10	0.1531
średnia			0.1120	średnia			0.0741	średnia			0.1075
SD			0.0267	SD			0.0187	SD			0.0360

Załącznik VII c.d.

Wartości odchylenia standardowego detali

D2_SD -Grupa B

LC					
nr	C25	nr	C35	nr	C50
1	0.0605	1	0.1120	1	0.0719
2	0.0816	2	0.0922	2	0.0875
3	0.1194	3	0.0672	3	0.0837
4	0.0887	4	0.0725	4	0.0827
5	0.0706	5	0.1091	5	0.1096
6	0.0885	6	0.2591	6	0.0495
7	0.0574	7	0.1526	7	0.0587
średnia	0.0809	średnia	0.1235	średnia	0.0777
SD	0.0211	SD	0.0662	SD	0.0199

NT					
nr	C25	nr	C35	nr	C50
1	0.0749	1	0.0581	1	0.1004
2	0.0522	2	0.0667	2	0.0729
3	0.0468	3	0.0684	3	0.0831
4	0.0692	4	0.1020	4	0.0484
5	0.0556	5	0.0909	5	0.0614
6	0.0451	6	0.0812	6	0.0623
7	0.0733	7	0.0745	7	0.0716
średnia	0.0596	średnia	0.0774	średnia	0.0714
SD	0.0126	SD	0.0152	SD	0.0168

SB-W					
nr	C25	nr	C35	nr	C50
1	0.0608	1	0.0928	1	0.0831
2	0.0785	2	0.0682	2	0.0998
3	0.0626	3	0.0908	3	0.0662
4	0.0453	4	0.0861	4	0.0798
5	0.0427	5	0.0930	5	0.0823
6	0.0496	6	0.0823	6	0.0501
7	0.0791	7	0.0815	7	0.0668
średnia	0.0598	średnia	0.0850	średnia	0.0754
SD	0.0149	SD	0.0088	SD	0.0159

SC					
nr	C25	nr	C35	nr	C50
1	0.0705	1	0.0540	1	0.0749
2	0.0590	2	0.0547	2	0.0828
3	0.0880	3	0.0642	3	0.1023
4	0.0958	4	0.0582	4	0.0730
5	0.0570	5	0.0383	5	0.0868
6	0.0421	6	0.0609	6	0.0701
7	0.0521	7	0.0487	7	0.0508
średnia	0.0664	średnia	0.0541	średnia	0.0772
SD	0.0195	SD	0.0086	SD	0.0159

Załącznik VII c.d.

Wartości odchylenia standardowego detali

D3_SD -Grupa B

LC					
nr	C25	nr	C35	nr	C50
1	0.1120	1	0.2741	1	0.1438
2	0.2083	2	0.1642	2	0.1843
3	0.2014	3	0.1405	3	0.2111
4	0.2285	4	0.1837	4	0.1814
5	0.1311	5	0.3004	5	0.2277
6	0.2023	6	0.5696	6	0.1138
7	0.1483	7	0.3977	7	0.1161
średnia	0.1760	średnia	0.2900	średnia	0.1683
SD	0.0448	SD	0.1525	SD	0.0449

NT					
nr	C25	nr	C35	nr	C50
1	0.1257	1	0.1225	1	0.1871
2	0.0831	2	0.1374	2	0.1460
3	0.0981	3	0.1661	3	0.1864
4	0.1806	4	0.2417	4	0.0916
5	0.1448	5	0.1518	5	0.1111
6	0.1242	6	0.1694	6	0.1202
7	0.2139	7	0.1964	7	0.1456
średnia	0.1386	średnia	0.1693	średnia	0.1411
SD	0.0458	SD	0.0398	SD	0.0365

SB-W					
nr	C25	nr	C35	nr	C50
1	0.1682	1	0.1569	1	0.2353
2	0.1275	2	0.1365	2	0.2727
3	0.1588	3	0.1732	3	0.1910
4	0.1270	4	0.1967	4	0.2226
5	0.1092	5	0.1553	5	0.1853
6	0.1297	6	0.2108	6	0.1340
7	0.1480	7	0.2097	7	0.1993
średnia	0.1383	średnia	0.1770	średnia	0.2057
SD	0.0207	SD	0.0292	SD	0.0437

SC					
nr	C25	nr	C35	nr	C50
1	0.1966	1	0.1126	1	0.1932
2	0.1346	2	0.1225	2	0.2097
3	0.1297	3	0.1234	3	0.1670
4	0.2016	4	0.1443	4	0.1731
5	0.1052	5	0.0784	5	0.1572
6	0.1173	6	0.1374	6	0.1635
7	0.1225	7	0.0959	7	0.1211
średnia	0.1439	średnia	0.1164	średnia	0.1693
SD	0.0389	SD	0.0230	SD	0.0281

Załącznik VIII

Wartości zakresu detali

D2-RG - Grupa A

PL											
nr	C30	nr	C30	nr	C40	nr	C40	nr	C45	nr	C45
1	0.3900	6	0.4291	1	0.4675	6	0.5072	1	0.4675	6	0.2728
2	0.3131	7	0.4669	2	0.3107	7	0.3113	2	0.3510	7	0.3491
3	0.3455	8	0.4675	3	0.2710	8	0.3107	3	0.4297	8	0.4285
4	0.2924	9	0.3497	4	0.7037	9	0.3900	4	0.4297	9	0.5066
5	0.3131	10	0.3101	5	0.2338	10	0.2631	5	0.3503	10	0.5859
średnia			0.3677	średnia			0.3769	średnia			0.4171
SD			0.0665	SD			0.1452	SD			0.0905

SB-D											
nr	C30	nr	C30	nr	C40	nr	C40	nr	C45	nr	C45
1	0.4688	6	0.3119	1	0.3497	6	0.3125	1	0.4303	6	0.5072
2	0.4285	7	0.3503	2	0.4681	7	0.2716	2	0.3510	7	0.4285
3	0.2344	8	0.3503	3	0.4083	8	0.3101	3	0.3113	8	0.4108
4	0.2734	9	0.3107	4	0.5847	9	0.2710	4	0.3497	9	0.3705
5	0.2637	10	0.3497	5	0.4285	10	0.3406	5	0.3101	10	0.5450
średnia			0.3342	średnia			0.3745	średnia			0.4014
SD			0.0726	SD			0.0989	SD			0.0789

JH											
nr	C30	nr	C30	nr	C40	nr	C40	nr	C45	nr	C45
1	0.7806	6	0.6250	1	0.3503	6	0.1947	1	0.5457	6	0.4694
2	0.7031	7	0.4688	2	0.3900	7	0.2344	2	0.3888	7	0.5450
3	0.6244	8	0.2332	3	0.1947	8	0.2734	3	0.7025	8	1.0940
4	0.5078	9	0.2344	4	0.3119	9	0.3107	4	0.4681	9	0.7428
5	0.4681	10	0.3888	5	0.3497	10	0.3107	5	0.4291	10	0.3900
średnia			0.5034	średnia			0.2921	średnia			0.5775
SD			0.1847	SD			0.0667	SD			0.2181

HD											
nr	C30	nr	C30	nr	C40	nr	C40	nr	C45	nr	C45
1	0.3113	6	0.3510	1	0.4108	6	0.2332	1	0.3705	6	0.3894
2	0.4681	7	0.4297	2	0.2722	7	0.1544	2	0.2332	7	0.4681
3	0.3900	8	0.3113	3	0.3101	8	0.2087	3	0.2710	8	0.2728
4	0.3882	9	0.5469	4	0.4291	9	0.2325	4	0.2728	9	0.5859
5	0.2338	10	0.3900	5	0.4681	10	0.2332	5	0.2338	10	0.5457
średnia			0.3820	średnia			0.2952	średnia			0.3643
SD			0.0882	SD			0.1059	SD			0.1304

Załącznik VIII c.d.

Wartości zakresu detali

D3-RG - Grupa A

PL											
nr	C30	nr	C30	nr	C40	nr	C40	nr	C45	nr	C45
1	0.6910	6	0.4415	1	0.6064	6	1.0770	1	0.4976	6	0.5498
2	0.5796	7	0.5792	2	0.3297	7	0.6349	2	0.4126	7	0.5231
3	0.5485	8	0.7436	3	0.4942	8	0.4955	3	0.4959	8	0.5507
4	0.4816	9	0.5779	4	1.4640	9	0.7734	4	0.3854	9	0.6590
5	0.7717	10	0.5222	5	0.6068	10	0.5779	5	0.5658	10	0.7311
średnia			0.5937	średnia			0.7060	średnia			0.5371
SD			0.1091	SD			0.3315	SD			0.1031

SB-D											
nr	C30	nr	C30	nr	C40	nr	C40	nr	C45	nr	C45
1	0.6620	6	0.5231	1	0.4117	6	0.5248	1	0.5775	6	0.6612
2	0.6892	7	0.6888	2	0.5507	7	0.3289	2	0.4955	7	0.6620
3	0.3845	8	0.4700	3	0.5494	8	0.3699	3	0.5226	8	0.5516
4	0.5248	9	0.4398	4	0.6072	9	0.3837	4	0.5805	9	0.4816
5	0.5507	10	0.4674	5	0.6340	10	0.5494	5	0.3850	10	0.4821
średnia			0.5400	średnia			0.4910	średnia			0.5400
SD			0.1077	SD			0.1076	SD			0.0855

JH											
nr	C30	nr	C30	nr	C40	nr	C40	nr	C45	nr	C45
1	1.3810	6	0.6819	1	0.4670	6	0.3021	1	0.6336	6	1.3250
2	1.3530	7	0.7639	2	0.4825	7	0.4122	2	0.6068	7	0.7173
3	0.7453	8	0.4389	3	0.4665	8	0.5248	3	0.8563	8	1.4090
4	0.8045	9	0.5800	4	0.6340	9	0.4398	4	1.0770	9	1.1050
5	0.7730	10	0.4411	5	0.4670	10	0.3574	5	0.8839	10	0.7725
średnia			0.7963	średnia			0.4553	średnia			0.9386
SD			0.3283	SD			0.0901	SD			0.2803

HD											
nr	C30	nr	C30	nr	C40	nr	C40	nr	C45	nr	C45
1	0.4126	6	0.6344	1	0.3457	6	0.3832	1	0.8006	6	0.5783
2	0.5649	7	0.6077	2	0.3569	7	0.2179	2	0.3569	7	0.6612
3	0.5244	8	0.3845	3	0.4126	8	0.3289	3	0.3841	8	0.4683
4	0.6034	9	1.0220	4	0.5511	9	0.4372	4	0.5235	9	0.8563
5	0.3858	10	0.7717	5	0.7449	10	0.4950	5	0.2754	10	0.8843
średnia			0.5911	średnia			0.4273	średnia			0.5789
SD			0.1951	SD			0.1446	SD			0.2162

Załącznik VIII c.d.

Wartości zakresu detali

D2-RG - Grupa B

LC					
nr	C25	nr	C35	nr	C50
1	0.5487	1	0.8209	1	0.5078
2	0.6299	2	0.7422	2	0.5859
3	1.3960	3	0.4688	3	0.5463
4	0.7135	4	0.5469	4	0.4785
5	0.7050	5	0.7813	5	0.7422
6	0.7025	6	2.4220	6	0.3125
7	0.4535	7	1.2490	7	0.3485
średnia	0.7356	średnia	1.0044	średnia	0.5031
SD	0.3067	SD	0.6730	SD	0.1453

NT					
nr	C25	nr	C35	nr	C50
1	0.8099	1	0.3888	1	0.7422
2	0.5023	2	0.6250	2	0.4285
3	0.3717	3	0.5066	3	0.4285
4	0.5872	4	0.8984	4	0.3101
5	0.4883	5	0.9766	5	0.3699
6	0.3326	6	0.7031	6	0.4681
7	0.5872	7	0.6238	7	0.4877
średnia	0.5256	średnia	0.6746	średnia	0.4621
SD	0.1588	SD	0.2070	SD	0.1372

SB-W					
nr	C25	nr	C35	nr	C50
1	0.5225	1	0.5463	1	0.5444
2	0.8923	2	0.4694	2	0.7410
3	0.5811	3	0.6635	3	0.4285
4	0.3906	4	0.6635	4	0.5078
5	0.3320	5	0.6250	5	0.6635
6	0.4053	6	0.7813	6	0.3510
7	0.8344	7	0.6641	7	0.3931
średnia	0.5655	średnia	0.6304	średnia	0.5185
SD	0.2206	SD	0.0993	SD	0.1433

SC					
nr	C25	nr	C35	nr	C50
1	0.6036	1	0.3491	1	0.5457
2	0.4749	2	0.3491	2	0.6641
3	0.9900	3	0.3906	3	1.1330
4	0.9491	4	0.3900	4	0.5481
5	0.5902	5	0.3101	5	0.8606
6	0.3217	6	0.4291	6	0.5469
7	0.3680	7	0.3497	7	0.4279
średnia	0.6139	średnia	0.3668	średnia	0.6752
SD	0.2645	SD	0.0390	SD	0.2431

Załącznik VIII c.d.

Wartości zakresu detali

D3-RG - Grupa B

LC					
nr	C25	nr	C35	nr	C50
1	0.5503	1	1.8790	1	0.8010
2	1.4640	2	0.9391	2	1.0220
3	0.9892	3	0.8563	3	1.1080
4	1.5840	4	1.2710	4	1.2220
5	0.7436	5	1.8510	5	1.3260
6	1.3910	6	3.5900	6	0.6340
7	1.1530	7	2.6800	7	0.7984
średnia	1.1250	średnia	1.8666	średnia	0.9873
SD	0.3854	SD	0.9889	SD	0.2519

NT					
nr	C25	nr	C35	nr	C50
1	0.6297	1	0.6901	1	0.9667
2	0.3992	2	0.7177	2	0.7449
3	0.6763	3	1.2710	3	0.9383
4	1.4260	4	1.5190	4	0.4946
5	1.2110	5	0.7725	5	0.5507
6	0.8835	6	0.8010	6	0.5792
7	1.4980	7	1.3810	7	0.7177
średnia	0.9605	średnia	1.0218	średnia	0.7132
SD	0.4242	SD	0.3540	SD	0.1862

SB-W					
nr	C25	nr	C35	nr	C50
1	1.2250	1	0.9106	1	1.7700
2	0.7013	2	0.7173	2	2.0440
3	1.2450	3	0.9106	3	1.4650
4	0.8826	4	1.1590	4	1.6570
5	0.7225	5	1.0490	5	1.1330
6	0.8973	6	1.7400	6	0.8571
7	0.7945	7	1.6850	7	1.5470
średnia	0.9240	średnia	1.1674	średnia	1.4962
SD	0.2247	SD	0.3967	SD	0.3968

SC					
nr	C25	nr	C35	nr	C50
1	1.5010	1	0.5775	1	1.2720
2	0.7156	2	0.6064	2	1.1330
3	0.7820	3	0.6875	3	1.0220
4	1.4800	4	0.9650	4	0.9952
5	0.5373	5	0.4113	5	0.8852
6	0.8109	6	0.6905	6	1.2170
7	0.8040	7	0.4394	7	0.7743
średnia	0.9473	średnia	0.6254	średnia	1.0427
SD	0.3827	SD	0.1855	SD	0.1783

Załącznik IX

Wartości energii detali

D2_EN - Grupa A

PL											
nr	C30	nr	C30	nr	C40	nr	C40	nr	C45	nr	C45
1	13.4386	6	15.3724	1	15.6047	6	12.7224	1	11.4778	6	10.4757
2	9.7148	7	12.3872	2	13.3544	7	8.3363	2	11.7559	7	14.9660
3	10.4190	8	8.9238	3	10.0115	8	7.8094	3	12.3549	8	10.4533
4	7.9154	9	9.4034	4	11.8960	9	14.1298	4	13.3617	9	11.2016
5	12.0380	10	8.1382	5	7.7463	10	7.8184	5	13.7339	10	14.0264
średnia			10.7751	średnia			10.9429	średnia			12.3807
SD			2.4521	SD			2.9672	SD			1.5679

SB-D											
nr	C30	nr	C30	nr	C40	nr	C40	nr	C45	nr	C45
1	8.9539	6	11.4157	1	7.4512	6	8.8361	1	8.2868	6	10.6177
2	7.3476	7	10.5328	2	9.8633	7	5.0392	2	11.1552	7	9.6071
3	7.7960	8	7.4026	3	12.3473	8	5.5221	3	9.5294	8	10.0114
4	8.5562	9	8.0098	4	13.0475	9	3.7465	4	12.6690	9	13.0758
5	8.7399	10	9.6221	5	8.1154	10	9.1621	5	10.0582	10	13.0736
średnia			8.8377	średnia			8.3131	średnia			10.8084
SD			1.3453	SD			3.0227	SD			1.6508

JH											
nr	C30	nr	C30	nr	C40	nr	C40	nr	C45	nr	C45
1	15.0874	6	13.5013	1	12.4698	6	5.6425	1	11.4167	6	9.6029
2	11.8682	7	10.8478	2	10.7951	7	7.9987	2	8.7408	7	10.6452
3	15.0659	8	6.8344	3	7.8526	8	9.6249	3	11.3675	8	14.1666
4	13.1251	9	7.8329	4	10.6982	9	11.4323	4	8.5295	9	12.3508
5	9.2749	10	10.3487	5	11.4034	10	9.5506	5	9.9247	10	10.0123
średnia			11.3787	średnia			9.7468	średnia			10.6757
SD			2.8701	SD			2.0695	SD			1.7168

HD											
nr	C30	nr	C30	nr	C40	nr	C40	nr	C45	nr	C45
1	8.8580	6	7.9951	1	13.3148	6	6.9942	1	9.3633	6	10.7180
2	9.2999	7	12.2118	2	6.4999	7	2.8442	2	7.1068	7	8.9065
3	15.6227	8	11.5796	3	7.9157	8	5.5383	3	7.1522	8	8.1452
4	14.4729	9	12.9120	4	9.7710	9	5.1769	4	11.2314	9	11.8096
5	12.1987	10	12.3378	5	9.4297	10	7.3897	5	9.1479	10	11.5779
średnia			11.7489	średnia			7.4874	średnia			9.5159
SD			2.4271	SD			2.8878	SD			1.7544

Załącznik IX c.d.

Wartości energii detali

D3_EN - Grupa A

PL											
nr	C30	nr	C30	nr	C40	nr	C40	nr	C45	nr	C45
1	19.3065	6	12.3850	1	17.8509	6	22.3261	1	16.3196	6	19.7739
2	10.3913	7	13.6166	2	10.9618	7	13.9899	2	13.6363	7	17.0925
3	10.1100	8	14.3727	3	14.0072	8	13.4787	3	18.0138	8	14.2956
4	10.7943	9	15.2593	4	26.6951	9	18.4109	4	14.2405	9	17.5777
5	19.3266	10	11.9260	5	17.6120	10	13.9260	5	18.1911	10	19.7647
średnia			13.7488	średnia			16.9259	średnia			16.8906
SD			3.3848	SD			4.7343	SD			2.2289

SB-D											
nr	C30	nr	C30	nr	C40	nr	C40	nr	C45	nr	C45
1	14.3688	6	17.9024	1	11.0971	6	13.4204	1	12.6902	6	18.5307
2	19.0894	7	19.5840	2	12.0946	7	5.1268	2	14.0318	7	19.4142
3	15.0616	8	12.0742	3	16.9193	8	6.7635	3	17.1121	8	18.4779
4	18.2507	9	14.5651	4	13.8786	9	8.2128	4	15.8131	9	15.3008
5	19.3100	10	15.1600	5	16.7157	10	12.4243	5	9.3856	10	13.8997
średnia			16.5366	średnia			11.6653	średnia			15.4656
SD			2.6006	SD			3.9563	SD			3.0929

JH											
nr	C30	nr	C30	nr	C40	nr	C40	nr	C45	nr	C45
1	23.0269	6	15.2029	1	15.4847	6	8.5951	1	15.8789	6	26.6281
2	23.7282	7	19.4293	2	16.5838	7	12.5816	2	15.0207	7	18.7650
3	16.6012	8	14.4410	3	9.5010	8	16.6155	3	14.7983	8	27.3383
4	19.5239	9	20.9011	4	24.7304	9	11.3465	4	19.8814	9	19.2680
5	25.1150	10	15.1130	5	15.9243	10	10.1247	5	18.4230	10	17.0403
średnia			19.3083	średnia			14.1488	średnia			19.3042
SD			3.8752	SD			4.8059	SD			4.4108

HD											
nr	C30	nr	C30	nr	C40	nr	C40	nr	C45	nr	C45
1	11.4675	6	19.3278	1	7.6179	6	13.9492	1	22.9848	6	15.1793
2	14.8074	7	17.1269	2	9.2892	7	5.3658	2	11.5022	7	16.2176
3	16.7642	8	13.4583	3	8.5591	8	11.5813	3	10.8513	8	16.1494
4	17.3901	9	26.8447	4	14.4051	9	11.4983	4	14.9073	9	24.1827
5	15.7937	10	28.7997	5	18.0032	10	17.4566	5	7.2969	10	22.8840
średnia			18.1780	średnia			11.7726	średnia			16.2156
SD			5.5511	SD			4.1861	SD			5.6479

Załącznik IX c.d.

Wartości energii detali

D23_EN - Grupa A

PL											
nr	C30	nr	C30	nr	C40	nr	C40	nr	C45	nr	C45
1	32.7451	6	27.7574	1	33.4556	6	35.0485	1	27.7974	6	30.2496
2	20.1061	7	26.0038	2	24.3162	7	22.3262	2	25.3922	7	32.0585
3	20.5290	8	23.2965	3	24.0187	8	21.2881	3	30.3687	8	24.7489
4	18.7097	9	24.6627	4	38.5911	9	32.5407	4	27.6022	9	28.7793
5	31.3646	10	20.0642	5	25.3583	10	21.7444	5	31.9250	10	33.7911
średnia			24.5239	średnia			27.8688	średnia			29.2713
SD			4.9185	SD			6.3669	SD			2.9458

SB-D											
nr	C30	nr	C30	nr	C40	nr	C40	nr	C45	nr	C45
1	23.3227	6	29.3181	1	18.5483	6	22.2565	1	20.9770	6	29.1484
2	26.4370	7	30.1168	2	21.9579	7	10.1660	2	25.1870	7	29.0213
3	22.8576	8	19.4768	3	29.2666	8	12.2856	3	26.6415	8	28.4893
4	26.8069	9	22.5749	4	26.9261	9	11.9593	4	28.4821	9	28.3766
5	28.0499	10	24.7821	5	24.8311	10	21.5864	5	19.4438	10	26.9733
średnia			25.3743	średnia			19.9784	średnia			26.2740
SD			3.3648	SD			6.5963	SD			3.4404

JH											
nr	C30	nr	C30	nr	C40	nr	C40	nr	C45	nr	C45
1	38.1143	6	28.7042	1	27.9545	6	14.2376	1	27.2956	6	36.2310
2	35.5964	7	30.2771	2	27.3789	7	20.5803	2	23.7615	7	29.4102
3	31.6671	8	21.2754	3	17.3536	8	26.2404	3	26.1658	8	41.5049
4	32.6490	9	28.7340	4	35.4286	9	22.7788	4	28.4109	9	31.6188
5	34.3899	10	25.4617	5	27.3277	10	19.6753	5	28.3477	10	27.0526
średnia			30.6869	średnia			23.8956	średnia			29.9799
SD			4.9619	SD			6.1916	SD			5.2602

HD											
nr	C30	nr	C30	nr	C40	nr	C40	nr	C45	nr	C45
1	20.3255	6	27.3229	1	20.9327	6	20.9434	1	32.3481	6	25.8973
2	24.1073	7	29.3387	2	15.7891	7	8.2100	2	18.6090	7	25.1241
3	32.3869	8	25.0379	3	16.4748	8	17.1196	3	18.0035	8	24.2946
4	31.8630	9	39.7567	4	24.1761	9	16.6752	4	26.1387	9	35.9923
5	27.9924	10	41.1375	5	27.4329	10	24.8463	5	16.4448	10	34.4619
średnia			29.9269	średnia			19.2600	średnia			25.7314
SD			6.6075	SD			5.5874	SD			6.8686

Załącznik IX c.d.

Wartości energii detali

D2_EN - Grupa B

LC					
nr	C25	nr	C35	nr	C50
1	10.3269	1	9.1072	1	3.5290
2	7.4288	2	11.2745	2	3.4181
3	12.1552	3	8.6906	3	3.2462
4	7.1645	4	6.5696	4	3.5973
5	10.2867	5	8.9004	5	4.4326
6	8.2251	6	14.6265	6	3.7176
7	7.1781	7	9.7464	7	2.6142
średnia	8.9665	średnia	9.8450	średnia	3.5079
SD	1.9630	SD	2.5303	SD	0.5451

NT					
nr	C25	nr	C35	nr	C50
1	10.0144	1	5.7020	1	3.3574
2	11.5358	2	6.5300	2	2.6944
3	7.9962	3	5.9388	3	2.2346
4	6.4357	4	8.0295	4	3.0151
5	7.3465	5	9.5862	5	2.2827
6	6.6760	6	7.0676	6	2.1808
7	5.7090	7	6.5117	7	2.0792
średnia	7.9591	średnia	7.0523	średnia	2.5492
SD	2.0986	SD	1.3543	SD	0.4861

SB-W					
nr	C25	nr	C35	nr	C50
1	7.7919	1	9.3189	1	6.9072
2	11.8484	2	6.9335	2	6.7093
3	7.8867	3	8.5946	3	5.6139
4	6.8662	4	8.0825	4	5.7816
5	7.7633	5	7.3725	5	6.9326
6	7.8145	6	7.2548	6	5.2296
7	10.7748	7	7.3646	7	4.9412
średnia	8.6780	średnia	7.8459	średnia	6.0165
SD	1.8585	SD	0.8587	SD	0.8272

SC					
nr	C25	nr	C35	nr	C50
1	6.4144	1	6.2662	1	7.6975
2	8.6257	2	5.3948	2	8.8743
3	13.4430	3	6.2563	3	12.0284
4	9.5696	4	5.6436	4	7.8145
5	9.0503	5	3.7230	5	10.0115
6	5.8934	6	7.1602	6	7.4313
7	7.4299	7	3.7853	7	7.5556
średnia	8.6323	średnia	5.4613	średnia	8.7733
SD	2.5187	SD	1.2932	SD	1.7078

Załącznik IX c.d.

Wartości energii detali

D3_EN - Grupa B

LC					
nr	C25	nr	C35	nr	C50
1	17.5694	1	27.0584	1	7.0533
2	24.1098	2	17.7411	2	7.5332
3	17.1644	3	18.8788	3	10.2641
4	23.6698	4	20.9130	4	8.6435
5	17.6611	5	33.5040	5	9.6196
6	21.3430	6	35.3233	6	9.8013
7	23.8166	7	32.9321	7	5.0782
średnia	20.7620	średnia	26.6215	średnia	8.2847
SD	3.2167	SD	7.4666	SD	1.8480

NT					
nr	C25	nr	C35	nr	C50
1	14.0777	1	12.5672	1	5.7752
2	14.5025	2	13.9067	2	5.3649
3	17.4356	3	17.4145	3	5.5688
4	21.8036	4	22.4947	4	5.3657
5	24.8086	5	13.3782	5	3.7146
6	25.2600	6	15.2706	6	4.0244
7	24.1597	7	22.4602	7	4.2771
średnia	20.2925	średnia	16.7846	średnia	4.8701
SD	4.8754	SD	4.1869	SD	0.8366

SB-W					
nr	C25	nr	C35	nr	C50
1	29.5672	1	13.3325	1	27.4986
2	15.5040	2	13.7761	2	24.8421
3	25.1998	3	15.5214	3	23.2120
4	26.9012	4	20.9000	4	22.1839
5	25.2039	5	10.2897	5	17.4476
6	26.5013	6	23.6413	6	18.5761
7	18.7565	7	24.2145	7	21.7902
średnia	23.9477	średnia	17.3822	średnia	22.2215
SD	4.9701	SD	5.4985	SD	3.4632

SC					
nr	C25	nr	C35	nr	C50
1	24.8042	1	13.4314	1	25.5733
2	22.3713	2	13.2157	2	28.2531
3	14.5029	3	11.4895	3	15.9063
4	21.0354	4	17.3009	4	21.8090
5	15.3647	5	7.5538	5	16.3106
6	22.5677	6	18.0673	6	20.1226
7	20.3699	7	7.2964	7	21.2786
średnia	20.1452	średnia	12.6221	średnia	21.3219
SD	3.8311	SD	4.2403	SD	4.5136

Załącznik IX c.d.

Wartości energii detali

D23_EN - Grupa B

LC					
nr	C25	nr	C35	nr	C50
1	27.8963	1	36.1656	1	10.5823
2	31.5386	2	29.0156	2	10.9513
3	29.3196	3	27.5694	3	13.5103
4	30.8343	4	27.4826	4	12.2408
5	27.9478	5	42.4044	5	14.0522
6	29.5681	6	49.9498	6	13.5189
7	30.9947	7	42.6785	7	7.6924
średnia	29.7285	średnia	36.4666	średnia	11.7926
SD	1.4619	SD	8.8612	SD	2.2443

NT					
nr	C25	nr	C35	nr	C50
1	24.0921	1	18.2692	1	9.1326
2	26.0383	2	20.4367	2	8.0593
3	25.4318	3	23.3533	3	7.8034
4	28.2393	4	30.5242	4	8.3808
5	32.1551	5	22.9644	5	5.9973
6	31.9360	6	22.3382	6	6.2052
7	29.8687	7	28.9719	7	6.3563
średnia	28.2516	średnia	23.8368	średnia	7.4193
SD	3.2036	SD	4.4138	SD	1.2277

SB-W					
nr	C25	nr	C35	nr	C50
1	37.3591	1	22.6514	1	34.4058
2	27.3524	2	20.7096	2	31.5514
3	33.0865	3	24.1160	3	28.8259
4	33.7674	4	28.9825	4	27.9655
5	32.9672	5	17.6622	5	24.3802
6	34.3158	6	30.8961	6	23.8057
7	29.5313	7	31.5791	7	26.7314
średnia	32.6257	średnia	25.2281	średnia	28.2380
SD	3.2730	SD	5.3556	SD	3.7912

SC					
nr	C25	nr	C35	nr	C50
1	31.2186	1	19.6976	1	33.2708
2	30.9970	2	18.6105	2	37.1274
3	27.9459	3	17.7458	3	27.9347
4	30.6050	4	22.9445	4	29.6235
5	24.4150	5	11.2768	5	26.3221
6	28.4611	6	25.2275	6	27.5539
7	27.7998	7	11.0817	7	28.8342
średnia	28.7775	średnia	18.0835	średnia	30.0952
SD	2.4154	SD	5.3700	SD	3.8016