ZBIGNIEW RANACHOWSKI¹⁾

EMISJA AKUSTYCZNA W DIAGNOSTYCE OBIEKTÓW BUDOWLANYCH

STRESZCZENIE. W artykule przedstawiono powstawanie sygnału emisji akustycznej (EA) oraz wykorzystanie tego sygnału w diagnostyce obiektów technicznych. Opisano własności sensorów EA i aparaturę do rejestracji sygnału. Przedstawiono przykładowo trzy obszary zastosowania metody EA w technice: monitorowanie stanu technicznego konstrukcji żelbetowych, zbiorników ciśnieniowych i mostów stalowych. Rejestrowanie i analizowanie sygnału EA okazało się skutecznym narzędziem, rozwijanym w wielu laboratoriach i stosowanym coraz powszechniej w diagnostyce konstrukcji.

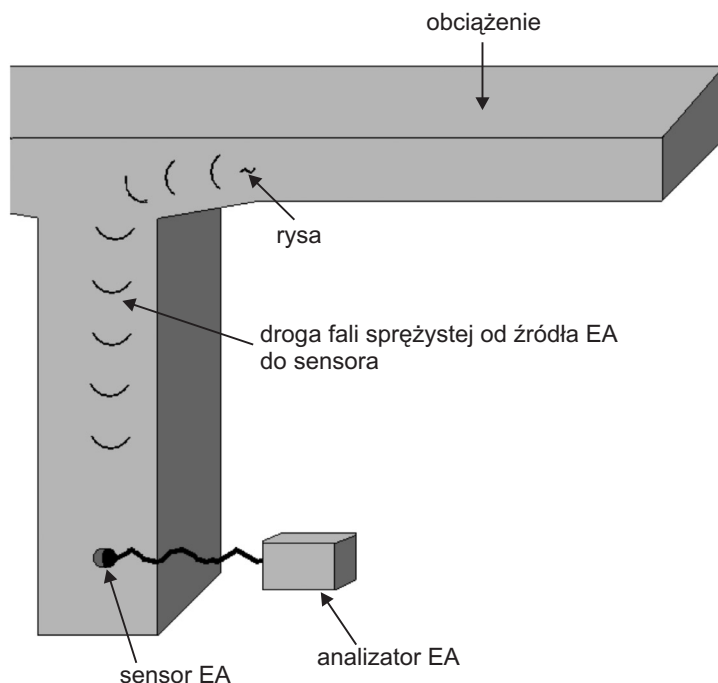
SŁOWA KLUCZOWE: badania nieniszczące, diagnostyka obiektów inżynierskich, eksploatacja obiektów żelbetowych, emisja akustyczna.

1. WPROWADZENIE

Metoda emisji akustycznej (EA) należy do szeroko stosowanych metod monitorowania obiektów technicznych takich jak: obiekty inżynierskie, rurociągi, zbiorniki sprężonego gazu, silniki spalinowe, transformatory energetyczne. Należy do grupy metod pasywnych, to znaczy, że aparatura EA nie emituje sygnałów i nie wpływa na stan fizyczny badanego obiektu, natomiast rejestruje jedynie efekty fizyczne samoistnie powstające w monitorowanym obiekcie. Źródłami sygnału emisji akustycznej są: powstające i propagujące mikrorysy, procesy korozyjne, pękanie strun w konstrukcjach sprężonych,

¹⁾ dr hab. inż. – profesor Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN w Warszawie

ulatanie się gazu przez nieszczelność konstrukcji ciśnieniowej lub uszkodzenie izolacji wysokonapięciowych urządzeń energetycznych, to znaczy procesy, w których powstają i propagują się w obiekcie fale sprężyste. Aparatura EA rejestruje sygnał generowany w badanym obiekcie w trakcie jego normalnej eksploatacji lub podczas testów próbnych. Zasada pomiaru sygnału EA została przedstawiona na rysunku 1. Fale sprężyste generowane w źródle EA rozchodzą się od tego źródła we wszystkich kierunkach w objętości monitorowanego obiektu. Fale sprężyste docierają do sensora EA, a następnie są transmitowane do analizatora EA w postaci zmian napięcia elektrycznego. Model matematyczny propagacji tych fal i towarzyszących temu procesowi zmian ich postaci jest dosyć złożony i wykorzystuje własności funkcji Greena [1]. Aparatura pomiarowa składa się z sensora EA przetwarzającego sygnał EA na zmienne napięcie elektryczne, analizatora EA wzmacniającego to napięcie i eliminującego sygnały nie pochodzące od monitorowanego źródła (tło akustyczne) oraz z urządzenia rejestrującego sygnał EA.



Rys. 1. Schemat generacji i rejestracji sygnału EA, spowodowanego rysą w konstrukcji
Fig. 1. Schematic diagram of evoking and registering of the acoustic emission (AE)

Celem artykułu jest przedstawienie podstaw i metod obróbki sygnału EA. Opisano również własności sensorów EA i parametry charakteryzujące natężenie rejestrowanego sygnału EA. Przedstawiono metody lokalizacji źródeł EA i metody monitorowania zmian ich rozmiarów. Podano wymagania techniczne odnoszące się do aparatury stosowanej w diagnostyce, a także konkretne przykłady badań diagnostycznych.

2. OPIS ZJAWISKA I METOD POMIAROWYCH

2.1. SENSORY EA

Źródła EA w ciałach stałych w generują sygnał EA w postaci drgań harmonicznycch w szerokim przedziale częstotliwości. Własności użytkowe sensorów EA charakteryzuje się za pomocą dwóch parametrów: pasma użytkowego, czyli przedziału rejestrowanych częstotliwości oraz czułości, czyli wartości napięcia generowanego w czasie pobudzenia określonym sygnałem EA. Stosowane są dwa typy sensorów: rezonansowe i szerokopasmowe. Sensory rezonansowe rejestrują sygnał EA w jednym z przedziałów częstotliwości: dolnym (20 - 100 kHz), pośrednim (100 - 450 kHz) i wysokim (200 - 1000 kHz). Sensory szerokopasmowe mają możliwość rejestracji sygnałów w kilku z podanych wyżej pasm częstotliwości, a ich budowa jest bardziej złożona w porównaniu z sensorami rezonansowymi, co rzutuje na koszt wykonania. Zastosowanie sensorów szerokopasmowych jest celowe w badaniach kompozytów i elementów ceramicznych, natomiast w przypadku diagnostyki elementów betonowych i stalowych stosuje się sensory rezonansowe pracujące w jednym z dwóch niższych przedziałów częstotliwości podanych wyżej.

Czułość sensorów rejestrujących sygnał EA jest określana przy pomocy procedur wykorzystujących pobudzenie wzorcową falą sprężystą. Drgania harmoniczne powierzchni badanego obiektu mogą być charakteryzowane za pomocą dwóch jednoznacznie zależnych od siebie parametrów: maksymalnej prędkości [m/s] lub maksymalnego przyspieszenia [m/s²]. Te dwie wielkości są stosowane przy określaniu czułości sensorów EA. Uwzględniając masę sensora i pole jego powierzchni czołowej sprężonej z badanym obiektem możliwe jest określenie czułości sensora poprzez podanie napięcia na jego wyjściu przy pobudzeniu go określoną falą ciśnienia (zamiast podawania wartości przyspieszenia występującego na wejściu sensora). Ciśnienie to jest odnoszone do napięcia wytwarzanego na wyjściu sensora z tym, że to napięcie jest unormowane do umownego poziomu odniesienia 1 V i podawane w skali logarytmicznej (w decybelach), zatem czułość S sensora EA można opisać wzorem:

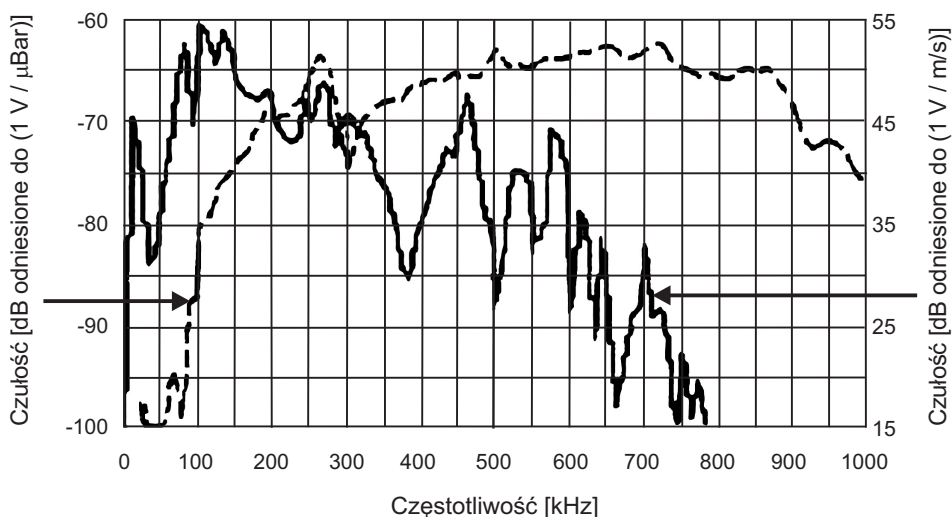
$$S = 20 \cdot \log (u_n / p), \quad (1)$$

gdzie u_n jest wartością skuteczną napięcia rejestrowaną na sensorze pobudzonym falą sprężystą wywołującą na powierzchni sensora ciśnienie o wartości skutecznej p , wyrażone w mikrobarach. Czułość sensora EA jest różna przy różnych częstotliwościach odbieranego przezeń sygnału i dlatego producenci sensorów dostarczają wraz z produktem jego charakterystykę w postaci zależności parametru S od częstotliwości w paśmie roboczym. Sensory dobrej klasy charakteryzują się czułością nie niższą niż -60 dB odniesioną do 1 V napięcia wyjściowego i 1 mikrobara ciśnienia wejściowego. Lewa skala i krzywa oznaczona linią przerywaną na rysunku 2 pokazują zależność czułości S od częstotliwości odbieranego sygnału EA sensora szerokopasmowego wysokiej jakości [2]. Jeżeli ten sam sensor jest pobudzany drganiami harmonicznymi o znanej prędkości, to zależność jego czułości od częstotliwości ma odmienny przebieg niż w przypadku pobudzenia zmianami ciśnienia. Jest to skutkiem zmniejsza-

niasię prędkości maksymalnej V wraz ze wzrostem częstotliwości, gdy fala sprężysta ma stałe przyspieszenie A :

$$V = a / 2 \cdot \pi \cdot f . \quad (2)$$

Prawa skala i krzywa oznaczona linią ciągłą na rysunku 2 pokazują zależność czułości sensora szerokopasmowego od częstotliwości określoną w decybelach odniesionych do pobudzenia sensora falą sprężystą o prędkości 1 [m/s].



Rys. 2. Typowa zależność czułości sensora EA, wyrażona w dB / 1 mikrobar oraz w woltach na jednostkę prędkości fali sprężystej w funkcji częstotliwości sygnału EA

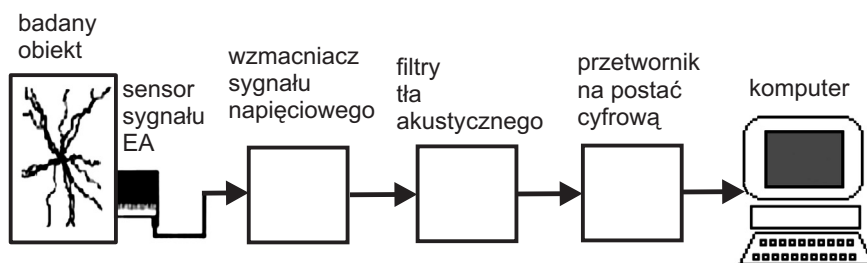
Fig. 2. Typical sensitivity versus AE signal frequency dependence, expressed in Decibels referred to 1 microbar and in Volts referred to elastic wave velocity unit

Sygnal EA na wyjściu sensora charakteryzuje się niskim napięciem (0,1 - 100 mV), co sprawia, że może on zostać zakłócony wskutek oddziaływania lokalnych pól elektromagnetycznych. Dlatego sensor powinien znajdować się w odległości co najwyżej kilku metrów od przenośnego analizatora sygnału albo sensor musi mieć wbudowany standardowy moduł wzmacniający, umożliwiający dalszą transmisję drogą kablową na odległość do około 150 metrów. Jest to istotne zwłaszcza przy monitorowaniu rozległych obiektów takich jak: mosty, zbiorniki paliw czy rurociągi.

2.2. OBRÓBKA SYGNAŁU EA

W analizatorze EA sygnał z sensora jest wzmacniany i poddawany filtracji w celu usunięcia tła akustycznego pochodzącego z otoczenia monitorowanego obiektu. W przypadku badań polowych tło akustyczne jest generowane przez pracujące urządzenia

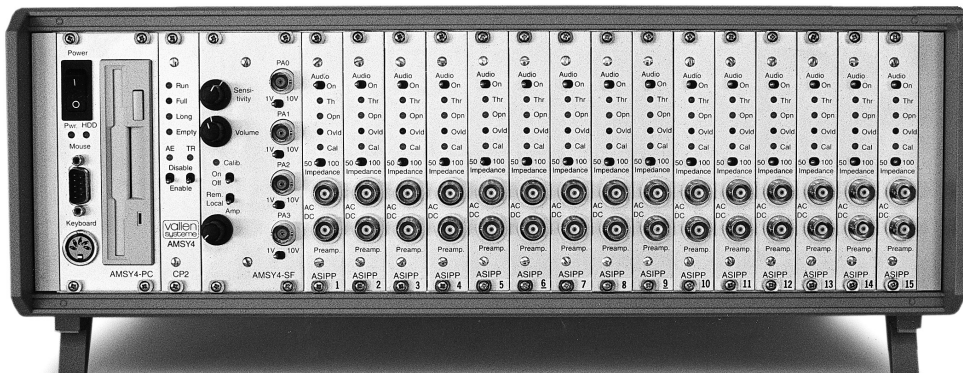
i poruszające się pojazdy; w laboratorium źródłem są m.in. urządzenia używane do mechanicznego obciążania badanych elementów. Po wzmocnieniu i filtracji sygnał EA jest jego przekształcany na postać cyfrową, a dalsza jego obróbka jest prowadzona za pomocą wyspecjalizowanych procesorów lub komputerów. Rejestracji sygnału EA dokonuje się w jednostkach szybkiej pamięci masowej. Przedstawiony wyżej system pomiarowy jest przedstawiony w postaci schematu blokowego na rysunku 3. Jednokanałowy analizator EA zaprojektowany do zastosowań terenowych, wyposażony w zasilanie akumulatorowe, mikroprocesor i pamięć nieulotną do rejestracji wyników pomiaru typu FLASH przedstawiono na rysunku 4. Wielokanałowy laboratoryjny analizator EA z wbudowanym komputerem przemysłowym, pracującym pod systemem Windows przedstawiono na rysunku 5. Zastosowanie analizatorów wielokanałowych pozwala na lokalizację źródeł EA w obiektach, a także na wyznaczanie rozmiaru aktywnego obszaru emitującego sygnał EA.



Rys. 3. Schemat blokowy jednego kanału obróbki sygnału EA
Fig. 3. Schematic diagram of a single-channel of AE signal processing

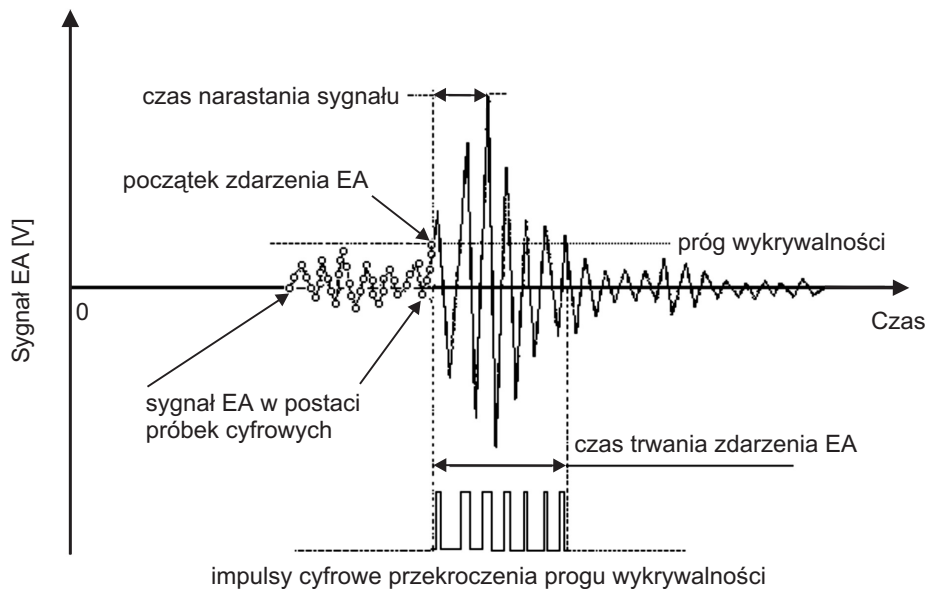


Rys. 4. Przenośny jednokanałowy analizator sygnału EA
Fig. 4. A single-channel portable AE signal analyser



Rys. 5. Laboracyjny 15-kanalowy analizator sygnału EA
Fig. 5. A 15-channel AE signal analyser for laboratory use

W wyniku obróbki sygnału EA uzyskiwana jest informacja o jego zmianach w funkcji czasu, a także wyznaczana jest charakterystyka natężenia w funkcji częstotliwości. Ponieważ w ciągu każdej sekundy rejestracji jest gromadzone od 100 kilobajtów do kilku megabajtów danych, procesory sygnału EA muszą się charakteryzować wysoką wydajnością. Schemat procedury wyznaczania parametrów opisujących zmiany w sygnale EA zaprezentowano na rysunku 6.



Rys. 6. Parametry sygnału EA określone w trakcie jego obróbki
Fig. 6. Acoustic emission signal descriptors determined during its processing

Początkowy fragment sygnału EA pokazano na nim w postaci kółek symbolizujących dyskretne (zdigitalizowane) wartości i w tej postaci wartości te są reprezentowane w komputerze. Zmiany sygnału EA są określane w ten sposób, że wykrywany jest moment przekroczenia przez wartość chwilową sygnału określonego poziomu. W sygnale EA można odróżnić następujące parametry nazywane deskryptorami EA:

- czas trwania zdarzenia EA; jest to przedział pomiędzy pierwszym i ostatnim przekroczeniem progu wykrywalności przez sygnał,
- liczba zliczeń emisji akustycznej; jest to liczba wykrytych przekroczeń określonej wartości napięcia,
- maksymalna amplituda w czasie trwania zdarzenia EA.

Rozszerzony wykaz najczęściej stosowanych deskryptorów EA zamieszczono w tabelicy 1.

Tablica 1. Najczęściej stosowane deskryptory EA [2]
Table 1. Frequently used descriptors of acoustic emission [2]

Nazwa deskryptora	Dodatkowe wyjaśnienia
Pochodne zmian w czasie	
Suma przekroczeń	Uzyskuje się przez zliczanie obszarów, w których amplituda przekracza próg wykrywalności
Suma zdarzeń całego pomiaru	Suma wszystkich zdarzeń emisji akustycznej zarejestrowanych w serii pomiarowej
Średnia liczba zdarzeń w serii pomiarowej	Suma zdarzeń EA zarejestrowanych w serii pomiarowej podzielona przez liczbę pomiarów n_i $N_{sr} = \frac{\sum N_{zd}}{n_i}$
Liczba przejść przez wybrany poziom amplitud	Liczba przekroczeń 10%, 20%, 50% amplitudy maksymalnej
Pochodne przebiegów czasowych	
Amplituda szczytowa U_m	Maksymalna amplituda w czasie trwania sygnału impulsowego
Średnia wartość amplitudy w serii pomiarowej	Suma amplitud szczytowych wszystkich zdarzeń EA zarejestrowanych w serii pomiarowej podzielona przez liczbę zdarzeń $U_{sr} = \frac{\sum U_m}{N_{zd}}$
Powierzchnia nad wartością średnią	Suma iloczynów kolejnych próbek wartości sygnału i przedziałów próbkowania
Okres półtrwania	Czas trwania sygnału do osiągnięcia połowy amplitudy

Cd. tablicy 1. Najczęściej stosowane deskryptory EA [2]
 Table 1. Frequently used descriptors of acoustic emission [2]

Nazwa deskryptora	Dodatkowe wyjaśnienia
Pochodne energii	
Wartość skuteczna za przedział czasu T	$U_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt}$
Współczynnik kształtu	Stosunek U_m do U_{rms}
Energia zdarzenia EA	Połowa iloczynu amplitudy szczytowej i czasu trwania zdarzenia podzielona przez wartość impedancji sensora $E_{zd} = \frac{1}{2} U_m^2 \cdot \Delta t / Z$
Średnia energia zdarzeń EA w serii pomiarowej	Suma energii E_{zd} wszystkich zdarzeń EA zarejestrowanych w serii pomiarowej podzielona przez liczbę N_{zd} zdarzeń $E_{sr} = \frac{\sum E_{zd}}{N_{zd}}$
Pochodne rozkładu częstotliwościowego	
Mediana rozkładu widmowego	Granica podziału rozkładu na części o równej mocy
Współczynnik kształtu prążków widmowych	Stosunek prążka maksymalnego do średniej wartości prążka
Liczba przekroczeń wybranego poziomu przez prążki widma	Liczba przekroczeń 10%, 20%, 50% wartości prążka maksymalnego

2.3. LOKALIZACJA ŹRÓDEŁ EA

Lokalizacja źródeł sygnału EA przy zastosowaniu aparatury wielokanałowej jest wykonywana w sposób następujący. Przy założeniu stałej prędkości v propagacji fali sprężystej w badanym materiale wykonywany jest pomiar różnicy odległości Δl źródła EA od pary sensorów. Pomiar Δl jest dokonywany drogą pośrednią przez wyznaczenie różnicy Δt czasu odebrania sygnału EA przez parę sensorów:

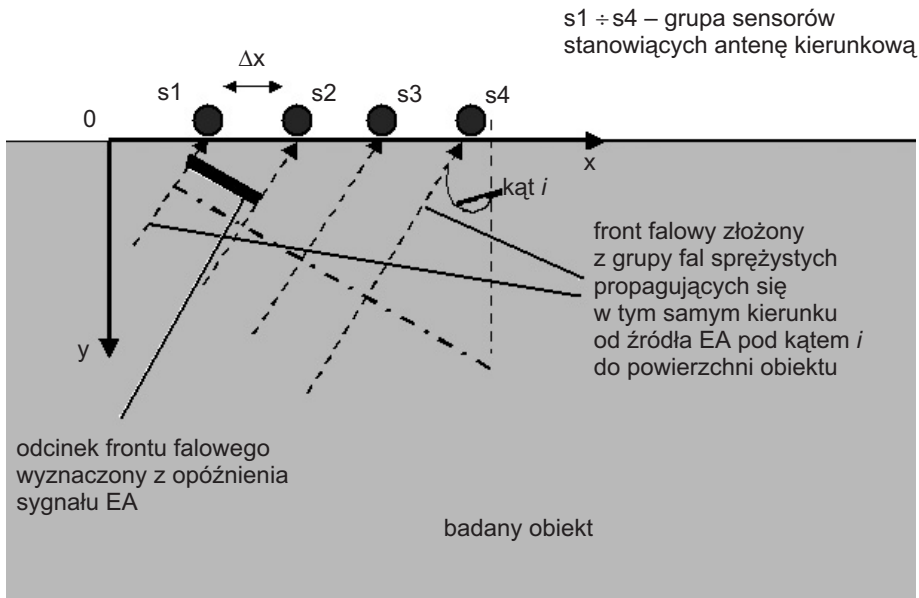
$$\Delta l = v \cdot \Delta t . \quad (3)$$

Miejszem geometrycznym punktów na płaszczyźnie, w których bezwzględna różnica odległości $|\Delta l|$ od ustalonych lokalizacji pary sensorów (tj. ognisk krzywej) jest hiperbola. Zatem możliwym miejscem usytuowania źródła EA są punkty należące do tej hiperboli. Uzupełnienie uzyskanej w ten sposób informacji o współrzędne drugiej hiperboli, która przecina opisaną wyżej krzywą, co umożliwi wyznaczenie współrzędnych źródła EA, uzyskuje się w wyniku analizy sygnałów odebranych przez sensory położone w dwóch innych punktach monitorowanego obszaru.

Rozwiązaniem alternatywnym są bardziej złożone systemy sensorów EA, nazywane antenami. Systemy te rozmieszczone są na powierzchni obiektu w sposób pokazany na rysunku 7. Analiza różnic czasu nadejścia sygnału EA docierającego do elementów składowych takiego systemu stwarza możliwość określenia kierunku, z którego ten sygnał jest propagowany. Do sensorów s_1, s_2, \dots, s_4 sygnał EA dociera kolejno z opóźnieniem Δt w miarę jak front falowy (grupa fal sprężystych), pochodzący od źródła EA zbliża się do sensorów. Odległość pomiędzy sensorami w antenie pokazanej na rysunku 7 wynosi Δx . Przy założeniu, że sygnał EA dochodzi do kolejnych sensorów z opóźnieniem Δt można analogicznie jak we wzorze (3) wyznaczyć odcinek opóźnienia frontu falowego $\Delta l = v \cdot \Delta t$. Proste zależności geometryczne pozwalają wyznaczyć kąt i pomiędzy wiązką padającą od źródła EA a płaszczyzną anteny kierunkowej analogicznie jak w równaniu (1) z zależności:

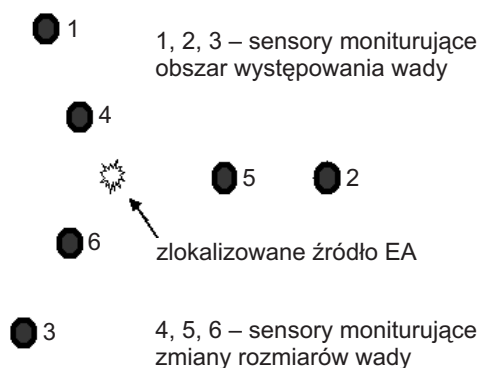
$$\sin i = v \frac{\Delta t}{\Delta x} . \quad (4)$$

Większa liczba anten umieszczonych pod różnymi kątami umożliwi efektywną lokalizację źródeł EA.



Rys. 7. Antena kierunkowa zbudowana z grupy sensorów s_1, s_2, \dots, s_4 i umożliwiająca wyznaczenie kierunku, z którego propaguje się fala sprężysta EA
Fig. 7. AE sensor s_1, s_2, \dots, s_4 array intended to resolve an incidence angle of arriving AE elastic wave

Inną metodą monitorowania źródła EA jest ograniczenie się do „nasłuchu” sygnału z konkretnego miejsca (np. pęknięcia wykrytego metodą defektoskopii ultradźwiękowej) z eliminacją sygnałów nadchodzących z otoczenia. W przypadku prowadzenia pomiarów na eksploatowanym obiekcie na ogół odbieranych jest wiele sygnałów wywołanych przez poruszające się pojazdy, elementy konstrukcji odkształcające się w wyniku relaksacji naprężeń termicznych i tym podobne. Opisywana metoda jest określana terminem rejestracji selektywnej (ang. *guard sensing*). Metoda ta jest efektywna przy długotrwałym badaniu eksploatowanych konstrukcji w celu monitorowania wykrytego pęknięcia, jeżeli jego usytuowanie nie wymaga natychmiastowego podjęcia procedury naprawczej. Przykład rozmieszczenia sensorów w metodzie *guard sensing* pokazano na rysunku 8. Wszystkie sensory są połączone z analizatorem EA, umożliwiającym określenie czasu zarejestrowania przez nie sygnału. Jeżeli sygnał jest rejestrowany wcześniej przez grupę sensorów położonych bliżej od monitorowanego uszkodzenia (tj. sensory nr 4, 5 i 6) od sensorów ustalających obszar w którym znajduje się to uszkodzenie (sensory 1, 2, 3) to sygnał ten jest klasyfikowany jako pochodzący od monitorowanego uszkodzenia. Jednocześnie sensory wewnętrzne umożliwiają precyzyjną lokalizację miejsca, z którego sygnał jest generowany co umożliwia śledzenie zmian jego wymiarów.



Rys. 8. Rozmieszczenie sensorów EA (oznaczonych jako 1, 2, 3, 4, 5 i 6) w metodzie *guard sensing*

Fig. 8. Arrangement of group of AE sensors (labelled as 1, 2, 3, 4, 5 and 6) operating in a guard sensing mode

W dostępnych źródłach znaleźć można opisy procedur kalibracji torów analizatorów EA opracowane przez lokalne urzędy normalizacyjne. Dotyczą one metod powtarzalnego wytwarzania sygnału typu impulsowego zbliżonego swoją naturą do sygnałów generowanych w badanych elementach, który mógłby być rejestrowany przez te tory przed rozpoczęciem właściwego pomiaru [3]. W trakcie procesu kalibracji reguluje się aparaturę w taki sposób, aby zapewnić jednakowy we wszystkich pomiarach poziom czułości różnych części składowych stosowanego sprzętu. Najbardziej rozpowszechniony jest test A. Nielsena [3]. Sygnał wzorcowy jest generowany przy pomocy teflonowej nakładki na ołówek automatyczny, przez którą wysuwa się 3 mm

grafitu o grubości 0,5 mm i twardości 2H. Nakładka eliminuje tarcie ołówka o brzeg obiektu w trakcie prowadzenia testu. Po wysunięciu grafitu łamie się go na badanym elemencie przez naciśnięcie na ukośnie ustawioną nakładkę. Odpowiada to wytworzeniu na powierzchni badanego obiektu skokowego impulsu siły o amplitudzie około 1,6 N. Średnie odchylenie standardowe amplitudy sygnału EA mierzone w ten sposób w serii 10 prób wynosi około 5%. Dopuszcza się nieuniknione różnice wyznaczanych amplitud sygnału w porównywanych torach do wartości nie przekraczającej 4 dB. Energia emitowana w trakcie opisanego testu jest porównywalna z sygnałem generowanym przez duże źródło EA (typu rysy propagującej się o 0,1 mm w stali konstrukcyjnej).

3. BADANIE EFEKTÓW EA W OBIEKTACH ŻELBETOWYCH

W elementach betonowych występują efektywne źródła generacji sygnałów EA pod wpływem obciążeń, oddziaływań klimatycznych i in. Te elementy zawierają rozproszone losowo liczne mikrodefekty powstające podczas wiązania i rozwijające się w trakcie twardnienia mieszanki betonowej: pory i mikropory, rysy i mikrorysy. W stwardniałym betonie powstają strefy lokalnych naprężeń, związane z niejednorodnością betonu, to znaczy z obecnością kruszywa, uzbrojenia lub włókien zbrojenia w matrycy cementowej. Powoduje to silne zakłócenia w propagacji sygnałów EA w objętości badanego elementu. Rejestrację sygnałów EA w betonie ściskanym zapoczątkował w 1959 r. Rüş [4].

Obecnie liczne ośrodki w wielu krajach prowadzą zaawansowane badania betonowych elementów konstrukcyjnych metodą emisji akustycznej. Badane są rozmaite konstrukcje, będące z różnych powodów przedmiotem prac diagnostycznych. W wielu krajach, m.in. w Stanach Zjednoczonych i Japonii opracowano zalecenia dotyczące parametrów aparatury pomiarowej EA w celu umożliwienia porównywania otrzymanych wyników. Zalecenia te sformułowano w obu wyżej wymienionych krajach odmiennie z powodu stosowania systemów pomiarowych o odmiennej architekturze. Najważniejsze informacje zawarte w zaleceniach przyjętych w tych dwóch krajach zestawiono w tablicy 2. Przyjęto m.in., że sygnał EA może być rejestrowany z odległości nie przekraczającej 2 m jeżeli częstotliwość zakresu maksymalnej czułości sensora EA jest bliska 60 kHz. Jeżeli częstotliwość maksymalnej czułości jest wyższa (150 kHz) to obszar monitorowania sygnałów EA zawęża się do około 1 m. Silne sygnały EA, np. pochodzące od pęknięć prętów zbrojenia, mogą być rejestrowane z odległości kilkunastu metrów przy zastosowaniu sensorów pracujących w paśmie niskich częstotliwości (1 - 20 kHz). Ważnym parametrem zamieszczonym w tablicy 2 jest próg wykrywalności. Sygnały EA o amplitudach niższych od wartości podanych w tej tablicy są interpretowane jako tło akustyczne i nie są rejestrowane. Częstotliwość próbkowania sygnału ma wpływ na pasmo częstotliwościowe sygnału EA, które musi podlegać dalszej obróbce.

Ustalenie wyższej częstotliwości próbkowania wymaga zastosowania aparatury o wyższej mocy obliczeniowej użytej do analizy sygnału i przez to droższej. Zalecenia

podane w tablicy 2 obejmują specyfikację bloku filtrów, które eliminują z sygnału EA składowe o częstotliwościach poniżej i powyżej pewnych częstotliwości granicznych. Zalecenia amerykańskie preferują przetwarzanie szerszego pasma sygnału w porównaniu do zaleceń japońskich i generalnie te pierwsze zalecenia wymagają zastosowania aparatury bardziej uniwersalnej, co może rzutować na jej wyższą efektywność w sensie możliwości wykrycia i monitorowania wad.

Tablica 2. Parametry aparatury pomiarowej do rejestracji sygnału EA
Table 2. Parameters of acoustic emission measurement and recording system

Nazwa parametru	Zalecenia japońskie [5]	Zalecenia amerykańskie [6]
Częstotliwość maksymalnej czułości sensora EA	60 kHz lub 150 kHz (wyższe częstotliwości są bardziej tłumione w betonie, co ogranicza zasięg ich rozprzestrzeniania się)	150 kHz
Wzmocnienie przedwzmacniacza	40 dB	40 dB
Próg wykrywalności odniesiony do 1 mikrowolta	45 dB	45 - 55 dB
Częstotliwość próbkowania sygnału EA	1 MHz	2 MHz
Częstotliwości graniczne bloku filtrów sygnału	20 - 150 kHz	20 - 200 kHz
Czas niezbędny do zapisania segmentu sygnału (czas nieaktywności aparatury)	1000 μ s	400 μ s
Czas martwy toru pomiarowego występujący po odebraniu zdarzenia EA i potrzebny na jego obróbkę	50 - 200 μ s	50 - 200 μ s

W Polsce diagnostyka betonowych obiektów mostowych przeprowadzana jest zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Infrastruktury [7] oraz Zarządzeniem GDDK [8]. Wymienione dokumenty zalecają stosowanie podczas przeglądów bieżących oraz kontroli okresowych tylko obserwację wizualną, natomiast podczas przeglądów szczegółowych zalecane są badania zaawansowane, w tym wykorzystujące metody nieniszczące. Polski Komitet Normalizacyjny wydał cztery normy dotyczących metody EA [9].

Przykłady stosowania metody EA podczas takich badań oraz podział monitorowanych elementów z betonu sprężonego na klasy w oparciu o rodzaj zarejestrowanych w obiektach sygnałów EA podano m.in. w [10]. Rodzaj uszkodzeń występujących w poszczególnych klasach przedstawiono w tablicy 3.

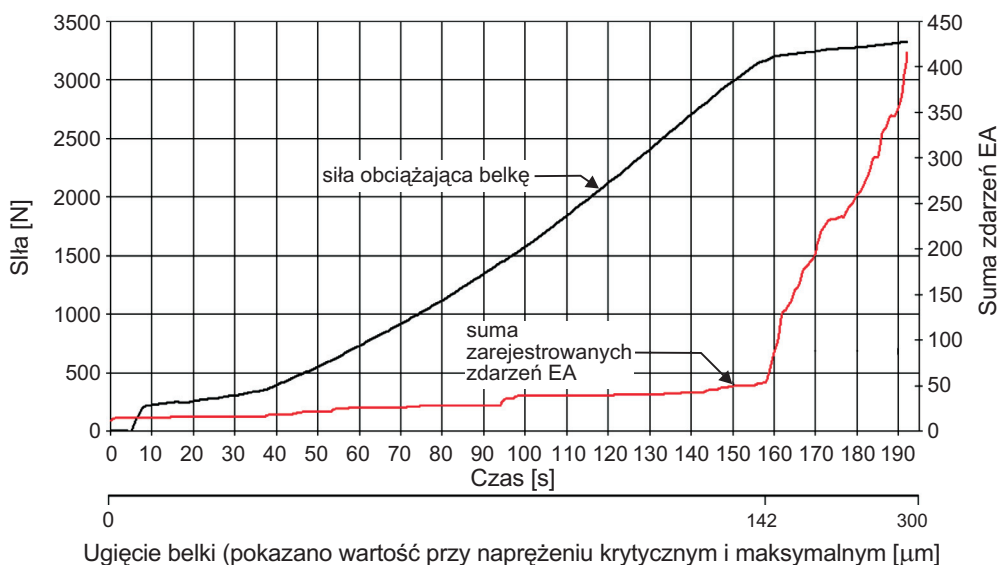
Występowanie sygnałów zakwalifikowanych do klas od 3 do 8 jest interpretowane jako wykrycie procesów niebezpiecznych dla eksploatacji konstrukcji.

Tablica 3. Rodzaje uszkodzeń w elementach z betonu sprężonego identyfikowane za pomocą analizy rejestrowanego sygnału EA
 Table 3. Defects in prestressed concrete elements identified using acoustic emission measurement and analysis system

Oznaczenie klasy	Rodzaj uszkodzenia
1	mikropęknięcia w betonie na granicy frakcji kruszywa o małych wymiarach ($\Phi \leq 2$ mm) i zaprawy cementowej
2	mikropęknięcia w betonie na granicy frakcji kruszywa o małych i średnich wymiarach ($\Phi \leq 8$ mm)
3	powstanie i rozwój rysy w strefie rozciąganej betonu
4	rozwój rysy oraz tarcie na granicy frakcji kruszywa o dużych wymiarach ($\Phi = 8 - 16$ mm)
5	pęknięcia na granicy beton - zbrojenie
6	uplastycznienie stali i betonu
7	odsłojenie się zbrojenia sprężającego od betonu
8	zerwanie splotów sprężających

Badania sygnału EA generowanego w obciążanych mechanicznie elementach betonowych umożliwiły identyfikację dwóch zjawisk towarzyszących temu procesowi. Pierwsze z tych zjawisk to trójstadialna natura rozwoju mikrorys w procesie ściskania elementu betonowego [11]. Zaobserwowano, że w zakresie od 0 do około 0,2 - 0,4 wielkości naprężenia niszczącego w objętości betonu zachodzą procesy stabilnego powstawania mikrorys aktywnych akustycznie. Po przekroczeniu wymienionego powyżej poziomu, określanego jako naprężenie inicjujące, rozpoczyna się etap stabilnego powiększania rozmiarów i łączenia się powstałych defektów. Towarzyszy temu wyższy od poziomu tła poziom rejestrowanego sygnału EA. Etap ten przebiega aż do osiągnięcia około 0,6 - 0,7 naprężenia niszczącego. Po przekroczeniu tego drugiego poziomu, określanego jako naprężenie krytyczne rozpoczyna się bardziej intensywny proces wzrostu rys i wzrost energii rejestrowanego sygnału EA. W trakcie tego stadium destrukcji betonu rejestruje się spadek prędkości fal ultradźwiękowych propagowanych w objętości materiału. Sygnał EA w tym zakresie obciążania betonu charakteryzuje się najwyższą intensywnością.

Przykład sygnału EA wykazującego znaczący wzrost intensywności po osiągnięciu naprężenia krytycznego w badanym elemencie pokazano na rysunku 9. Przedstawiono na nim wyniki badania przeprowadzonego w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN. W trakcie badania poddano zginaniu za pomocą pary sił skupionych beleczki o wymiarach $40 \times 40 \times 220$ mm. Beleczki były wykonane z zaprawy betonowej zbrojonej włóknem stalowym Dramix® Hi Perform o średnicy 0,16 mm i długości 6 mm, zapewniającym wysoką efektywność mechaniczną i odporność matrycy na spękanie. Pomiar ugięcia w środku rozpiętości był wykonywany z dokładnością 0,01 mm za pomocą sensora pojemnościowego. Eksperyment prowadzono do umownego początku zarysowania elementu, przyjętego po osiągnięciu ugięcia 300 mikrometrów. Na rysunku 9 krytyczny wzrost sumy zdarzeń emisji akustycznej wystąpił po osiągnięciu przez siłę obciążającą próbkę wartości 3169 N, to jest w 160 sekundzie eksperymentu.



Rys. 9. Zależności czasowe siły i sumy zdarzeń EA rejestrowanych w beleczce z zaprawy cementowej zbrojonej włóknami stalowymi podlegającej procedurze zginania dwiema siłami skupionymi

Fig. 9. Bending load and sum of acoustic emission events in time for a small beam made of cement mortar reinforced with steel fibres during bending test

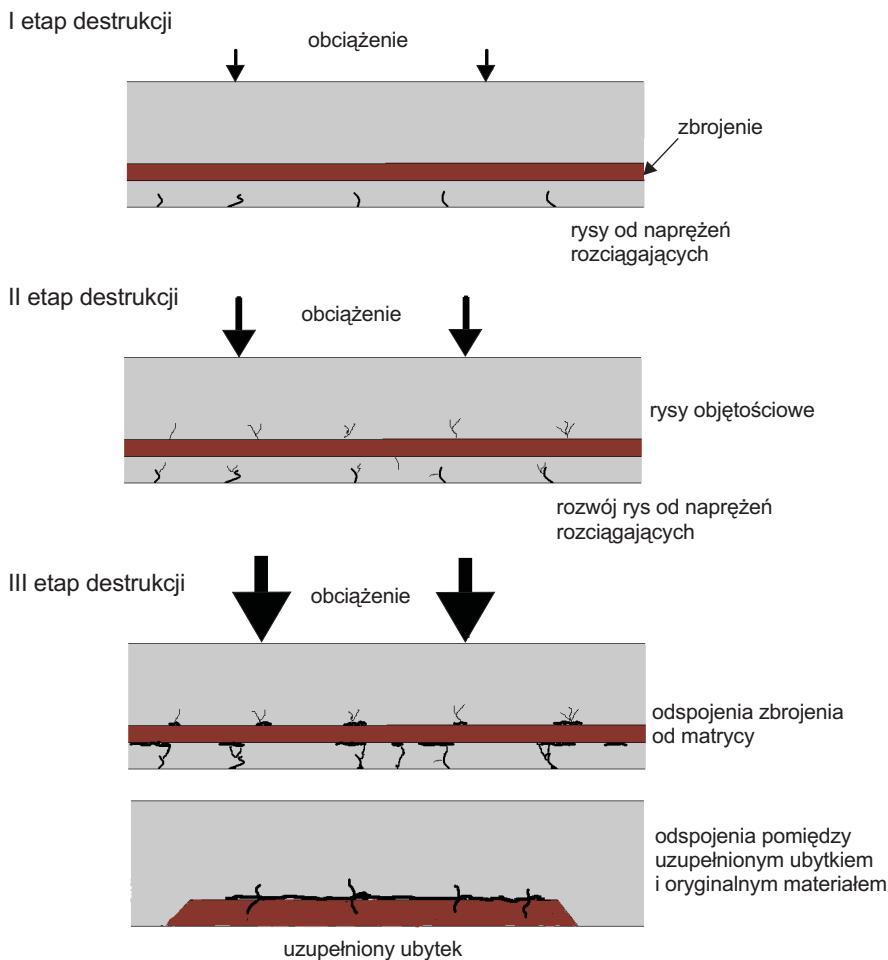
Metoda EA została również zastosowana do identyfikacji składników próbek betonowych poddawanych badaniu metodą pomiaru mikrotwardości. W ramach tych badań [12] stwierdzono, że wartość energii sygnału EA generowanego w trakcie wykonywania odcisków w matrycy cementowej, w kruszywie granitowym oraz w tak zwanych „obszarach o niskiej zwartości” jest zróżnicowana. W przypadku odcisków w ziarnach kruszywa otrzymano średnie wyniki energii sygnału EA 14225 jednostek umownych (j.u.), w trakcie wykonywania odcisków w matrycy cementowej rejestrowano średnio wartość 9724 j.u., natomiast w „obszarach o niskiej zwartości” otrzymywano średnio 11682 j.u. Opisanie wyżej pomiary miały na celu otrzymanie informacji o wpływie dodatku popiołów lotnych na zmiany mikrostruktury otrzymanych mieszanek betonowych.

W betonie obserwuje się także tzw. efekt Kaisera w trakcie wielokrotnego obciążania elementu. Podczas pierwszego cyklu obciążania w materiale następuje rozwój rys, wywołujących generację sygnału EA. Jeżeli ten proces zostanie przerwany przez zatrzymanie wzrostu obciążenia, a następnie będzie prowadzony od niewielkiej wartości obciążenia to dalszy rozwój rys i towarzysząca mu generacja sygnału EA rozpocznie się dopiero po przekroczeniu poprzedniego poziomu obciążenia elementu. Stwarza to możliwość poznania historii obciążania badanego obiektu. Jako przykład można podać badanie przeprowadzone na Politechnice Wrocławskiej [13], podczas którego rejestrowano generację sygnału EA w trakcie obciążania zbrojonej belki żelbetowej

o długości 3,8 m i przekroju $0,3 \times 0,3$ m, zginanej metodą trójpunktową za pomocą hydraulicznej maszyny wytrzymałościowej. W trakcie pierwszego cyklu obciążono belkę siłą F_0 , nie powodującą powstania naprężeń krytycznych. Następnie belkę odciążono i po chwili ponownie obciążono siłą narastającą do $F_1 > F_0$. W trakcie czasu ponownego obciążania aktywność akustyczna była rejestrowana zgodnie z efektem Kaisera dopiero po przekroczeniu F_0 . Efekt ten stopniowo zanika po dłuższym przetrzymywaniu badanego obiektu pod niskim obciążeniem wskutek procesów zarostania mikrorys w dojrzewającym betonie.

Źródłem sygnału EA jest także interakcja beton - zbrojenie w obciążonych elementach konstrukcyjnych. Rozwój defektów w tych obiektach został schematycznie pokazany na rysunku 10. W zakresie niewielkich obciążeń żelbetowego elementu konstrukcyjnego rozwijają się i propagują mikrorysy w strefach, w których istnieją naprężenia rozciągające. Efektem tym towarzyszy generacja sygnału EA o niewielkich amplitudach 0,1 - 1 mV. Wzrost obciążenia elementu wywołuje dalszy wzrost mikrorys w tych strefach. Większe rozmiary mikrorys skutkują wzrostem amplitud emitowanego sygnału EA (10 - 100 mV). Na rysunku 10 przedstawiono to jako etap II destrukcji elementu. Kolejnym stadium tego procesu jest etap III, w którym pojawiają się odspojenia zbrojenia od matrycy, ewentualnie odspojenia pomiędzy uzupełnionym ubytkiem i materiałem oryginalnym. W strefach odspojen oprócz naprężeń rozciągających istnieją także naprężenia ścinające na granicy materiałów różniących się własnościami mechanicznymi, co dotyczy zwłaszcza zbrojenia charakteryzującego się znaczną odkształcalnością w zakresie plastycznym. Na podstawie eksperymentów, w których belki zbrojone były obciążane cyklicznie wykazano m.in. w pracy [14], że na etapie III mikrorysy w strefie rozwoju spękań osiągają długość 0,15 - 0,2 mm. Na tym etapie nie obserwuje się zgodności emisji sygnału EA z efektem Kaisera, ponieważ znaczna część rejestrowanego sygnału EA o wysokich amplitudach pochodzi od zamykających się pustek w mikrorysach w trakcie zmniejszania się obciążenia badanych belek, a także od wzajemnego tarcia ścianek mikrorys przy niewielkich obciążeniach. Istotna część źródeł EA jest usytuowana w strefie kontaktowej beton - zbrojenie. Amplituda sygnału EA pochodząca od tych źródeł charakteryzuje się amplitudami sygnału poniżej 10 mV, jednak liczba zdarzeń EA rejestrowanych w strefach spękań jest bardzo duża. Autorzy publikacji [14] wskazują na możliwość rozpoznania stopnia destrukcji elementu konstrukcyjnego przez badanie, czy sygnały EA są generowane jedynie w trakcie wzrostu jego obciążenia, czy również w trakcie odciążania.

Japońska organizacja NDIS opracowała w 2000 roku zalecenie badania elementów żelbetowych [5]. Zaleca ono zastosowanie następującej metody obciążania badanego elementu. Obciążenie jest stopniowo powiększane od minimalnego do maksymalnego P_{\max} , następnie zdejmowane i ponownie podnoszone do P_{bis} . Ta ostatnia wartość jest rejestrowana wtedy, kiedy w trakcie powtórnego podnoszenia obciążenia wystąpi znaczący poziom sygnału EA. W wyniku wyznacza się na podstawie określenia zmian liczby zdarzeń EA rejestrowanych w kolejnych przedziałach czasu dwa parametry: współczynnik obciążenia (ang. *load ratio LR*) oraz współczynnik ciszy (ang. *calm ratio CR*). Współczynnik obciążenia jest ilorazem wartości obciążenia P_{bis} z drugiego cyklu i P_{\max} z pierwszego cyklu:



Rys.10. Schemat rozwoju defektów w betonie zbrojonym
 Fig. 10. Schematic illustration of fracture stages in reinforced concrete

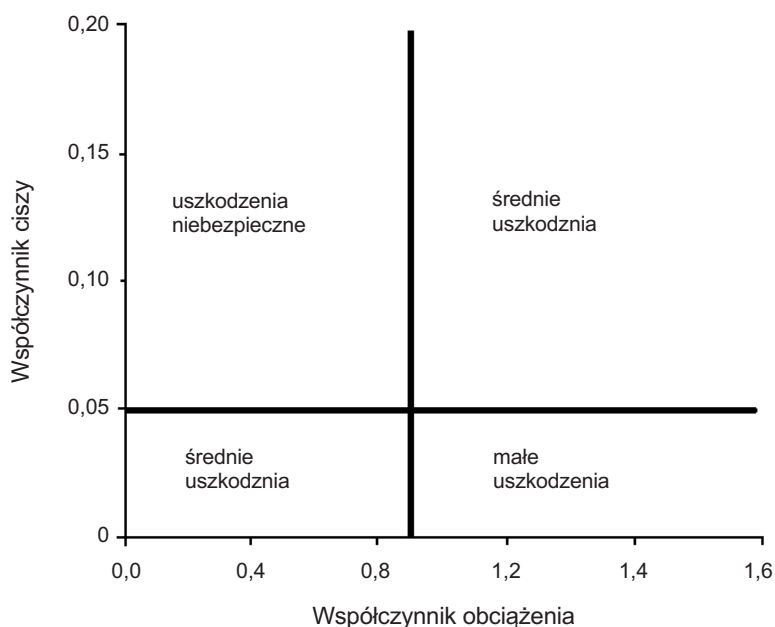
$$LR = P_{bis} / P_{max} . \quad (5)$$

Współczynnik ciszy definiuje się jako iloraz liczby zdarzeń N_c zarejestrowanych od chwili osiągnięcia P_{max} do chwili zdjęcia obciążenia i liczby zdarzeń $N_{całk}$ zarejestrowanych w trakcie całego cyklu obciążania/odciążania:

$$CR = N_c / N_{całk} . \quad (6)$$

Współczynniki LR i CR można wyznaczać w odniesieniu do elementów żelbetowych konstrukcji mostowych, zwłaszcza głównych belek nośnych. Możliwe jest wykorzystanie przemieszczania się cięższych pojazdów po konstrukcji lub siłowników hydraulicznych jako sposobu obciążania. W pracy [1] podano zalecenia opisujące w skali

trzystopniowej stopień uszkodzenia monitorowanej konstrukcji przy zastosowaniu czterech pól wyznaczanych na obszarze ograniczonym osiami wyskalowanymi w jednostkach LR i CR . Cztery pola na tak wykonanym wykresie oznaczają obszary występowania określonych wartości współczynników CR i LR w sposób pokazany na rysunku 11. Pomiary laboratoryjne na belkach obciążanych hydraulicznie wykazały, że gdy rejestrowano sygnał EA charakteryzujący się współczynnikiem $CR > 0,5$ oraz współczynnikiem $LR < 0,9$ źródłem sygnału akustycznego były rysy o rozwarciu powyżej 0,5 mm, co świadczyło o wystąpieniu poważnych uszkodzeń. Uszkodzenia średnie, odpowiadające rozwarciu rys większemu od 0,3 mm i mniejszemu od 0,5 mm były rejestrowane, gdy występowały następujące zależności: $CR < 0,05$ i $LR < 0,9$ albo $CR > 0,05$ i $LR > 0,9$. Najmniejsze rozwarcia rys były mierzone na pozostałym obszarze zależności $CR - LR$.



Rys. 11. Klasyfikacja sygnałów EA rejestrowanych w obciążanych elementach żelbetowych za pomocą współczynników ciszy i obciążenia

Fig. 11. Classification of AE data recorded in loaded reinforced concrete elements by the load and calm ratios

W pracy [1] zestawiono szereg uwag dotyczących czynników wpływających na efektywność procedur monitorowania rozwoju defektów w elementach żelbetowych. Istotne jest właściwe rozmieszczenie sensorów na badanym elemencie, aby umożliwić lokalizację źródeł EA i zapewnić odbiór sygnału ze wszystkich potencjalnych stref ich występowania. Należy również zwrócić uwagę na prowadzenie pomiarów przy redukcji źródeł zakłóceń, np. przez właściwe ustawienie wzmocnienia aparatury i dobranie progów wykrywalności, dobranie odpowiedniej pory. Ważna jest znajomość

struktury badanego obiektu, co pozwala przewidywać rozmieszczenie i aktywność potencjalnych źródeł EA. Uzyskanie wiarygodnej informacji o stanie technicznym badanego obiektu jest możliwe zwłaszcza, jeżeli metoda EA jest uzupełniona o pomiary przemieszczeń, naprężeń i monitorowanie zmian potencjału elektrochemicznego, generowanego w ogniwach, w których elektrodami są elementy zbrojenia, a elektroli-tem – żele w betonie badanej konstrukcji.

4. BADANIE OBIEKTÓW STALOWYCH

W stalowych elementach konstrukcyjnych typowymi źródłami EA są pęknięcia, ubytki korozyjne i miejsca, gdzie możliwe jest tarcie o siebie złączonych powierzchni. Badania nieniszczące ukierunkowane są na monitorowanie pęknięć, a w przypadku zbiorników także ubytków korozyjnych prowadzących do rozszczelnienia. Najczęściej obiekty stalowe są badane metodami defektoskopii ultradźwiękowej, jednakże nie w każdym miejscu konstrukcji można umieścić głowice ultradźwiękowe. Zachodzi też konieczność monitorowania rozwoju wykrytej wady. W wymienionych okolicznościach wskazane jest zastosowanie metody EA. Badania diagnostyczne w trakcie obciążania lub w czasie eksploatacji zbiorników i instalacji ciśnieniowych są prowadzone m.in. w Japonii i USA od początku lat siedemdziesiątych ubiegłego wieku. Opublikowany w 1975 roku wykaz takich badań prowadzonych w USA przez 6 czołowych firm [15] zawierał 26 opisów badań instalacji w elektrowniach nuklearnych oraz 32 raporty z innych dziedzin przemysłu. W związku z potrzebą opracowania standardowych procedur badania skomplikowanych obiektów, w których stany awaryjne mogłyby wywołać poważne zagrożenie środowiska, opracowano normę ASTM E 1139-07 [16], która zawiera następujące kryteria analizy przebiegu sumy zdarzeń EA w obiekcie:

- emisja od źródła aktywnego ma miejsce wówczas, gdy w trakcie wzrostu lub przetrzymywania hydrostatycznego obciążenia suma zdarzeń EA wzrasta w sposób jednostajny i żaden z chwilowych przyrostów zdarzeń nie przekracza 60% zliczeń całkowitych,
- emisja od źródła intensywnego ma podobny przebieg, ale w rozpatrywanym przedziale przekraczane jest kryterium 60% chwilowego przyrostu w odniesieniu do całkowitej sumy zdarzeń,
- źródło krytycznie aktywne i krytycznie intensywne charakteryzuje się wyraźnym stopniowym powiększaniem rejestrowanych przyrostów sumy zdarzeń EA w kolejnych odcinkach czasu; wykrycie takich źródeł powoduje zakwalifikowanie zbiornika jako niesprawnego.

Podczas próby ciśnieniowej zbiornika stalowego typowy wykres sumy zdarzeń w funkcji obciążenia ma postać następującą. Na początkowym odcinku (ciśnienie niższe od roboczego) suma zdarzeń ma pomijalną wartość (do 10% sumy całkowitej). W trakcie dalszego wzrostu ciśnienia można zaobserwować odcinek wzmożonej aktywności akustycznej zbiornika. Źródłem emisji akustycznej są tu procesy zmiany kształtu zbiornika i naprężania się połączeń konstrukcyjnych. Proces ten powinien się

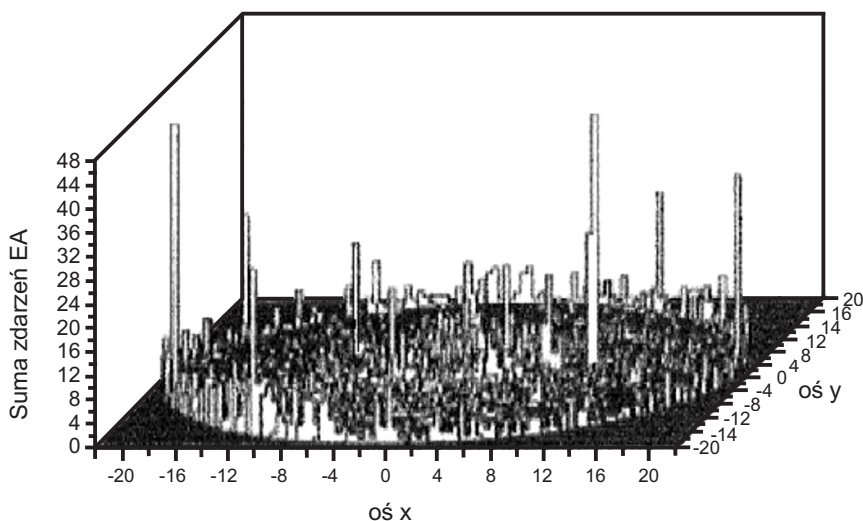
zakończyć przed osiągnięciem ciśnienia próby (to jest około 150% przewidywanego ciśnienia roboczego). Podczas dalszego zwiększania ciśnienia przyrosty zdarzeń EA powinny być zerowe lub wyraźnie niższe od poprzedniej fazy. W myśl zaleceń normy [16] się w trakcie tego etapu o braku rozwoju uszkodzenia świadczy przyrost nie większy niż 60% zdarzeń zarejestrowanych w trakcie procesu wstępnego naprężania się konstrukcji. Krótkotrwałe wzrosty mające wartość powyżej podanej wymienianych 60 % stanowią podstawę do uznania zbiornika za uszkodzony. Znaczące przyrosty zdarzeń EA w trakcie chwilowego obniżania ciśnienia (do którego może dojść wskutek niedoskonałości użytej pompy) nie świadczą o złej jakości obiektu. Występowanie źródła aktywnego nie powoduje odrzucenia zbiornika – jest to przejaw typowych procesów deformacyjnych.

Podczas analizy wyników zarejestrowanych w trakcie próby ciśnieniowej należy pominąć typowy dla zbiorników etap wstępnego obciążania, ponieważ w tym czasie jest generowany sygnał EA o znaczącej intensywności, spowodowany wzajemnym przemieszczaniem się elementów konstrukcji zbiornika. Do oceny stanu technicznego zbiornika ciśnieniowego stosuje się wykresy sumy zdarzeń EA w funkcji czasu, natomiast wykresy energii sygnału EA mają znaczenie pomocnicze i używa się ich jedynie w celu porównania fragmentów wyników z zarejestrowanym przebiegiem rozwoju uszkodzeń o zidentyfikowanym położeniu i rozmiarze. Suma zdarzeń EA jest mało wrażliwa na oddalenie źródła sygnału od przetwornika pomiarowego i jest równocześnie bardziej czuła na krótkotrwałe sygnały charakteryzujące pęknięcie na niewielkich obszarach, nie zawiera informacji o energii procesu (rozmiarze uszkodzenia), natomiast energia sygnału EA zależy od rozmiaru uszkodzenia, ale jej wartość zależy od odległości sensor - uszkodzenie. Intensywne lub krytyczne natężenie sygnału EA jest wynikiem występowania wady, której identyfikacja jest możliwa przy użyciu dodatkowych metod, jednakże charakter przebiegu EA dla typowych wad ma charakter powtarzalny.

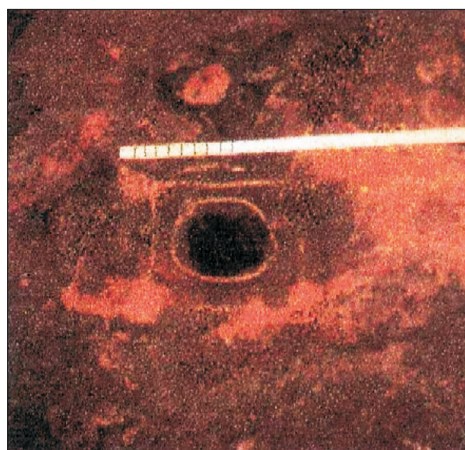
Metodyka monitorowania sygnału EA generowanego przez skorodowane fragmenty obiektu w trakcie jego normalnej eksploatacji została opracowana przez firmę Euro Physical Acoustics [17] w odniesieniu do zbiorników ropy naftowej. Podczas badań zbiornik jest wypełniany do maksymalnego poziomu i poddawany stabilizacji przez 6 – 24 godzin. Następnie rozmieszcza się do 24 sensorów EA w dolnej części bocznej ściany zbiornika. Pomiar jest prowadzony przez 1 – 2 godzin. Zarejestrowane dane są poddawane obróbce, w wyniku której oceniany jest stopień uszkodzenia zbiornika i lokalizowane źródła EA.

Zarejestrowana aktywność akustyczna jest porównywana z wynikami zgromadzonymi w zebranej uprzednio bazie danych. Wynik badania stanowi podstawę do wydania orzeczenia do której z pięciu klas zaliczono zbiornik. W obiektach klasy A stwierdzono dobry stan techniczny z zaleceniem następnego badania po 4 latach. W obiektach klasy B stwierdzono niewielkie uszkodzenia z zaleceniem badania po 3 latach. Obiekty klasy C charakteryzowały się średnimi uszkodzeniami z zaleceniem przeprowadzenia oględzin wzrokowych powierzchni wewnętrznej w najbliższym terminie. Podobnie klasyfikowano obiekty klasy D z tym, że uszkodzenia uznano za znaczne.

W klasie E stwierdzono uszkodzenia krytyczne i zalecono jak najszybszą inspekcję wykrytych wad. W górnej części rysunku 12 pokazano rozkład przestrzenny sumy zdarzeń EA zarejestrowanych w trakcie monitorowania zbiornika. Rozkład przestrzenny uzyskano stosując metodę lokalizacji źródeł EA. Obszary o podwyższonej aktywności sygnału EA wskazują na możliwość wystąpienia ubytku korozyjnego. Typowy zidentyfikowany w ten sposób ubytek korozyjny w dnie zbiornika pokazano w dolnej części rysunku 12.



a) lokalizacja źródeł sygnału EA w dnie zbiornika



b) przykład otworu w dnie zbiornika spowodowanego korozją

Rys. 12. Przykład wizualizacji rozkładu przestrzennego sumy zdarzeń EA zarejestrowanych w trakcie monitorowania zbiornika na ropę oraz typowy ubytek korozyjny w jego dnie
Fig. 12. Example of a spatial distribution of AE events recorded in crude oil tank and typical hole found in its bottom during visual inspection

Podobną procedurę stosuje w USA *Federal Highway Administration* do badań eksploataowanych mostów stalowych [18]. Badania są prowadzone przy pomocy systemu o nazwie *Sensor Highway II*. System ten ma 16 kanałów do rejestracji sygnału EA umożliwiających kontrolę do 4 źródeł sygnału. Jest również wyposażony w 16 wejść do których można dołączyć sensory drgań, nacisku, ciśnienia, zbliżeniowe, mierniki temperatury i tensometry. Przewidziano zdalne sterowanie pracą systemu oraz transmisję wyników pomiarów do oddalonych baz danych. Do tego celu system zawiera modem telefoniczny, port sieci ETHERNET, port USB, port transmisji szeregowej RS232/485, a także możliwość podłączania urządzeń alarmujących w przypadku wykrycia stanów awaryjnych monitorowanej konstrukcji. Całość jest zabudowana w hermetyzowanym pojemniku przystosowanym do eksploatacji w terenie.

5. PODSUMOWANIE

Zakres zastosowań metody EA w diagnostyce obiektów technicznych w Polsce będzie wzrastać w sposób analogiczny do trendów obserwowanych w Niemczech, Francji, Wielkiej Brytanii, Japonii i USA. Może to wywrzeć korzystny wpływ na bezpieczną eksploatację tych obiektów, zwłaszcza w obniesieniu do rozbudowanych obiektów o złożonej konstrukcji. Rozwój aparatury diagnostycznej umożliwia śledzenie rozwoju uszkodzeń w eksploataowanych zbiornikach, obiektach stalowych i żelbetowych. Jednocześnie w związku z upowszechnianiem się opisywanej metody koszt tej aparatury maleje. Informacje uzyskiwane przy pomocy metody EA, obok danych uzyskanych innymi metodami nieniszczącymi, mogą być wykorzystane na różne sposoby. W przypadku identyfikacji znacznego uszkodzenia obiektu może zostać wydana decyzja o jego wyłączeniu z eksploatacji. Mniej krytyczne uszkodzenia obiektu wymagałyby decyzji o czasowej zmianie sposobu jego eksploatacji – np. zmniejszenia natężenia ruchu kołowego na obiekcie. Realny jest obecnie zdalny całodobowy monitoring konstrukcji przy zastosowaniu bezprzewodowych sieci radiowych zaimplementowanych w systemie monitorowania sygnału EA. W ten sposób instytucja zarządzająca licznym zespołem odpowiedzialnych konstrukcji inżynierskich może usprawnić swoją procedurę przeglądowo - remontową.

BIBLIOGRAFIA

- [1] *Grosse Ch., Ochtsu M.* (editors): *Acoustic Emission Testing. Basic for Research – Applications in Civil Engineering.* Springer, Berlin 2008, rozdział 7
- [2] *Ranachowski Z.*: *Metody pomiaru i analiza sygnału emisji akustycznej.* Prace IPPT PAN, 1, Warszawa 1997, 113
- [3] *Rindorf H.*: *Acoustic Emission Source Location.* Brüel & Kjaer Technical Review, No 2, Naerum, Denmark 1981, 3 - 32
- [4] *Rüsch H.*: *Physical problems in testing of concrete.* *Zement-Kalk-Gips*, 12, 1, 1959, Wiesbaden, 1 - 9

- [5] Recommended practice for in situ monitoring of concrete structures by acoustic emission. Japan Society for Non-Destructive Inspection, code NDIS 2421, Tokyo, 2000
- [6] *Parmar D.*: Non-Destructive Bridge Testing and Monitoring with Acoustic Emission (AE) Sensor Technology. Final Report. Hampton University, 2011
www.biz.hampton.edu/esitac/docs/nondestructivetesting
- [7] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 16 lutego 2005 r. w sprawie: – sposobu numeracji i ewidencji dróg publicznych, obiektów mostowych, tuneli, przepustów i promów oraz rejestru numerów nadanych drogom, obiektom mostowym i tunelom (Dz.U. z 2005 Nr 67, poz. 582), – w sprawie trybu sporządzania informacji oraz gromadzenia i udostępniania danych o sieci dróg publicznych (Dz.U. z 2005 Nr 67, poz. 583)
- [8] Zarządzenie Nr 14 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 7 lipca 2005 r. w sprawie wprowadzenia instrukcji przeprowadzania przeglądów drogowych obiektów inżynierskich
- [9] Katalog Polskich Norm: PN EN 1330-9:2002 Terminologia – Część 9: Terminy stosowane w badaniach emisją akustyczną; PN EN 13477-1:2002 Emisja akustyczna – Charakteryzowanie aparatury – Część 1: Opis aparatury; PN EN 13477-2:2010 Emisja akustyczna – Charakteryzowanie aparatury – Część 2: Weryfikacja działania; PN EN 13554:2011 Emisja akustyczna – Zasady ogólne
- [10] *Gołaski L., Goszczyńska B., Świt G., Trompczyński W.*: System monitoringu umożliwiający globalną ocenę stanu technicznego obiektów betonowych. Materiały 56 Konferencji naukowej w Krynicy „Diagnostyka, monitoring i modernizacja eksploatowanych obiektów budowlanych”, Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2010, 173 - 187
- [11] *Hsu T., Slate O., Sturman G., Winter G.*: Microcracking of plain concrete and the shape of the stress - strain curve. *Journal of the American Concrete Institute*, **60**, 1963, 209 - 224
- [12] *Ranachowski Z., Glinicki M.A., Nowowiejski G.*: Zastosowanie metody emisji akustycznej do identyfikacji składników betonu przy pomiarach mikrotwardości. *Cement Wapno Beton*, **XV/LXXVII**, 4, 2010, 202 - 209
- [13] *Moczko A.*: Emisja akustyczna w badaniach betonu. *Inżynieria i Budownictwo*, 1, 1996, 42 - 46
- [14] *Kishi T., Ohtsu M.*: *Acoustic Emission – Beyond the Millenium*. Elsevier, Oxford, 2000, 77 - 91
- [15] *Nichols R.W.*: *Acoustic Emission*. Applied Science Publishers LTD, London, 1976, 121
- [16] Standard Practice for Continous Monitoring of Acoustic Emission from Metal Pressure Boundaries, [www.astm.org/search/acoustic emission](http://www.astm.org/search/acoustic%20emission)
- [17] www.epandt.com/tankpac.html
- [18] www.fhwa.dot.gov/research

INFORMACJE DODATKOWE

Badania prowadzono w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN w ramach projektu POIG.01.01.02-24-005/09 „Innowacyjne spoiwa cementowe i betony z wykorzystaniem popiołu lotnego wapiennego”, finansowanego przez Program Operacyjny Innowacyjna Gospodarka w latach 2007-2013.

APPLICATION OF ACOUSTIC EMISSION TO FAULT DIAGNOSTICS IN CIVIL ENGINEERING

Abstract

The definition of Acoustic Emission (AE) signal and the nature of its origin and propagation is discussed in the paper. Three areas of application of AE in Civil Engineering are presented: monitoring of reinforced concrete girders, pressurised industrial storage tanks and steel bridges. Application of AE monitoring in investigation of concrete materials is also presented. Acoustic emission testing is found to be an effective diagnostic tool.

Keywords

Acoustic emission, diagnostics of engineering structures, non-destructive testing, reinforced concrete objects maintenance.