

Wstępna analiza możliwości wykorzystania metody emisji akustycznej w ocenie trwałości konstrukcji betonowych

Preliminary analysis of possible application
of the acoustic emission method
for the evaluation of concrete structures durability

Streszczenie

Pojęcie trwałości materiałów jest używane potocznie, chociaż nie jest ściśle. Szczególne znaczenie ma określenie początku zniszczenia w materiałach i elementach konstrukcyjnych, ponieważ wiele procesów zapoczątkowanych prowadzi do zniszczenia niemal bez możliwości ich zatrzymania w sposób skuteczny i ekonomiczny. Dlatego też powstała koncepcja powiązania stanu granicznego trwałości nie z określonym umownie stopniem czy zakresem uszkodzenia elementu konstrukcyjnego, a z inicjacją procesu niszczenia, który prowadzi w sposób nieunikniony do wystąpienia jednego z dwóch tradycyjnych stanów granicznych. Z tego powodu, tak istotne jest opracowanie metod, które wykrywałyby początek procesu niszczenia jak również śledziły jego rozwój i przebieg w całej objętości konstrukcji a nie tylko w wybranych subiektywnie miejscach. Taką metodą może być metoda emisji akustycznej.

Słowa kluczowe: emisja akustyczna, NDT, konstrukcje betonowe, trwałość

Abstract

The commonly used term “durability of materials” is not accurate. Determination of the initiation of failure in materials and structural elements is particularly important because many initiated processes lead to failure providing hardly any chance to stop them effectively and economically. For that reason the idea has been proposed to combine the durability limit state not with the conventionally defined degree or range of damage but with the initiation of the failure process that inevitably leads to the occurrence of one of the two traditional limit states. To this end, it is necessary to design methods that will detect the start of a process of failure as well as track its development and in the entire volume of the structure, and not only at selected points. Acoustic emission method may serve the purpose.

Keywords: acoustic emission, NDT, concrete structure, durability

Dr hab. inż. Grzegorz Świt, mgr inż. Aleksandra Krampikowska – Politechnika Świętokrzyska, dr inż. Krzysztof Schabowicz – Politechnika Wroclawska.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: gswit@tu.kielce.pl

Wstęp

Obecnie istnieją dwa różne aspekty dotyczące określania trwałości konstrukcji budowlanych. Pierwszy z nich związany jest z analizą konstrukcji już istniejących, zaprojektowanych według obowiązujących dawniej norm. Drugi natomiast dotyczy zapewnienia założonego okresu użytkowania z uwzględnieniem cech mechanicznych i trwałościowych. W budownictwie problemy trwałości, wytrzymałości oraz wpływu na środowisko zgodnie z obecnym podejściem są ze sobą powiązane. Wynika to z faktu, iż zastosowanie materiałów o niższych parametrach wytrzymałościowych i trwałościowych powoduje konieczność wykonywania napraw lub wymiany elementów, które następnie należy zutylizować. Powoduje to zanieczyszczenie środowiska poprzez składowanie materiałów na wysypisku, recykling, utylizację odpadów jak również dodatkowe zużycie energii.

Trwałość można zdefiniować, jako zdolność konstrukcji do spełnienia minimum swoich funkcji przez okres planowanego użytkowania i w przewidzianych warunkach, bez konieczności ponoszenia nadmiernej kosztów napraw i konserwacji [1].

Trwałość konstrukcji, obok bezpieczeństwa i użyteczności, jest analizowana jako jeden z trzech filarów niezawodności konstrukcji. Elementy te – dziś stawiane praktycznie na równi pod względem znaczenia – były w zdecydowanie różnym stopniu w przeszłości rozważane pod kątem tworzenia zasad ujmowania ich w projektowaniu [2].

Aspekt trwałości w projektowaniu konstrukcji betonowych bazuje głównie na właściwościach fizyko-chemicznych. Dotychczas badania skupiają się na 4 grupach zagadnień określanych wg [2], jako:

- skutki karbonizacji,
- korozja chlorkowa,
- fizyczne działanie zamrażanie/odmrażanie (mrozoodporność),
- skutki innych rodzajów oddziaływań chemicznych.

Aspekty dotyczące zasad projektowania konstrukcji, doboru środków zabezpieczających, doboru materiałów i ich właściwości, są określone w Eurokodach oraz w wytycznych producentów materiałów. Natomiast przyjęte warunki środowiskowe na etapie projektowania mogą w znaczący sposób odbiegać od tych, w jakich istniejąca już konstrukcja pracuje. Ma to istotne znaczenie dla trwałości i bezpiecznej pracy konstrukcji, w dobie szybko zmieniających się warunków gospodarczych, które wymuszają tworzenie nowych miejsc pracy oraz infrastruktury w różnych miejscach niekoniecznie do tego przystosowanych. Efektem tego są ciągłe prace nad szukaniem, projektowaniem i stosowaniem nowoczesnych materiałów i technologii o wysokich parametrach fizyczno-chemicznych i mechanicznych. Niestety badania wdrożeniowe nowych materiałów i technologii często koncentrują się tylko na działaniu krótkotrwałym wybranych środowisk agresywnych na ich wytrzyma-

łość i trwałość. Niestety konsekwencją tego jest brak wyników opisujących zachowanie się badanych materiałów przy działaniu długotrwałym środowiska i obciążenia na właściwości fizyczne i mechaniczne. Dlatego też istotnym zagadnieniem jest możliwość oceny wpływu środowiska, w jakim pracuje konstrukcja na stopień degradacji materiału mający istotny wpływ na trwałość i nośność konstrukcji. Zgodnie z wytycznymi zawartymi w Eurokodzie stopień ten można określić na podstawie: obliczeń, badań doświadczalnych, doświadczeń zebranych w wcześniejszych realizacji lub kombinacji tych podejść.

Można zauważyć w otaczającej nas rzeczywistości szereg budowli, które albo zostały nieprawidłowo zaprojektowane, albo zastosowano materiały o zbyt niskich parametrach odporności na środowisko agresywne. Jednak najważniejszym problemem, jaki można zauważyć w Polsce jest brak polityki remontowej konstrukcji budowlanych. O ile istnieją uwarunkowania prawne nakazujące wykonywanie bieżących, rocznych i rozszerzonych przeglądów o tyle brak jest możliwości wyegzekwowania poprawnego (zgodnie ze sztuką budowlaną oraz rozwojem wiedzy) wykonania ich. Związane to jest z dwoma aspektami. Pierwszy spowodowany jest chęcią wydania jak najmniejszych kwot na wymagane przeglądy, co w konsekwencji prowadzi do aspektu drugiego, a mianowicie wykonywanie przeglądów oraz diagnostyki stanu technicznego konstrukcji przez osoby nieposiadające wystarczającej wiedzy, doświadczenia zawodowego, jak i możliwości technicznych. Tak sporządzone dokumenty z przeglądów obiektów nie mogą być miarodajnym i wiarygodnym źródłem informacji użytych do wyznaczenia pozostałego okresu użytkowania. Szczególnie, że bezpieczeństwo konstrukcji w ujęciu normowym w aspekcie nośności i trwałości oparto na:

- pełnym podejściu probabilistycznym,
- podejściu półprobabilistycznym – częściowe współczynniki,
- podejściu globalnej odporności (*global resistance*),
- podejściu „uznanym za wystarczające” (*deem-to-satisfy*),
- podejściu „unikanie zniszczenia” (*avoidance of deterioration*).

Trwałość budowli, konstrukcji lub elementu może być określona w wymaganiach przy rozpoczynaniu procesu inwestycyjnego lub oceniana w odniesieniu do istniejących obiektów, natomiast materiały wykazują zmienność właściwości w czasie w wyniku starzenia i oddziaływania różnych czynników. Znaczenie zmian tych właściwości zależy od przeznaczenia danego materiału, sposobu wykorzystania w konstrukcji, a przede wszystkim od rodzaju konstrukcji. Ten sam materiał o charakterystycznym rozwoju właściwości w czasie może być właściwy do wykonania danej konstrukcji, a całkowicie nieodpowiedni do innej. Przyjęto jednak mówić o trwałości materiałów budowlanych, rozumiejąc właśnie tę zmienność.

Szczególne znaczenie ma określenie początku zniszczenia w materiałach i elementach konstrukcyjnych, ponieważ wiele procesów zapoczątkowanych prowadzi do zniszczenia niemal bez możliwości ich zatrzymania w sposób skuteczny i ekonomiczny.

Dlatego też, powstała koncepcja powiązania stanu granicznego trwałości nie z określonym umownie stopniem czy zakresem uszkodzenia elementu konstrukcyjnego, a z inicjacją procesu niszczenia, który prowadzi w sposób nieunikniony do wystąpienia jednego z dwóch tradycyjnych stanów granicznych.

Z tego powodu, tak istotne jest opracowanie metod, które wykrywałyby początek procesu niszczenia jak również śledziły jego rozwój i przebieg w całej objętości konstrukcji, a nie tylko w wybranych subiektywnie miejscach. Taka metoda może być metoda emisji akustycznej.

Emisja akustyczna (EA) jest jedną z metod nieniszczących i coraz częściej praktycznie używaną w diagnostyce konstrukcji budowlanych. W różnych ośrodkach naukowych na całym świecie rokrocznie powstaje wiele publikacji dotyczących jej zastosowania [9] jednakże niestety wciąż brak jest przejrzystych i jednolitych instrukcji dotyczących przeprowadzenia zasadniczej części pomiaru oraz analizy wyników. Praktycznie każda z instytucji zajmująca się badaniami metodą emisji akustycznej opracowuje własne propozycje procedur pomiarowych i ich interpretacji, uwzględniając wyniki badań laboratoryjnych i terenowych.

Procedury emisji akustycznej stosowane w badaniach nieniszczących elementów i konstrukcji z betonów zbrojonych publikowane są od lat 80-tych ubiegłego wieku. Opracowania opublikowane między innymi przez The Ferguson Structural Engineering Laboratory – The University of Texas at Austin (zwana dalej procedurą amerykańską) [3], The Japanese Society of NDI (zwana dalej procedurą japońską) [4, 5] oraz Politechnikę Świętokrzyską (zwana dalej procedurą polską) [6÷8]. Należy zauważyć, że procedury – japońska i amerykańska, bazują na pojedynczych deskryptorach EA, natomiast procedura kielecka wykorzystuje statystyczną analizę obrazu z 12 parametrów EA, tworząc na tej podstawie bazę sygnałów wzorcowych. Każda z tych procedur podaje te same źródła sygnałów EA w elementach wykonanych z betonu zbrojonego, czyli: powstawanie mikrorys, powstawanie i propagacja pęknięć, zamykanie się pęknięć (tarcie na granicy beton-beton), tarcie na granicy beton-zbrojenie, uplastycznienie i pęknięcia zbrojenia.

Kryteria oceny trwałości konstrukcji betonowych poprzez ocenę ich stopnia uszkodzenia na podstawie pomiarów metodą EA

Do roku 2014 opracowano trzy procedury badania uszkodzeń elementów betonowych konstrukcji metodą emisji akustycznej znane, jako procedura japońska, amerykańska oraz polska, które poniżej przedstawiono. Ponadto opracowano normy dotyczące badania konstrukcji metodą emisji akustycznej w Rosji i na Ukrainie.

Procedura japońska

Opracowaniem kryteriów oceny stanu technicznego belek żelbetowych metodą EA w Japonii zajmował się Masayatsu Ohtsu z Uniwersytetu Kumamoto. Na podstawie jego badań, opracowany został projekt normy zatytułowany *Recommended Practice for In-Situ Monitoring of Concrete Structures by Acoustic Emission (2000)*. W normie określone zostały warunki bezpiecznej pracy dla żelbetowych elementów konstrukcji. Ohtsu proces niszczenia elementów żelbetowych podzielił na trzy etapy:

- Powstawanie mikropęknięć w strefie rozciąganej,
- Rozwój pęknięć (także wskutek ścinania),
- Odspojenie zbrojenia i tarcie na granicy beton-beton oraz beton-zbrojenie.

Każdemu z tych etapów przypisane są odpowiednie wartości parametrów emisji akustycznej. Wartości te przedstawiono w tablicy I.

To nowe kryterium oparte na dwóch parametrach, jakim są współczynnik obciążenia (*load ratio*) oraz współczynnik ciszy (*calm ratio*) jak pokazuje rysunek 1. W tym ostatnim przypadku sygnały EA generowane są w skutek tarcia powierzchni pęknięć. Tym samym ilość tych sygnałów jest skorelowana z ilością powstałych uszkodzeń. Natomiast te dwa nowe deskryptory zostały zestawione z szerokością rozwarcia rys i amplitudą sygnału EA.

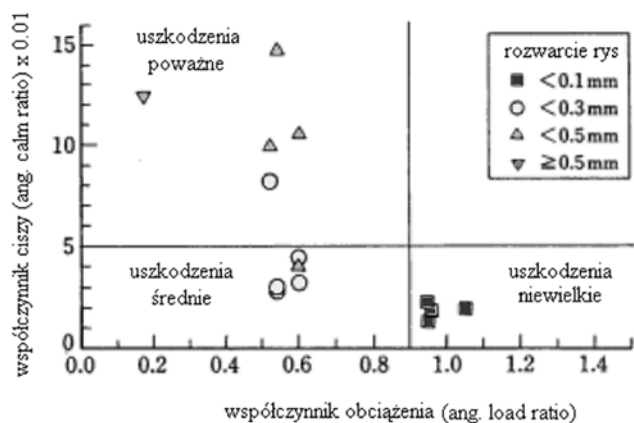
Współczynnik obciążenia definiuje się, jako stosunek obciążenia, przy którym pojawiają się sygnały EA w kolejnym etapie obciążenia do wartości poprzedniego obciążenia. Natomiast współczynnik ciszy jest definiowany, jako stosunek EA podczas odciążenia do EA w czasie obciążenia poprzedzającego

Tablica I. Parametry EA dla różnych etapów niszczenia belek żelbetowych wg Ohtsu [4]

Table I. Parameters of the EA for the various stages of reinforced concrete beams destruction by Ohtsu [4]

Lp.	Etap niszczenia	Szerokość rys, mm	Amplituda sygnałów EA, dB	Współczynnik obciążenia	Intensywność EA w czasie odciążania
1	Mikropęknięcia (wzrost mikropęknięć)	0,12	40÷60 80÷100	>1	Niska
2	Pęknięcia w strefie rozciąganej lub ścinanej	0,20	40÷80	0,8÷0,9	Średnia
3	Odspojenie i tarcie	0,5	40÷60	0,8	Wysoka

odciążenie. Jeżeli konstrukcja jest obciążana i pozostaje w zakresie pracy bezpiecznej to nie obserwujemy aktywności EA w procesie odciążania. Jeżeli badany obiekt jest uszkodzony to współczynnik obciążenia osiąga wartość poniżej 1, a aktywność akustyczna wzrasta nawet przy niższych poziomach obciążenia, co powoduje wzrost wartości współczynnika ciszy. W badaniach tych brak jest informacji o wartości momentu maksymalnego (M_{max}) czy minimalnego (M_{min}) w odniesieniu do momentu niszczącego (M_u). Wartości obu parametrów zostały skorelowane z szerokością rys (*crack-mouth opening displacement CMOD*). Maksymalne wartości CMOD obserwowano na belce, kiedy współczynnik obciążenia osiągał wartości niższe niż 0,9, a współczynnik ciszy był niższy od 0,05. Kiedy konstrukcja pracuje stabilnie wówczas występuje efekt Kaisera [4, 5] a mierzone szerokości rys zawierają się w przedziale 0,1÷0,2 mm. Kryterium to ma poważne ograniczenia wynikające z konieczności kontrolowania obciążenia w czasie wyznaczania wartości tych parametrów. Kryterium to jest trudne do zastosowania przy diagnozowaniu obiektów w warunkach normalnej eksploatacji.



Rys. 1. Klasyfikacja uszkodzeń w zależności od współczynnika obciążenia i ciszy [4]

Fig. 1. Classification of defects depending on the load factor and the silence [4]

Procedura amerykańska

Inne podejście przy tworzeniu procedury badawczej przyjęli Amerykanie. Procedura amerykańska zaleca badanie tylko wybranych odcinków (strefy przyporowe oraz środek rozpiętości belki) a nie całych belek. Sygnały spoza wyselekcjonowanych odcinków

Tablica II. Kryteria rozwoju uszkodzeń wg Tinkeya-Fowlera [3]

Table II. Criteria for the development of damage by Tinkeya-Fowler [3]

Poziom uszkodzenia	Współczynnik Felicity WF	Relacja logiczna	Ilość n sygnałów EA powyżej 85 dB
Małe	> 0,9	i	< 15
Średnie	> 0,9	i/albo	15 < n < 25
	0,6 < WF < 0,9	i	< 25
Poważne	> 0,6	i/albo	> 25
	< 0,6		

miarowych należy wyeliminować poprzez zastosowanie czujników strzegących (*guard sensors*). Czujniki te należy tak rozmieścić, aby otaczały całą badaną strefę pomiarową. Ich zastosowanie wyklucza rejestrację sygnałów powstałych poza mierzonym obszarem oraz pozwala wyeliminować szumy z otoczenia. Zgodnie z procedurą amerykańską w trakcie pomiaru należy rejestrować następujące parametry EA [3]:

- amplitudę,
- czas trwania sygnału EA,
- „moc” sygnału EA,
- wartość obciążenia.

Ich podstawowe kryteria oceny stanu technicznego obiektów betonowych bazują na współczynniku Felicity, ilości sygnałów EA powyżej 85 dB, oraz wskaźniku historii rozwoju uszkodzeń (*historic index*). Kryteria te zestawiono w tablicy II. Występujący w normie japońskiej parametr nazywany współczynnikiem obciążenia oraz w normie amerykańskiej współczynnik Felicity (WF) są tymi samymi parametrami. Podczas gdy współczynnik Kaisera pokazuje brak nowych, aktywnych uszkodzeń to współczynnik Felicity, jeśli jest mniejszy od jedności wskazuje na uszkodzenie elementu. Dalsze decyzje, co do stanu technicznego badanej konstrukcji i ich wpływu na trwałość, oraz ewentualnych badań jakie należy wykonać podejmuje się w procedurze amerykańskiej zgodnie z poleceniami zawartymi w tablicy III.

Procedura polska

Pierwsze prace nad opracowaniem kryteriów oceny stanu technicznego konstrukcji betonowych prowadził prof. Gołaskiego wraz zespołem badawczym na Politechnice Świętokrzyskiej. W roku 2011 prof. Świt w swojej monografii [6] zaproponował projekt procedury badania stanu technicznego konstrukcji z betonu zbrojonego, która polega na analizie zmian w intensywności emisji akustycznej, generowanej w poszczególnych strefach określonych elementów konstrukcji. Rejestrowane sygnały AE

Tablica III. Interpretacja poszczególnych mierników intensywności EA [3]

Table III. Interpretation of the various measures of intensity EA [3]

Kategoria	Interpretacja
Nieznacząca	–
Mała	Dalsze badania nie są wymagane
Ostrzegawcza	Wymagane dalsze badania
Wysoka	Konieczna naprawa lub usunięcie elementu

są grupowane w klasy, którym przyporządkowane są różne mechanizmy destrukcyjne, jakie powstają w czasie użytkowania obiektów budowlanych. Grupowanie i klasyfikowanie sygnałów AE przeprowadza się metodą rozpoznawania obrazów tworząc bazę sygnałów wzorcowych.







Stopień zagrożenia dla konstrukcji, jakie stwarzają procesy generujące w obrębie jednej klasy są określane poprzez tak zwany kod intensywności procesów destrukcyjnych opisanych poprzez różne kształty punktów, którym przypisana jest klasa jak i kod zagrożenia, co zostało zaprezentowane w tablicy IV. W ocenie stopnia uszkodzenia istotną cechą jest kodyfikacja poziomów uszkodzenia. Obecność każdej klasy podczas monitoringu można uznać, jako kolejny stopień kodu określającego wpływ defektów na stan techniczny

konstrukcji. W ocenie rozległości uszkodzenia wykorzystujemy wyniki lokalizacji strefowej oraz klasyfikację sygnałów w strefach. Miarą rozległości uszkodzenia jest udział procentowy stref, w których wystąpiły określone klasy sygnałów. Kodowanie rozległości uszkodzeń i wrażliwości konstrukcji na uszkodzenia należy przeprowadzić zgodnie z wytycznymi zawartymi w tablicach 5 i 6 a następnie zestawzić z innymi ocenami wszystkich elementów przeprowadzonych metodami tradycyjnymi.

Procedura ta została zweryfikowana na 50 belkach strunobetonowych i żelbetowych oraz na 20 rzeczywistych obiektach mostowych w trakcie przejazdów ponadnormatywnych ze względu na ich masę, potwierdzając wstępnie poprawność przyjętych założeń.

Tablica IV. Klasy, symbole i kody sygnałów AE [6+8]

Table IV. Classes, symbols and codes AE signals [6+8]

Kolor							+	X
Nr klasy	1	2	3	4	5	6	7	8
Kod zagrożenia	5	4	3	3	2	2	1	0

Tablica V. Kodowanie rozległości uszkodzeń [6]

Table V. Coding of the injury extent [6]

Kod	Opis
A	Brak znaczących wad
B	Mała liczba wad, obejmująca nie więcej niż 5% powierzchni / długości lub liczby elementów
C	Umiarkowana liczba wad, obejmująca od 5 do 20% powierzchni / długości lub liczby elementów
D	Duża liczba wad, obejmująca od 20 do 50% powierzchni / długości lub liczby elementów
E	Rozległe wady, obejmująca od 50 do 70% powierzchni / długości lub liczby elementów
F	Rozległe uszkodzenia, obejmujące więcej niż 70% powierzchni / długości lub liczby elementów

Tablica VI. Wpływu defektów na stan techniczny konstrukcji

Table VI. Impact of defects on the condition of the structure

Kod	Opis	Nr klasy	Szeokość rozwarcia rysy, mm
0	Element niespełniający swojej funkcji użytkowej bądź zniszczony	8	> 0,4
1	poważna wada/uszkodzenie i/albo element jest blisko awarii/zniszczenia	7	
2	Umiarkowana wada/uszkodzenie, która może mieć wpływ na utratę nośności	5, 6	
3	Pierwsze oznaki pogorszenia stanu technicznego konstrukcji, pojawiają się niewielkie wady/uszkodzenia, niewpływające na nośność elementu	3, 4	0,2÷0,4
4	Nowy element bądź element z wadą niemającą wpływu na jego nośność	2	0÷0,2
5	Nowy element bez wad	1	

Podsumowanie

Analizując metody i procedury EA stosowane w diagnostyce konstrukcji betonowych widać, że ich koncepcje ciągle ulegają zmianom wraz z doświadczeniem, jakie ich autorzy uzyskują. Należy podkreślić, że stosowanie zaproponowanych kryteriów w procedurach japońskiej i amerykańskiej w pewnych szczególnych przypadkach, takich jak: badania próbek, modeli, małych elementów konstrukcyjnych na stanowiskach laboratoryjnych, daje prawidłowe wyniki i na ich podstawie można prognozować trwałość konstrukcji. Jednakże w przypadku badania obiektów mostowych uzyskanie poprawnych wyników jest bardzo utrudnione z powodu wielu problemów wynikających z pomiaru w warunkach polowych [3÷5]. Procedury japońska i amerykańska bazują na dokładnym pomiarze obciążenia według ściśle określonego schematu [3, 5]. Dodatkowo procedury te opracowane są dla tylko dla wybranych elementów przebadanych w warunkach laboratoryjnych. Natomiast stan techniczny obiektów mostowych należy oceniać w warunkach ich pracy z uwzględnieniem wpływu otoczenia. Warunki te nie są możliwe do ujęcia w sposób deterministyczny, lecz są procesem losowym. Oceniając konstrukcję należy uwzględnić także współdziałanie różnych elementów konstrukcji jak i wzajemne oddziaływanie defektów obecnych w obiekcie. Dlatego obecne procedury oparte na precyzyjnym sterowaniu obciążeniem utrudniają prowadzenie diagnostyki dużych obiektów budowlanych w warunkach

polowych. Od stosowanych obecnie metod i procedur oczekuje się raczej informacji umożliwiających na ich podstawie wnioskowanie o wpływie rejestrowanych defektów na nośność i trwałość konstrukcji. W warunkach, w jakich pracują obiekty mostowe, budynki i budowle, ocena na podstawie obecnych kryteriów bazujących na pojedynczych parametrach sygnałów akustycznych nie stwarza szans na rozwiązanie problemu [4].

Taką możliwość stwarza na dzień dzisiejszy zastosowanie techniki emisji akustycznej z wykorzystaniem analizy procesów destrukcyjnych zachodzących w elementach konstrukcji budowlanych zaproponowaną w polskiej procedurze [6÷8]. Każdy proces destrukcyjny jest źródłem emisji akustycznej, które jest charakteryzowane poprzez deskryptory rejestrowanego sygnału [6]. Wielkości te umożliwiają klasyfikację sygnałów a tym samym procesów destrukcyjnych. Dzięki połączeniu procesów destrukcyjnych z rozległością uszkodzeń a także z ich wpływem na bezpieczeństwo istnieje możliwość prowadzenia obserwacji stanu technicznego konstrukcji na bieżąco i prognozowanie zmian trwałości obiektu. Powiązanie sygnałów EA z procesami destrukcyjnymi i szerokością rys daje podstawy do dalszych prac nad opracowaniem modeli statystycznych i probabilistycznych opisujących zmiany trwałości konstrukcji z uwzględnieniem rzeczywistych warunków pracy i intensywności rozwoju uszkodzeń konstrukcji mierzonych „in-situ”.

Literatura

- [1] A.M. Brandt: Trwałość obiektów inżynierskich a zrównoważony rozwój, Konferencja Problemy Naukowo-Badawcze Budownictwa Białystok-Krynica 2008, tom IV, s.169-183.
- [2] A. Ajdukiewicz: Konstrukcje betonowe projektowane na okres użytkowania-badania a nowe ujęcie normatywne. Monografia: Problemy naukowo-badawcze budownictwa. Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, Białystok 2007; Tom II-Konstrukcje budowlane i inżynierski, s.15-38.
- [3] B.V. Tinkey, T.J. Fowler, R.E. Klingner: Nondestructive Testing of Prestressed Bridge Girders with Distributed Damage, Research Raport 1857-2, Center for Transportation Research The University of Texas at Austin, (2002).
- [4] S. Yuyama, T. Okamoto, M. Shigeiski, M. Ohtsu and T. Kisi: A Proposed Standard for Evaluating Integrity of Reinforced Concrete Beams by Acoustic Emission: Standard and Technology Update, ASTM STP 1353, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, (1999).
- [5] Recommended Practice for In-Situ Monitoring of Concrete Structures by Acoustic Emission, NDIS 2421, Japanese Society for Non-Destructive Inspection, 2000.
- [6] G. Świt.: Analiza Procesów Destrukcyjnych w Obiektach Mostowych z Belek Strunobetonowych z Wykorzystaniem Zjawiska Emisji Akustycznej, Monografia. Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej „Monografie, studia, rozprawy” M21/2011, s.179 (PL ISSN 1897-2691).
- [7] B. Goszczyńska, G. Świt, W. Trąmpczyński, A. Krampikowska: Application Of The Acoustic Emission To Bridge Testing And Diagnosis; Comparison Of Procedures [w:] Prognostics and System Health Management”, IEEE Catalog Number CFP12PHM-ART; May 2012, Beijing , s. 1-10.
- [8] B. Goszczyńska, G. Świt, W. Trąmpczyński: Monitoring of Active Destructive Processes as a Diagnostic Tool for the Structure Technical State Evaluation, Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Vol. 61, No 1, 2013, ISSN 0239-7528.
- [9] J. Hoła: Naprężenia inicjujące i krytyczne, a destrukcja naprężeniowa w betonie ściskanym, Politechnika Wroclawska, Prace Naukowe 2000, Instytut Budownictwa, nr 76, Monografie nr 33.