



Rozwój metod nieniszczących stosowanych w polskim budownictwie

Prof. dr hab. inż. Leonard Runkiewicz, Instytut Techniki Budowlanej, Politechnika Warszawska

1. Wprowadzenie

Dokonywane oceny bezpieczeństwa konstrukcji wymagają znajomości wytrzymałości materiałów, z jakich są wykonane. W przypadku konstrukcji żelbetowych materiałami takimi są beton i stal. Niekiedy do oceny bezpieczeństwa elementów konstrukcji stosowana jest metoda obciążeń próbnych.

Wyznaczenie wytrzymałości i jednorodności materiałów można dokonywać za pomocą zarówno metod nieniszczących, jak i seminiszczących lub niszczących. Wśród badań nieniszczących najczęściej stosowane są metody radiologiczne, ultradźwiękowe i sklerometryczne. Natomiast badania seminiszczące konstrukcji żelbetowych najczęściej polegają na wrywaniu kotew osadzonych w stwardniałym betonie (metoda *pull-out*) lub umieszczonych w konstrukcji przed ich zabetonowaniem (metoda *lock-out*), odrywaniu stalowych krążków przyklejonych do powierzchni betonu (metoda *pull-off*) oraz ścinaniu naroży elementów betonowych lub wyłamywaniu walcowych bloków betonowych powstałych po nawierceniu betonu wiertnicami (metoda *break-out*). Badania niszczące mające na celu określenie wytrzymałości betonu na ściskanie wykonuje się na próbkach wyciętych z konstrukcji, najczęściej o kształcie walcowym [3]. Ocenę konstrukcji budowlanych z innych materiałów, takich jak stal, drewno, ceramika, tworzywa sztuczne dokonuje się za pomocą nieniszczących metod specjalistycznych.

2. Rozwój metod nieniszczących w budownictwie

Za początek badań nieniszczących (ang. *Non Destructive Testing* – NDT) uznaje się odkrycie i zastosowanie przez Wilhelma Conrada Roentgena promieniowania X w 1895 r. Ważnym krokiem w rozwoju badań nieniszczących było też użycie ultradźwięków w 1893 r. Jednak znaczący rozwój badań nieniszczących nastąpił w czasie II wojny światowej, gdyż konieczne było zapewnienie niezawodności środków bojowych [2].

Stosowanie metod nieniszczących w budownictwie rozpoczęło się w Polsce w połowie XX w. Pierwsze prace badawcze i diagnostyczne prowadzone były m.in. w Polskiej Akademii Nauk, Politechnice Warszawskiej,

Instytucie Techniki Budowlanej oraz Instytucie Elektrotechniki. Obszar badań i wdrożeń poszerzał się stopniowo również na inne uczelnie techniczne oraz ośrodki naukowo-badawcze, takie jak:

- Politechnika Wroclawska,
- Politechnika Szczecińska,
- Politechnika Poznańska,
- Politechnika Krakowska,
- CEBET.

Początkowy okres rozwoju badań nieniszczących w budownictwie w Polsce związany był z prof. W. Olszakiem, A. Sawczukiem, Z. Pawłowskim, J. Pyszniakiem, L. Brunarskim, J. Remiszewskim, L. Runkiewiczem i wieloma innymi, którzy prowadzili prace związane z:

- metodami badania materiałów budowlanych poprzez pomiary ich twardości (w szczególności zastosowanie młotka Poldiego),
- rezonansowymi metodami pomiarów dynamicznych stałych sprężystych,
- ultradźwiękowymi metodami kontroli jakości materiałów budowlanych,
- rentgenograficznymi metodami konstrukcji żelbetowych i stalowych,
- elastooptycznymi i metodami badań modelowych (w szczególności na modelach z gumy),
- badaniami konstrukcji przy użyciu tensometrów strunowych, elektrooporowych i magnetycznych (opracowanych w dawnej Czechosłowacji) oraz diagnostyką konstrukcji budowlanych.

W początkowym okresie z zagranicy sprowadzane były specjalistyczne przyrządy pomiarowe, m.in. do badań twardości (Schmidta, Poldiego), oceny zbrojenia w konstrukcjach żelbetowych (Covometer, Proceq Szwajcaria). Natomiast w kraju konstruowano aparaturę specjalistyczną m.in. do badań ultradźwiękowych, rezonansowych, radiologicznych, elastooptycznych (PAN, ITB, IJB, IE itp.). Aparatura i urządzenia te były wykorzystywane w badaniach naukowych mających na celu poszerzenie zakresu ich optymalnego stosowania, szczególnie w diagnostykach konstrukcji budowlanych wykonanych z różnych materiałów (stalowych, żelbetowych, murowych, drewnianych, zespolonych lub z tworzyw sztucznych).

Polskie ośrodki naukowo-badawcze przedstawiały swoje wyniki badań na krajowych i zagranicznych konferencjach i kongresach badań nieniszczących.



Krajowe uczelnie wyższe oraz ośrodki naukowo-badawcze, np. Polska Akademia Nauk, Instytut Elektrotechniki, Instytut Techniki Budowlanej organizowały różne formy podnoszenia kwalifikacji w zakresie badań nieniszczących, takie jak konferencje, sympozja, studia podyplomowe. Kursy podyplomowe były znaczącym ogniwem w popularyzowaniu i wdrażaniu metod nieniszczących. Przykładowo, kursy podyplomowe organizowane przez ITB obejmowały badania oraz diagnostyki konstrukcji budowlanych prowadzone metodami ultradźwiękowymi, sklerometrycznymi, radiologicznymi, rezonansowymi oraz elektrycznymi.

Znaczącą rolę w dynamicznym rozwoju metod nieniszczących w Polsce odegrał VII Międzynarodowy Kongres Badań Nieniszczących, który odbył się w 1973 r. w Warszawie (przewodniczący Z. Pawłowski), a także trzy Konferencje Badań Nieniszczących w Budownictwie w latach 1974, 1976 i 1978, w których uczestniczyli – co w tamtych czasach było rzadkością – goście zagraniczni. Współorganizatorami tych konferencji były Instytut Techniki Budowlanej oraz Politechnika Wrocławska. Na konferencjach tych przedstawiono oraz opublikowano ponad 120 referatów z Polski i zagranicy, co uważano wtedy za duży sukces naukowy i organizacyjny. Referaty dotyczyły m.in.:

- ogólnych zasad stosowania metod nieniszczących w budownictwie,
- wpływów czynników technicznych i technologicznych na wyniki badań ultradźwiękowych, sklerometrycznych, radiologicznych, emisji akustycznej, itp.
- wpływów czynników środowiskowych i korelacyjnych na dokładności badań nieniszczących,
- wpływów analiz matematycznych na oceny bezpieczeństwa konstrukcji metodami nieniszczącymi,
- stosowania metod nieniszczących dla oceny różnych rodzajów materiałów,
- ocen jakości elementów prefabrykowanych za pomocą metod nieniszczących,
- kompleksowego stosowania metod nieniszczących do oceny jakości konstrukcji budowlanych,
- stosowania metod radiologicznych i magnetycznych do oceny zbrojenia w konstrukcjach żelbetonowych,
- ocen wilgotności i korozji betonu w konstrukcjach,
- ocen połączeń elementów w konstrukcjach stalowych,
- ocen konstrukcji murowych, drewnianych, zespolonych oraz z tworzyw sztucznych,
- ocen jakości stropów, słupów, ścian, wież, zapór, wiaduktów, mostów oraz innych elementów i konstrukcji specjalistycznych,
- ocen budowli wieżowych, kominów i chłodni,
- ocen zbiorników i silosów,
- ocen zbrojenia i jego korozji metodami radiograficznymi, radiologicznymi, ultradźwiękowymi, prądów wirowych oraz za pomocą specjalistycznej aparatury badawczej, jak np. źródeł promieniowania wysokoenergetycznego, izotopów, betatronów, aparatów rentgenowskich, magnetycznych itp.

W wyniku współpracy naukowej w ramach RWPG opracowano w Centrum Badań Nieniszczących, we współpracy z krajami zachodnimi, podstawy do stosowania metod nieniszczących w budownictwie.

W Polskim Komitecie Normalizacyjnym opracowano specjalistyczne normy m.in. ultradźwiękowe, sklerometryczne, radiologiczne itp. do stosowania w budownictwie. Normy te zostały wprowadzone do norm międzynarodowych, a później do norm Unii Europejskiej. Prowadzone w kraju badania nad metodami nieniszczącymi, zwłaszcza na wyższych uczelniach oraz w ITB, pozwalały na coraz szersze stosowanie tych metod w budownictwie.

Przyczyniły się one także do powstania szeregu prac doktorskich i habilitacyjnych, przykładowo na Politechnice Warszawskiej, Wrocławskiej, Krakowskiej, Śląskiej, AGH, Rzeszowskiej, Szczecińskiej, Poznańskiej, Białostockiej, Lubelskiej, a także w Instytucie Techniki Budowlanej. W ośrodkach tych powstawały „szkoły” badań nieniszczących, z których wyróżnić można szkoły prof. A. Garbacza, J. Hoły, J. Kaszyńskiego, R. Sztukiewiczza, K. Flagi, K. Schabowicza, B. Stawiskiego, Ł. Drobca i innych.

W Instytucie Techniki Budowlanej zostały opracowane instrukcje stosowania oraz wytyczne oceny jakości, a także zalecenia Ministerstwa Budownictwa w sprawie podnoszenia kwalifikacji oraz zasad oceny bezpieczeństwa konstrukcji budowlanych metodami nieniszczącymi. Wymienione prace pozwalały na poprawne stosowanie metod nieniszczących w budownictwie.

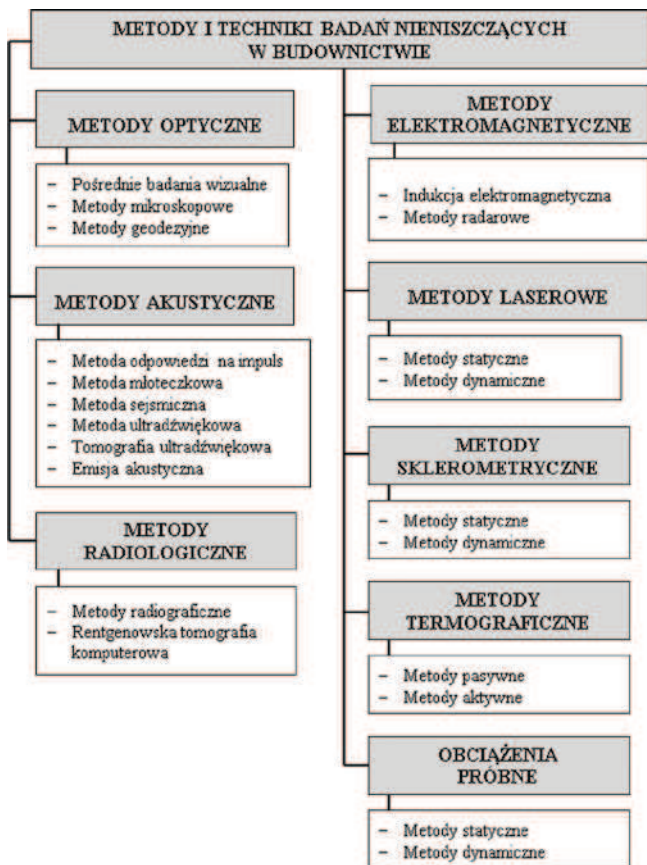
Metody nieniszczące weszły do programów nauczania studentów na wszystkich wydziałach budowlanych wyższych uczelni. Ponadto są one przedmiotem wielu budowlanych konferencji naukowo-technicznych, takich jak cykliczne konferencje: PAN i PZITB w Krynicy, Awaryjne Budowlane w Międzyzdrojach, Warsztaty Projektanta Konstrukcji Budowlanych, Warsztaty Rzecznawcy Budowlanego, Kontra, Zbiorniki, Renowacje, Budownictwo w Energetyce, Konstrukcje Sprężone, Matbud i inne.

Za pomocą metod nieniszczących realizowano diagnostykę większości ważniejszych obiektów budowlanych w kraju, a ich wyniki stanowiły podstawy do oceny bezpieczeństwa oraz zakresu ewentualnego wzmocnienia odpowiedzialnych obiektów, w tym obiektów zażytkowych.

Szeroki i innowacyjny rozwój konstrukcji budowlanych wymaga dalszego rozwoju badań nieniszczących z wykorzystaniem specjalistycznej, nowoczesnej aparatury badawczej.

3. Krótki przegląd metod nieniszczących i seminieniszczących w budownictwie

3.1. Podział metod i technik badań nieniszczących
W diagnostyce konstrukcji budowlanych powszechnie stosowane są metody nieinwazyjne, nieniszczące



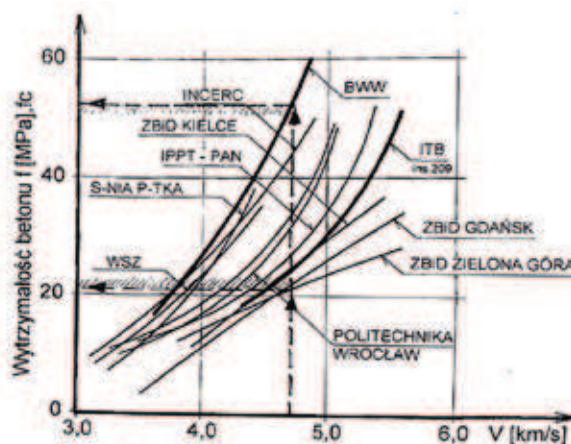
Rys. 1. Ogólna klasyfikacja nieniszczących metod i technik stosowanych w diagnostykach konstrukcji budowlanych

i seminieniszczące, które nie powodują naruszenia struktur badanych konstrukcji. Ogólny podział tych metod przedstawiono na rysunku 1, a ich szczegółowy opis można znaleźć w literaturze technicznej, np. w [1, 3].

Metody optyczne – do nich zalicza się wiele technik pomiarowych wykorzystujących aparaturę badawczą w postaci m.in. endoskopów, boroskopów, wideoskopów umożliwiających badania powierzchni i miejsc niedostępnych dla oka, a także mikroskopy użyteczne w warunkach laboratoryjnych. Ponadto do tej grupy metod zaliczane są także skaninigi laserowe umożliwiające zdalne wyznaczanie położenia zbioru punktów w przestrzeni trójwymiarowej, co daje możliwość rekonstrukcji trójwymiarowego obrazu (ukształtowania) całych obiektów budowlanych lub ich fragmentów, w tym widocznej dla lasera konstrukcji [1]. Metody te mogą być stosowane m.in. do zdalnych pomiarów postępujących ugięć wybranych elementów konstrukcji. Stosowane są one w monitoringach obiektów budowlanych.

Metody akustyczne – do nich zaliczane są metody ultradźwiękowe, odpowiedzi na impuls, młoteczkowe, tomografii ultradźwiękowej i emisji akustycznej.

Metody ultradźwiękowe są stosowane, w sposób pośredni, m.in. do oceny wytrzymałości i jednorodności betonów i stali w konstrukcji [4–12], a także do wykrywania nieciągłości strukturalnych w postaci pęknięć oraz do lokalizowania pustek powietrznych w badanych



Rys. 2. Przykłady charakterystycznych zależności $f_c - V$ dla metody ultradźwiękowej (dla różnych betonów i różnych krajów)

materiałach. Wytrzymałości betonów określone są na podstawie prędkości podłużnych fal ultradźwiękowych rozprzestrzeniających się w badanych betonach, skorelowanych z wytrzymałością na ściskanie uzyskaną na podstawie badań wytrzymałościowych próbek pobranych z konstrukcji.

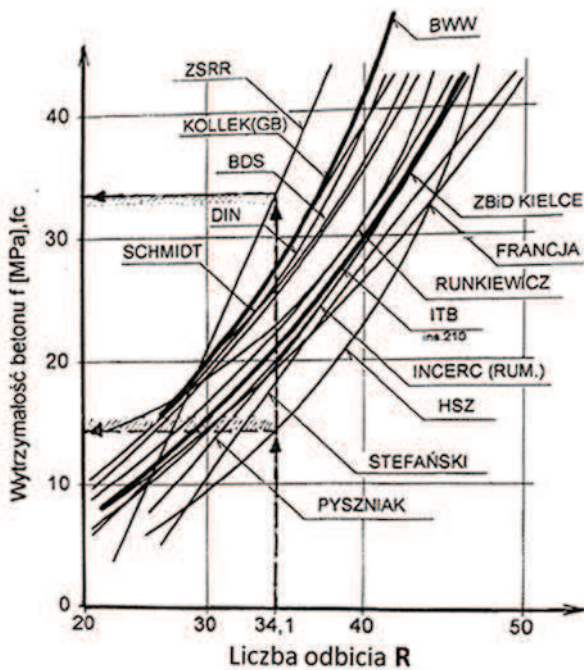
Przykładowe zależności $f_c - V$ dla różnych krajów i ośrodków pokazano na rysunku 2.

Metody odpowiedzi na impuls (impulse response) – są stosowane m.in. do wykrywania pustek powietrznych pod płytami żelbetowymi ułożonymi na gruncie, delaminacji na stykach warstw, miejsc wadliwych i obszarów o dużej niejednorodności struktury betonów w maszynych elementach betonowych (tzw. *honeycombing*).

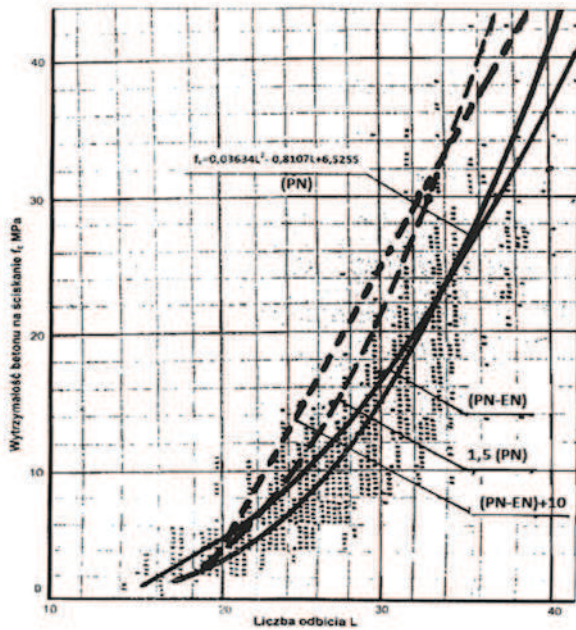
Metody emisji akustycznej – są to metody pomiarowe wykorzystujące zjawisko powstawania i rozprzestrzeniania się fal sprężystych wysokich częstotliwości w strukturze materiału, powodowanych obciążeniem. Mogą to być obciążenia narastające statycznie, wielokrotnie zmienne, dynamiczne, ale też i obciążenia niemechaniczne [8]. W metodach tych znacznie wcześniej niż w innych sygnalizowane są rozwroje procesów destrukcyjnych, które mogą spowodować zniszczenie, dając w ten sposób czas potrzebny do odciążenia konstrukcji.

Metody elektromagnetyczne – wykorzystywane są do określenia lub wykrywania w dostępnych jednostronnie betonowych i żelbetowych elementach, zwłaszcza płytowych: grubości, rozwarstwień, rozległych wad i usytuowania prętów zbrojeniowych [9]. Aparaturę można przemieszczać po powierzchni badanych elementów. Zaletą tej metody jest możliwość szybkiego badania elementów o dużych powierzchniach szczególnie w zakresie lokalizowania zbrojenia, natomiast wadą – mała dokładność określenia średnicy i grubości otuliny zbrojenia w elementach żelbetowych.

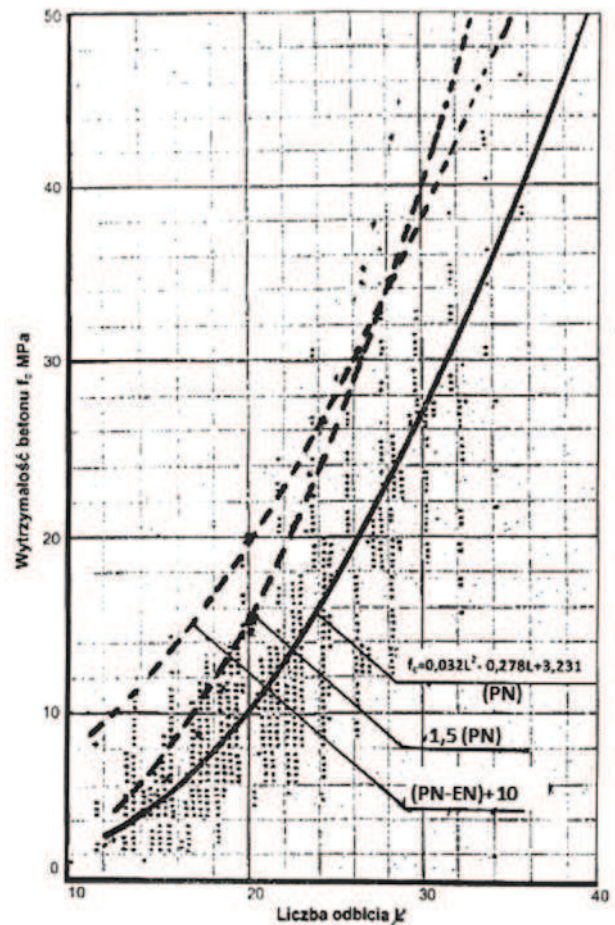
Metody sklerometryczne – stosowane są do oceny, w sposób pośredni, wytrzymałości i jednorodności betonu w konstrukcji. Uzyskiwany z badań parametr w postaci



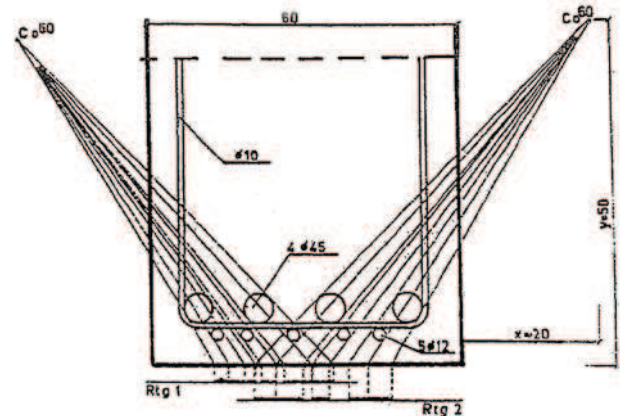
Rys. 3. Przykładowe zależności empiryczne $f_c - R$ dla sklerometrów Schmidta typu N (dla różnych betonów w różnych krajach)



Rys. 4. Zależności empiryczne dla młotków Schmidta typu N ($a=0$) do oceny wytrzymałości betonu podane dla warunków polskich [7]



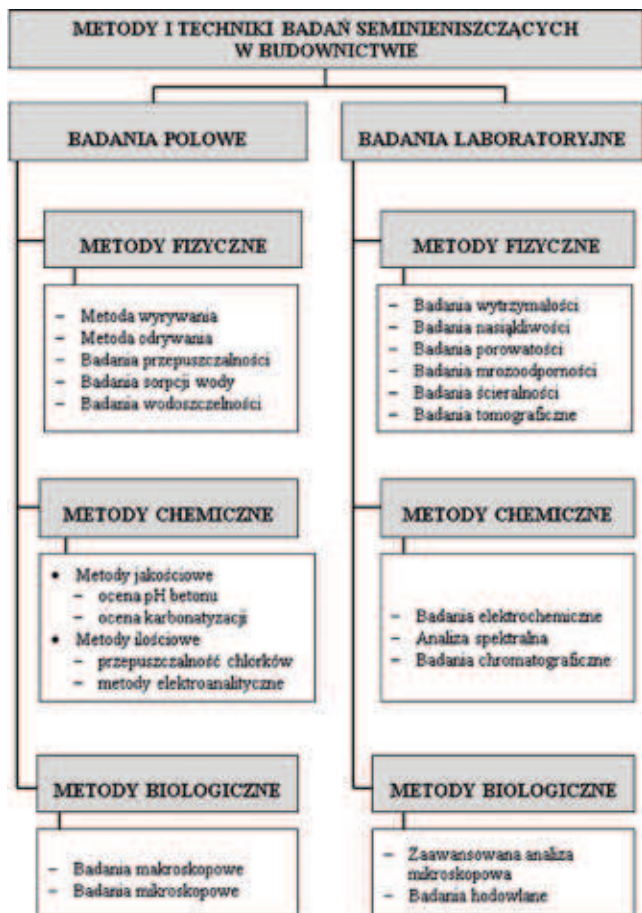
Rys. 5. Zależności empiryczne dla młotków Schmidta typu L ($a=0$) do oceny wytrzymałości betonu dla warunków polskich [7]



Rys. 6. Ocena zbrojenia dolnego w belce żelbetowej (w środku przęsta) za pomocą metody radiograficznej

tw. liczby odbicia R skorelowany jest z wytrzymałością na ściskanie betonu poprzez dobór odpowiedniej zależności korelacyjnej lub hipotetycznej [3, 4, 6]. Przykładowe zależności badawcze dla metod sklerometrycznych do oceny wytrzymałości betonu podano na rysunku 3. Uzasadniają one potrzebę uproszczonego skalowania metody dla każdego rodzaju betonu.

Polskie zależności empiryczne $f_c - R$ dla sklerometrów Schmidta, dla betonów specjalistycznych i regionalnych, były opracowywane na podstawie bardzo licznych badań. Przykładowe zależności opracowane w ITB na ponad 2000 pomiarach, dla warunków polskich, pokazano na rysunkach 4 i 5 [15].



Rys. 7. Ogólna klasyfikacja metod i technik seminieniszczących stosowanych w diagnozowaniu konstrukcji budowlanych

Metody radiologiczne – wśród nich można wyróżnić metody radiograficzne [13] służące m.in. do oceny rozkładu zbrojenia w konstrukcjach żelbetowych. Przykład oceny zbrojenia w belce żelbetowej pokazano na rysunku 6.

Metody te są opisane w wielu publikacjach. Wyniki badań naukowych opracowanych przez ITB stały się podstawą do opracowania odpowiednich norm PN-B i obecnie służą do opracowania norm PN-EN.

Metody i techniki seminieniszczące – metody te, podobnie jak metody nieniszczące, cechują się dużą przydatnością w ocenie trwałości, bezpieczeństwa i niezawodności konstrukcji żelbetowych. Ich stosowanie nie powoduje istotnego naruszenia struktury badanej konstrukcji. Propozycje ogólnej klasyfikacji podstawowych metod i technik seminieniszczących, stosowanych w diagnostyce konstrukcji budowlanych, znajdują się na rysunku 7. Wyróżniono metody fizyczne, chemiczne i biologiczne, z podziałem na stosowane w badaniach polowych (terenowych) oraz w laboratoryjnych badaniach próbek, w tym na przykład rdzeniowych pobranych z konstrukcji. Szczegółowe opisy metod i technik seminieniszczących dostępne są m.in. w pracach [1, 3, 14].

Obciążenia próbne konstrukcji – wykorzystywane są do oceny aktualnego stanu granicznego nośności lub użytkowości fragmentu konstrukcji, gdy z różnych przyczyn nie można tego dokonać na drodze badawczej lub obliczeniowo [10].

4. Podsumowanie

Rozwój metod nieniszczących w budownictwie, rozpoczęty w Polsce przed ponad 50 laty, należy ocenić, mimo wielu trudności techniczno-gospodarczych jako dobry. Na wyższych uczelniach i w ośrodkach naukowo-badawczych są opracowywane i rozwijane specjalistyczne metody badawcze służące, w oparciu o aparaturę i urządzenia badawcze opracowywane w kraju, jak i kupowane za granicą, rozwojowi polskiego nowoczesnego budownictwa na poziomie światowym. Ich dalszy rozwój powinien być wdrażany przez szkolenia, publikacje oraz prace naukowo-badawcze, realizowane wspólnie z ośrodkami zagranicznymi.

BIBLIOGRAFIA

[1] Bień. J., Uszkodzenia i diagnostyka obiektów mostowych, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2010
 [2] Chady T., Sikora R., Badania nieniszczące: historia, stan obecny i perspektywy rozwoju, Przegląd Spawalnictwa 12/2013, str. 13–15
 [3] Drobiec Ł., Jasiński R., Piekarczyk A., Diagnostyka konstrukcji żelbetowych, tom 1, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2010
 [4] PN-EN 12504-4:2005, Badania betonu. Część 4. Oznaczanie prędkości fali ultradźwiękowej
 [5] Goszczyńska B., Świt G., Trompczyński W., i inni, Zastosowanie metody emisji akustycznej do analizy procesu zarysowania belek żelbetowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Budownictwo i Inżynieria Środowiska, Zeszyt 59, str. 76–84, 2012
 [6] Runkiewicz L., Sieczkowski J., Ocena wytrzymałości betonu w konstrukcji na podstawie badań sklerometrycznych. Poradnik, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa, 2018
 [7] PN-EN 12504-2:2013-03, Badania betonu w konstrukcjach. Część 2. Badania nieniszczące. Oznaczenie liczby odbicia
 [8] PN-EN 12504-3:2006, Badania betonu w konstrukcjach. Część 3. Oznaczanie siły wrywającej
 [9] PN-EN 13791:2008, Ocena wytrzymałości betonu na ściskanie w konstrukcjach i prefabrykowanych wyrobach betonowych
 [10] Lewicki B., Obciążenia próbne konstrukcji istniejących budynków. Prace Naukowe Instytutu Techniki Budowlanej, Warszawa, 1997
 [11] PN-EN 13791:2008, Ocena wytrzymałości betonu na ściskanie w konstrukcjach i prefabrykowanych wyrobach betonowych
 [12] Hoła J., Schabowicz K., Diagnostyka obiektów budowlanych, Materiały Budowlane 5/2015, str. 3–7
 [13] Zybura A., Jaśniok M., Jaśniok T., Diagnostyka konstrukcji żelbetowych, tom 2. Badania korozji zbrojenia i właściwości ochronnych betonu, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2017
 [14] Runkiewicz L., Instrukcja stosowania młotków Schmidta do nieniszczącej kontroli jakości betonu. Instrukcja ITR nr 210, Warszawa, 1977
 [15] Runkiewicz L., Sklerometryczna ocena jakości betonu. Praca magisterska, Politechnika Warszawska, 1961