

BADANIE OBIEKTÓW ŻELBETOWYCH Z WYKORZYSTANIEM METODY EMISJI AKUSTYCZNEJ – PROCEDURA BADAŃ

Streszczenie

W pracy przedstawiono metodę diagnostyki konstrukcji inżynierskich IADP (identyfikacji aktywnych procesów destrukcyjnych) bazującą na analizie sygnałów emisji akustycznej generowanych w czasie obciążeń eksploatacyjnych. Zaproponowano procedurę diagnostyki i monitoringu konstrukcji żelbetowych, która może być elementem obowiązującej instrukcji GDDKiA przeglądu drogowych obiektów mostowych.

WSTĘP

W budownictwie przemysłowym, hydrotechnicznym, komunalnym, a szczególnie infrastruktury mostowej dominują obiekty żelbetowe, z których wiele to obiekty zaawansowane wiekowo. Zapewnienie bezpieczeństwa konstrukcji wymaga wykonywania szeregu działań diagnostycznych we wszystkich fazach cyklu życia obiektu budowlanego. W wyniku oddziaływania na konstrukcję czynników zewnętrznych, w tym środowiskowych, jak również obciążeń użytkowych, które zmieniają się podczas długoletniej eksploatacji, obiekty ulegają degradacji. Podejmowanie działalności diagnostycznej dotyczy, więc szczególnie starych obiektów, które powinny być monitorowane podczas eksploatacji.

Podstawowym elementem cyklicznego monitoringu są inspekcje wykonywane przez doświadczonych inżynierów [1]. Inspekcje powinny być wspierane nieniszczącymi badaniami diagnostycznymi, które potwierdzą wizualne oględziny i umożliwią obiektywną ocenę stanu technicznego obiektu z uwzględnieniem uszkodzeń występujących w miejscach niedostępnych. Wczesne i precyzyjne wykrycie uszkodzeń, powstających podczas użytkowania, pozwala na podejmowanie racjonalnych działań, w tym naprawczych, zapewniających nieprzerwaną eksploatację obiektu. Dlatego też, szczególnie w ostatnim okresie, bardzo wiele uwagi poświęca się tematyce diagnostyki i monitoringu eksploatowanych obiektów budowlanych, która związana jest z zagadnieniem trwałości i zapewnienia niezawodności tych obiektów [2].

W przypadku obiektów mostowych problem monitoringu jest szczególnie ważny gdyż rozwój sieci drogowych uzależniony jest od ich stanu technicznego, a ponad 50% obiektów zostało zaprojektowanych i wybudowanych w latach 1946–1980. Czasowe wyłączenie wiaduktu, czy mostu z eksploatacji powoduje powstanie znacznych strat ekonomicznych, społecznych i środowiskowych, stąd zasadnym jest podejmowanie prac ukierunkowanych na rozwój technologii i procedur odpowiedniego utrzymania obiektów drogowych, a także metod ich diagnostyki i monitoringu. Systemy monitorowania powinny szczególnie koncentrować się na rejestracji dwóch czynników tj.: zmian zachodzących w strukturze obciążenia i kumulacji uszkodzeń. Właściwie prowadzone monitoring i diagnostyka mostów powinien pomóc administracji drogowej w zarządzaniu tymi obiektami i przedłużaniu okresu eksploatacji, a więc umożliwić optymalizację terminu wykonania i zakresu ewentualnego remontu, naprawy, czy wzmocnienia, a w przypadku wystąpienia uszkodzeń zagrażających bezpieczeństwu konstrukcji, zapewnić uzasadnione wyłączenie obiektu z eksploatacji.

Mosty betonowe, zarówno sprężone jak i żelbetowe, są najczęściej projektowanymi i budowanymi obiektami na przestrzeni

ostatnich 70 lat, co przedstawiono w [3] i ilustrują dane w zaktualizowanej tabeli 1.

Tab. 1. Podział drogowych obiektów mostowych, tuneli i przejść podziemnych ze względu na rodzaj materiału konstrukcyjnego na drogach krajowych zarządzanych przez GDDKiA (stan z 30.10.2014r, www.gddkia.pl; Serwis DDKiA*Mosty)

Rodzaj materiału	Liczba		Długość		Powierzchnia	
	szt.	%	m	%	m ²	%
Stal	944	13,60	81 142	22,12	1 129 632	21,89
Beton zbrojony	3 230	46,53	87 454	23,85	1 183 864	22,95
Beton sprężony	2 706	38,98	197 392	53,83	2 837 809	55,00
Kamień, cegła, beton	62	0,89	736	0,20	8 232	0,16

Z powodów wyżej przedstawionych, opracowanie nowych metod diagnostyki i monitoringu betonowych obiektów ma duże znaczenie dla podwyższania jakości zarządzania infrastrukturą drogową. Biorąc pod uwagę, iż:

- obecne obciążenie większości mostów przekracza obciążenie, jakie założono na etapie ich projektowania,
- duży procent mostów wchodzi w wiek podwyższonej awaryjności lub osiąga wiek odpowiadający ich przewidywanej trwałości,
- aktualne procedury inspekcyjne mają charakter subiektywny, a stosowane metody badawcze mają charakter lokalny obejmujący jedynie dostępny fragment konstrukcji,
- niezbędnym stało się opracowanie procedury oceny mostów opartej na obiektywnej analizie procesów destrukcyjnych, obejmującej całość konstrukcji nośnej obiektu. Procedura ta winna mieć charakter nieniszczący, obejmować swoim zasięgiem całą konstrukcję nośną lub przynajmniej cały jej element i pozwalać na:
- wykrycie i lokalizację występujących tam uszkodzeń aktywnych,
- monitoring rozwoju uszkodzeń w czasie,
- reagowanie na procesy destrukcyjne wywołane interakcją różnych defektów,
- przystosowanie do prowadzenia monitoringu w warunkach polowych podczas normalnej eksploatacji,
- stwarzanie potencjalnej możliwości oceny wpływu obciążenia i warunków zewnętrznych na procesy destrukcyjne,
- wykluczenie lub przynajmniej ograniczenie czynników subiektywnych zarówno w ocenie stanu technicznego oraz w podejmowanych decyzjach,

- dostarczenie odpowiedniej bazy danych do prognozowania trwałości i nośności resztkowej konstrukcji.

Wymagania te spełnia metoda emisji akustycznej polegająca na analizie porównawczej rejestrowanych podczas badania obiektu sygnałów emisji akustycznej z utworzoną bazą wzorcowych sygnałów procesów destrukcyjnych, umożliwiającą identyfikację i lokalizację tych aktywnych procesów destrukcyjnych. Może być ona zastosowana zarówno do konstrukcji żelbetowych (IADP – [4]), sprężonych (RPD – [5]), jak i stalowych [6] umożliwiając globalny monitoring obejmujący całość analizowanego elementu oraz rejestrację tylko uszkodzeń aktywnych, rozwijających się w warunkach jakie panują podczas monitoringu (w warunkach rzeczywistych obciążeń).

Celem pracy jest przedstawienie opracowanej metody IADP wraz z procedurą badawczą umożliwiającą diagnostykę i monitoring obiektów żelbetowych.

1. PODSTAWY METODY

Emisja Akustyczna (AE) jest zanikającą falą sprężystą będącą efektem gwałtownego wyzwolenia energii nagromadzonej w materiale przez propagujące się mikro uszkodzenia. Zanikanie fali jest natomiast wynikiem absorpcji – zmiany energii sprężystej w ciepłą. Dlatego też, powstanie AE jest sygnałem degradacji własności materiału w porównaniu z jego własnościami w chwili poprzedzającej emisję. Zjawisko AE dobrze sygnalizuje więc niszczenie materiału, a tym samym wykonanego z niego elementu.

Wyzwolona fala sprężysta (AE) rejestrowana jest przez czujniki emisji akustycznej zamocowane na obiekcie, a następnie analizowana z wykorzystaniem komputera. Zazwyczaj są to czujniki piezoelektryczne, które mogą pracować w zakresie 0.1 – 2.0 MHz, co określa zakres częstotliwości odbieranej fali. Na Rys. 1 pokazano schemat generowania fal przez procesy destrukcyjne oraz ich rejestracji na przykładzie belki żelbetowej dwuprzęsłowej. W przedstawianej metodzie falę akustyczną określa się przy użyciu dwunastu następujących parametrów: liczba zliczeń, liczba zliczeń do wartości maksymalnej amplitudy, czas trwania sygnału, czas narastania sygnału, amplituda sygnału, podawana w mV lub dB, energia sygnału, moc sygnału, średnie napięcie skuteczne sygnału, energia absolutna sygnału, średnia częstotliwość sygnału, częstotliwość pogłosu i częstotliwość początkowa [4].

Rozpoznanie, w konstrukcjach żelbetowych, rodzaju procesu destrukcyjnego i jego intensywności wymaga analizy porównawczej z bazą sygnałów wzorcowych, analogicznie jak w przypadku konstrukcji sprężonych [4]. Dla konstrukcji żelbetowych baza została utworzona w trakcie badań laboratoryjnych elementów, podczas których można było skorelować występowanie określonego procesu destrukcyjnego, albo zbioru takich procesów z charakterystyką zarejestrowanej emisji akustycznej. O ile zginanie belki betonowej prowadzi do powstania jednej rysy niszczącej, to w belce żelbetowej obserwuje się proces powstawania i rozwoju rys, a także inne

zjawiska generujące fale emisji akustycznej np.: zrywanie przyczepności między stalą i betonem, wyboczenie prętów zbrojeniowych jak i uplastycznienie/miażdżenie betonu w strefie ściskanej, a także zrywanie prętów.

Bazę sygnałów wzorcowych tworzą szereg badań na różnych typach belek żelbetowych i próbkach, przy realizacji różnych programów obciążenia, w tym cyklicznego, modelującego przejazd samochodu, chcąc uzyskać dominację jednego z procesów destrukcyjnych, które mogą wystąpić podczas badania obiektów żelbetowych, w czasie ich eksploatacji. Baza została także zweryfikowana na obiektach rzeczywistych. Wzorcowe bazy danych zostały sklasyfikowane na podstawie 12-stu parametrów AE i oznaczone dla konstrukcji żelbetowych jako Klasy:

- Klasa 1 Powstawanie zarysowania w zaczynie
- Klasa 2 Powstawanie zarysowania na granicy zaczyn kruszywo
- Klasa 3 Powstawanie mikrorys
- Klasa 4 Rozwój rys
- Klasa 5 Utrata przyczepności w otoczeniu rysy
- Klasa 6 Wyboczenie prętów ściskanych / miażdżenie betonu ściskanego / zerwanie prętów zbrojeniowych.

Badania prowadzone na 26. belkach statycznie wyznaczalnych i 14. niewyznaczalnych wykazały, iż sygnały wywołane: miażdżeniem betonu, wyboczeniem pręta i zerwaniem zbrojenia występują praktycznie tuż przed zniszczeniem i prawie jednocześnie. Stąd przyjęto, iż klasa 6 jest sumą wymienionych procesów.

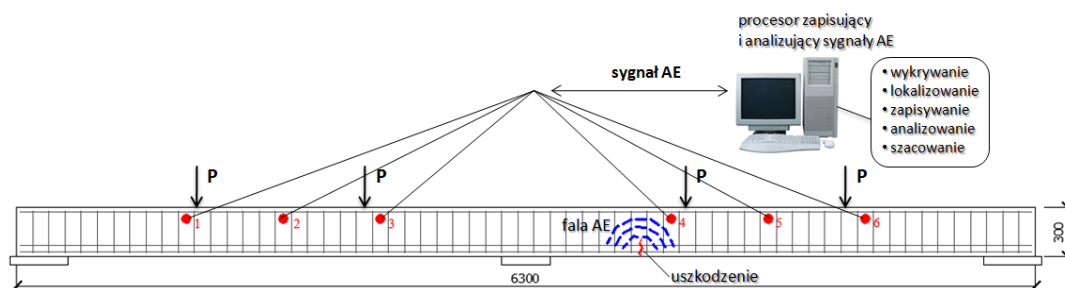
Na podstawie wykonanych badań rozwoju zarysowania w elementach żelbetowych poddanych obciążeniom monotonicznym, cyklicznym i zmiennym zaproponowano do oceny stanu technicznego konstrukcji żelbetowych, w odniesieniu do identyfikowanych procesów destrukcyjnych (klas sygnałów), następujące kryteria stopnia uszkodzenia konstrukcji:

- Klasy 1 i 2 – bezpieczna praca konstrukcji
- Klasa 3 – ostrzeżenie
- Klasa 4 – zagrożenie trwałości
- Klasa 5 – zagrożenie nośności
- Klasa 6 – utrata bezpieczeństwa

Przyjęcie kryteriów stopnia uszkodzenia, dla klasy 4 i 5 zostało uzasadnione również tym, że prowadzona analiza rozwoju szerokości rys podczas obciążeń zmiennych (z odciążeniami i nisko cyklicznymi) wskazuje na tendencję przyrostu szerokości rysy podczas obciążeń cyklicznych, w tym samym zakresie wartości obciążeń, a także zmniejszeniem nośności belek dwuprzęsłowych obciążanych cyklicznie.

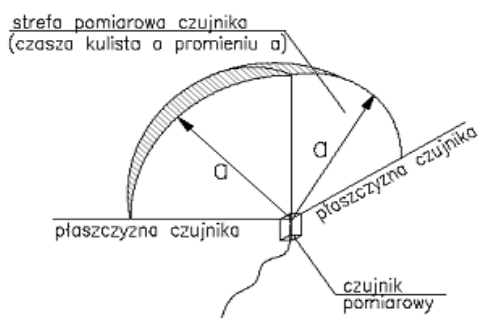
2. LOKALIZACJA PROCESÓW DESTRUKCYJNYCH

Wyzwolona w procesie destrukcyjnym fala sprężysta (AE) rejestrowana jest przez czujniki zamocowane na obiekcie, a ich obszar pomiarowy (dla ciała izotropowego akustycznie) jest czaszą kulistą o promieniu „a” (Rys.2), którego wielkość zależy od siły sygna-



Rys. 1. Schemat generowania fal przez procesy destrukcyjne i ich rejestracja

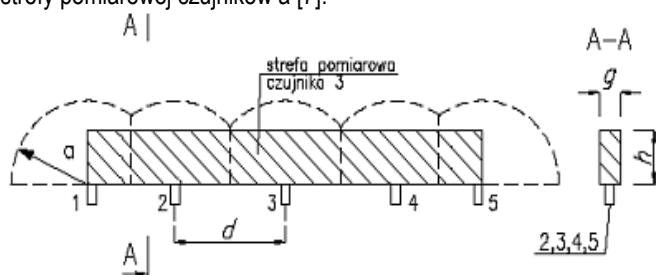
lu, jego tłumienia i czułości czujnika. Przyjmując, iż promień „a” odpowiada odległości zapewniającej określone tłumienie sygnału (np. 10 dB), można go określić eksperymentalnie [7].



Rys. 2. Obszar pomiarowy czujnika

2.1. Lokalizacja strefowa

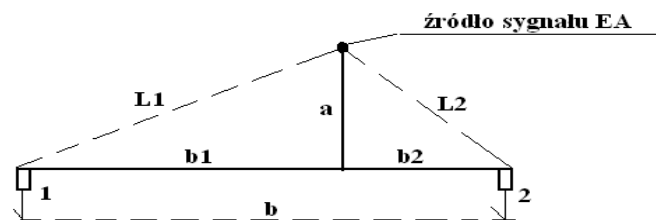
W przypadku przedstawionym na Rys.3, gdzie czujniki akustyczne umieszczono na spodzie belki, sygnał z dowolnego punktu w strefie pomiarowej czujnika 3 szybciej dotrze do czujnika nr 3 aniżeli do czujników o numerach 2 i 4 (po zarejestrowaniu sygnału przez czujnik nr 3 aparatura automatycznie odcina pomiar w czujnikach o numerach 1, 2, 4 i 5) i punkt AE zostanie przypisany do obszaru pomiarowego czujnika nr 3. Wielkość strefy, dla danej belki, zależy od rozstawienia czujników d , zależnego od wielkości strefy pomiarowej czujników a [7].



Rys. 3. Strefy pomiarowe pokrywające swym zasięgiem cały badany obiekt

2.2. Lokalizacja w płaszczyźnie

Położenie płaszczyzny normalnej do linii 1-2 łączącej czujniki, na której znajduje się źródło sygnału AE (Rys.4), można określić na podstawie różnicy czasu Δt dojścia sygnału do czujnika 1 i 2. Znajdąc rozmieszczenie czujników 1 i 2, prędkość fali akustycznej V oraz Δt można dokładnie określić położenie źródła sygnału AE, gdy jego źródło znajduje się na linii łączącej oba czujniki ($a=0$) [8].



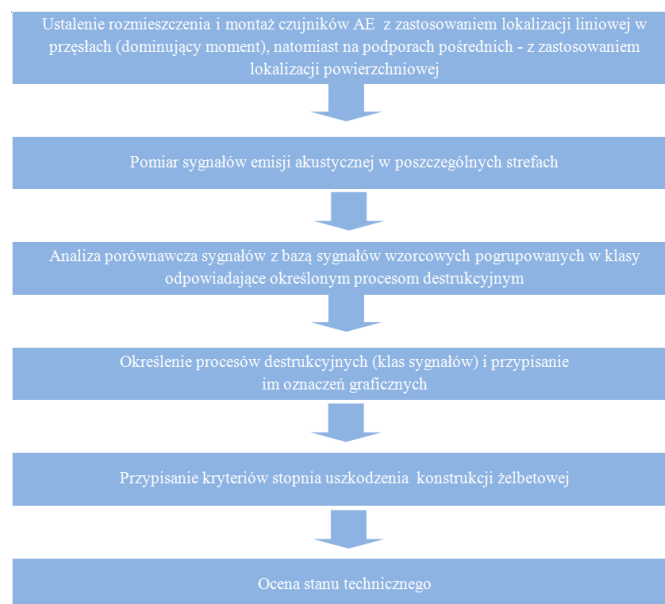
Rys. 4. Lokalizacja źródła AE z dokładnością do płaszczyzny prostopadłej

3. PROCEDURA BADAWCZA W DIAGNOSTYCE I MONITORINGU

Praktyczne zastosowanie metody IADP do diagnostyki obiektów rzeczywistych wymaga zastosowania procedury umożliwiającej

obiektywny pomiar uszkodzeń, w szczególności podczas obciążeń eksploatacyjnych. Schemat procedury badawczej diagnostyki konstrukcji żelbetowych, która może być elementem stosowanego systemu przeglądów obiektów mostowych, przedstawiono na Rys.5.

Po analizie wyników badań dla konstrukcji żelbetowych, stwierdzono, że istnieje konieczność rozmieszczania w belkach ciągłych czujników emisji akustycznej, w strefie o dominującym zginaniu - z zastosowaniem lokalizacji liniowej, natomiast na podporach pośrednich - z zastosowaniem lokalizacji powierzchniowej (w układzie równoległoboku lub prostokąta) w taki sposób, żeby można było analizie poddać strefę momentu ujemnego oraz uwzględnić strefę ścinania, co uwzględniono w procedurze monitoringu (rys.5)



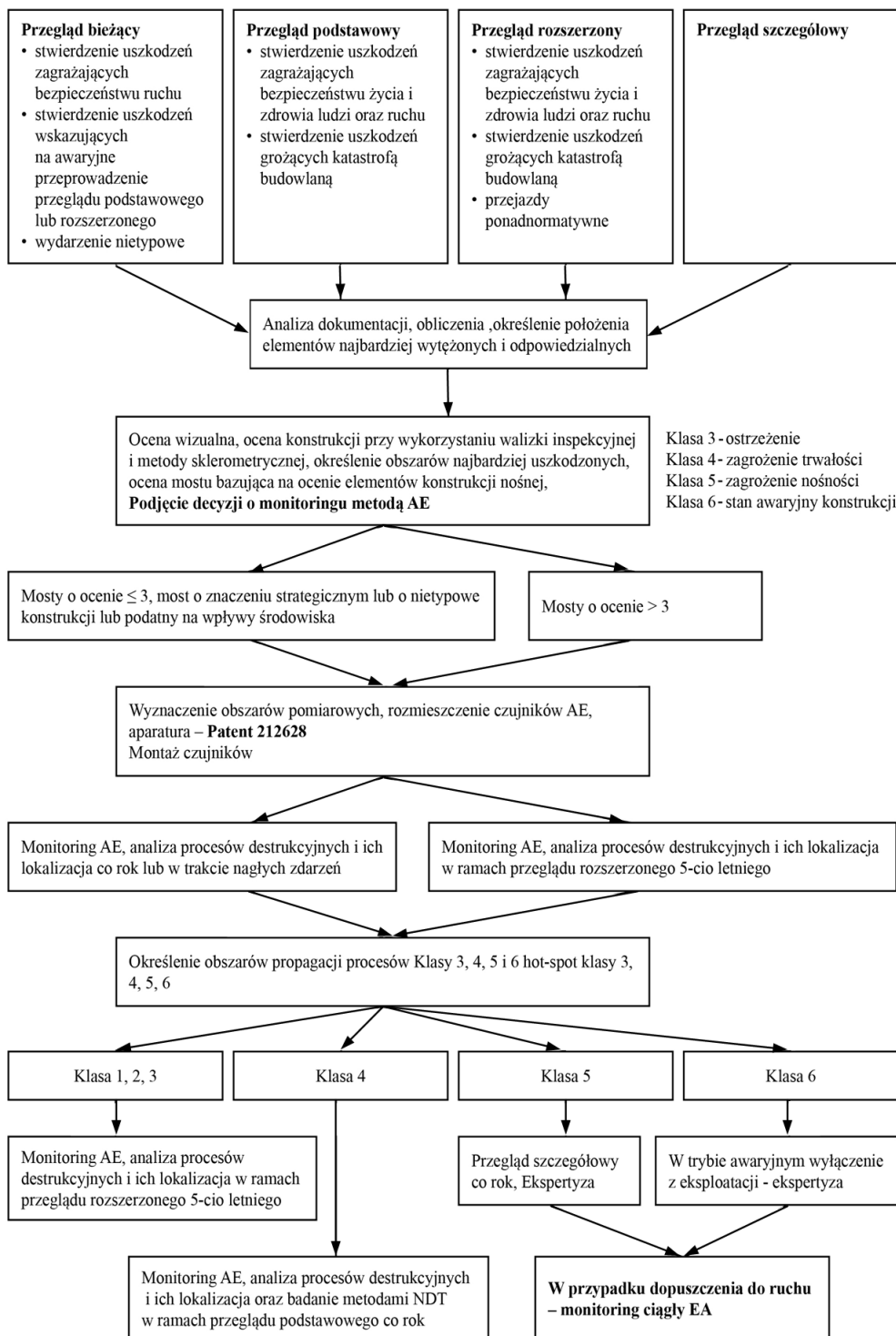
Rys. 5. Procedura badawcza diagnostyki obiektów oparta na metodzie IADP

Na rysunku 6 przedstawiono wykorzystanie procedury badawczej diagnostyki konstrukcji żelbetowych opartej na metodzie IADP do obowiązującego systemu monitoringu obiektów mostowych na podstawie Zarządzenia nr 14 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 7 lipca 2005 roku w sprawie wprowadzenia instrukcji przeprowadzania przeglądów drogowych obiektów inżynierskich.

PODSUMOWANIE

Opracowana metoda emisji akustycznej IADP dla konstrukcji żelbetowych umożliwia identyfikację i lokalizację procesów destrukcyjnych powstających, w tych konstrukcjach, na skutek działania obciążenia.

- Metoda IADP może być wykorzystana jako nieniszcząca metoda diagnostyczna oceny stanu technicznego konstrukcji żelbetowych do zastosowania podczas normalnej eksploatacji obiektu.
- Ustalone, na podstawie przeprowadzonych badań, kryteria niszczenia konstrukcji umożliwiają wykorzystanie metody IADP do zarządzania infrastrukturą drogową.
- Przedstawiony schemat procedury monitoringu obiektów mostowych wskazuje na możliwość zastosowania procedury badawczej opartej na metodzie IADP do prowadzenia kontroli drogowych obiektów inżynierskich, w ramach obowiązującej Instrukcji GDDKiA



Rys. 6. System zarządzania infrastrukturą drogową [9] z zastosowaniem metody IADP

BIBLIOGRAFIA

1. Gołaski L, Goszczyńska B, Goszczyński S, Trąmpczyński W, „Problemy diagnostyki obiektów na przykładzie konstrukcji mostowych”, Autostrady 12/2009, str.68-77
2. Hoła J, Schabowicz K, “State-of-the-art non-destructive methods for diagnostics testing of building structures – anticipated development trends”, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 10 (3), str. 5-18, 2010
3. Flaga K, “Diagnostyka, modernizacja i rewitalizacja obiektów mostowych z betonu”, Materiały 56 Konferencji Naukowej Krynica 2010, str. 123 – 156, 2010

4. Goszczyńska B, “Analysis of the process of crack initiation and evolution in concrete with acoustic emission testing”, Archives of Civil and Mechanical Engineering 14, 2, str.134-143, 2014
5. Świt G, “Analiza procesów destrukcyjnych w obiektach mostowych z belek strunobetonowych z wykorzystaniem zjawiska emisji akustycznej, Monografia , Politechnika Świętokrzyska, Kielce, 2011
6. Goszczyńska B, Świt G, Trąmpczyński W, Monitoring of Active Destructive Processes as a Diagnostic Tool for the Structure Technical State Evaluation, Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences, ISSN 0239-7528, 61 (1), str.97-108, 2013

7. Gołaski L., Goszczyńska B., Świt G., Trąpczyński W.: „System for the global monitoring and evaluation of damage processes developing within concrete structures under service loads”, The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering 7 (4) str. 273-245, 2012
8. B.Goszczyńska, G.Świt, W.Trąpczyński, A.Krampikowska, J.Tworzewska, P.Tworzewski, Experimental validation of concrete crack initiation and location with acoustic emission method, Archives of Civil and Mechanical Engineering, vol.12, Nr1, pp. 23-28, 2012
9. Instrukcja przeprowadzania przeglądów drogowych obiektów mostowych, Zarządzenia Nr 14 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dn. 7.07.2005

INSPECTIONS OF REINFORCED STRUCTURES USING THE ACOUSTIC EMISSION METHOD IADP – TEST PROCEDURES

Abstract

The paper presents the method of engineering structures IADP (identification of active damage processes) based on analysis of acoustic emission signals generated during the service load. The procedure for the diagnosis and monitoring of reinforced concrete structures is proposed, which can be the part of standard diagnosis procedure on the example bridge diagnosis.

Autorzy:

Dr hab. inż. **Barbara Goszczyńska**, Prof. PŚk,

bgoszczyńska@tu.kielce.pl

Dr hab. inż. **Grzegorz Świt**, Prof. PŚk, gswit@tu.kielce.pl

Prof. dr hab. inż. **Wiesław Trąpczyński**, wtramp@tu.kielce.pl

Politechnika Świętokrzyska, Katedra Wytrzymałości Materiałów,
Konstrukcji Betonowych i Mostowych