



GRZEGORZ ŚWIT, *gswit@tu.kielce.pl*  
BARBARA GOSZCZYŃSKA, *bgoszczyńska@tu.kielce.pl*  
WIESŁAW TRĄMPCZYŃSKI, *wtramp@tu.kielce.pl*  
ALEKSANDRA KRAMPIKOWSKA, *olamazur@op.pl*  
Politechnika Świętokrzyska Kielce

## ZASTOSOWANIE METODY EMISJI AKUSTYCZNEJ DO OCENY STANU TECHNICZNEGO MOSTU STALOWEGO

### APPLICATION OF ACOUSTIC EMISSION METHOD TO ASSESS THE TECHNICAL CONDITION OF THE BOLTED BRIDGE

**Streszczenie** W referacie przedstawiono zastosowanie metody emisji akustycznej nazwanej IADP (Identyfikacji Aktywnych Procesów Destrukcyjnych) do oceny stanu technicznego mostu stalowego (nitowanego) w Sandomierzu, usytuowanego w ciągu drogi krajowej 77 stanowiącego ważne połączenie komunikacyjne zachód – wschód Polski. Wyłączenie tego obiektu z eksploatacji będzie dużym utrudnieniem w ruchu drogowym i spowoduje starty zarówno ekonomiczne, jak i społeczne. Sygnały emisji akustycznej AE uzyskane z przeprowadzonych, podczas eksploatacji obiektu, badań poddano wieloparametrowej analizie sygnału oraz grupowaniu w klasy odpowiadające określonym procesom destrukcyjnym. Uzyskane wyniki umożliwiły dokonanie oceny stanu technicznego mostu w warunkach rzeczywistych obciążeń eksploatacyjnych oraz porównanie ich z rezultatami badań prowadzonych równoległe, z wykorzystaniem metod NDT. Zbieżność uzyskanych rezultatów pozwala na stwierdzenie przydatności metody IADP do analizy stanu technicznego konstrukcji stalowych.

**Abstract** The paper shows the application of the Acoustic Emission method for technical condition evaluation of the bolted bridge, which is important because of economy. AE signals taken under service load, were subjected to multiparameter analysis and grouped into Classes corresponding to active damage processes. This enabled the assessment of the condition of the bridge in real loading conditions, and the comparison of the obtained results with the results of research carried out in parallel, using the methods of NDT. The coincidence of the results obtained, allows to establish the suitability of AE methods (IADP method) for the analysis of the condition of steel structures.

#### 1. Wstęp

Rozwój i właściwe utrzymanie sieci transportowej konieczne są dla zapewnienia właściwego funkcjonowania życia gospodarczego i społecznego kraju. Istotnym problemem w rozwoju sieci drogowych jest stan techniczny obiektów mostowych znajdujących się w ciągu tych dróg, z których ponad 50% zostało zaprojektowanych i wybudowanych w latach 1946-1980. Ponadto, w ostatnich latach, nastąpił wyraźny wzrost ilości przewożonych towarów z wykorzystaniem transportu kołowego, a także obserwuje się tendencję do ciągłego zwiększania dopuszczalnego tonażu przewożonego w nowo projektowanych pojazdach. Wszystko to wpływa na bezpieczeństwo, użyteczność i trwałość istniejących mostów[1]. Jednocześnie średnia ocena główna mostów i wiaduktów na drogach krajowych w Polsce [2] w oparciu o wytyczne tzw. systemu gospodarki mostowej w skali 1÷5 (1- stan awaryjny, 5 – stan bez zarzutu), wynosi 3,64.

Zarządcy infrastruktury mostowej stoją więc dzisiaj przed dwoma głównymi problemami: koniecznością zapewnienia dalszej, bezpiecznej eksploatacji istniejących obiektów oraz wyborem efektywnych ekonomicznie metod ich utrzymania. Dlatego też obecnie wiele prac jest ukierunkowanych na rozwój procedur odpowiedniego utrzymania obiektów drogowych, w tym metod ich monitoringu i diagnostyki. Systemy monitorowania/diagnozowania wg. [3] powinny koncentrować się na rejestracji dwóch zagadnień tj.: zmian zachodzących w strukturze obciążenia i kumulacji uszkodzeń. Właściwie prowadzony 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 stwierdzenia uszkodzeń zagrażających bezpieczeństwu konstrukcji zapewnić uzasadnione wyłączenia obiektu z eksploatacji.

W referacie przedstawiono przykład zastosowania metody emisji akustycznej (IADP) do oceny stanu technicznego 5-przęsłowego, nitowanego mostu stalowego przez rzekę Wisłę, w Sandomierzu. Badania te miały charakter uzupełniający (porównawczy) diagnozowanie tego obiektu prowadzone przez Zespół z Politechniki Rzeszowskiej pod kierunkiem prof. T. Siwowskiego z wykorzystaniem metod NDT [1].

## 2. Podstawy metody

Podstawą metody IADP jest analiza fal akustycznych generowanych przez aktywne procesy destrukcyjne rozwijające się w czasie obciążeń eksploatacyjnych konstrukcji budowlanych i inżynierskich. Odbierane, przez czujniki akustyczne rozmieszczone na obiekcie, sygnały porównywane są z bazą sygnałów wzorcowych utworzonych wcześniej dla określonych procesów niszczenia. W ten sposób identyfikowane procesy destrukcyjne, są następnie lokalizowane poprzez analizę różnicy czasu dojścia sygnału do poszczególnych czujników. Identyfikacja i lokalizacja aktywnych procesów destrukcyjnych umożliwia dokonanie oceny stanu technicznego obiektów, a więc stanowi podstawę metody monitoringu i diagnostyki.

Zaletą metody (nazwanej IADP) jest możliwość takiego rozmieszczenia czujników AE żeby pokryć ich zasięgiem pomiarowym cały badany obiekt oraz możliwość prowadzenia badania w czasie rzeczywistych obciążeń eksploatacyjnych.

Metoda IADP została w swej pierwotnej wersji opracowana do analizy procesów destrukcyjnych w betonowych elementach sprężonych [4, 5], a następnie rozwinięta [6] i zastosowana w analizie elementów stalowych [7], gdzie utworzono nową bazę sygnałów wzorcowych dla procesów destrukcyjnych będących wynikiem obciążeń cyklicznych.

Dla procesu pęknięcia stali, wzorcowe bazy sygnałów zostały utworzone na podstawie dwunastu parametrów sygnału AE: 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, średni poziom sygnału, średnia częstotliwość sygnału, częstotliwość pogłosu i częstotliwość początkowa.

Wzorce sygnałów AE zostały uzyskane w wyniku badań prowadzonych na obciążanych monotonicznie próbkach gładkich i z karbem w temp.  $-60\div+60^{\circ}\text{C}$  wykonanych ze stali: St3S, 18G2A i stali pobranej z konstrukcji starego mostu, na zginanych monotonicznie i cyklicznie modelach elementów z karbem w temp.  $+20^{\circ}\text{C}$  oraz modelach węzłów spawanych, nitowanych i skręcanych wykonanych z tych samych gatunków stali, uzyskując następujące klasy sygnałów wzorcowych:

- klasa 4 sygnały związane z pracą konstrukcji np. odkształcenia stali w zakresie pracy sprężystej, odkształcenia termiczne itp.
- klasa 0 uplastycznienie stali w wierzchołku pęknięcia,
- klasa 1 inicjacja pęknięcia,

- klasa 2 rozwój pęknięcia,
  - klasa 3 sygnały będące wynikiem nałożenia się fal generowanych przez więcej niż jeden proces niszczenia oraz tarcie powierzchni,
- które zaznaczono symbolami i kolorami, jak w tablicy 1

Tablica 1. Klasy i symbole sygnałów AE

Kolor	<span style="color: red;">■</span>	<span style="color: blue;">■</span>	<span style="color: green;">■</span>	<span style="color: cyan;">■</span>	<span style="color: purple;">■</span>
Nr klasy	0	1	2	3	4

Identyfikacja procesów destrukcyjnych rozwijających się w czasie obciążenia eksploatacyjnego obiektu umożliwia ocenę jego stanu technicznego.

### 3. Badania i wyniki

#### 3.1. Charakterystyka obiektu

Badany obiekt jest stalowym mostem nitowanym o konstrukcji kratownicowej ciągłej, o zmiennej wysokości konstrukcyjnej z jezdnią górną, usytuowanym w Sandomierzu, w ciągu drogi krajowej nr 77 nad rzeką Wisłą.



Rys. 1. Stary most przez Wisłę w Sandomierzu (rok budowy – 1953)

Rozpiętości przęseł wynoszą odpowiednio:  $84,8+95,4+95,4+95,4+84,8=455,8$  m. Jego ustrój nośny stanowią dwa nitowane dźwigary kratowe o wysokości konstrukcyjnej 3,1 m, (przęsło) do 5,7 m, (podpora). Dźwigary są stężone dwuteowymi poprzecznkami nitowanymi, na których opiera się stalowy ruszt pomostu z belek walcowanych. Na ruszcie są ułożone blachy nieckowe, wypełnione betonem asfaltowym i przykryte konwencjonalną nawierzchnią bitumiczną.

W wyniku oględzin konstrukcji mostu, stwierdzono występowanie korozji powierzchniowej większości elementów stalowych mostu. Korozja nasilona jest na górnych powierzchniach elementów konstrukcyjnych mostu, w szczególności w rejonie pasów dolnych, poprzecznik i podłużnic oraz dolnych węzłów kratownic. Stwierdzono również występowanie korozji w miejscu styku profili i blach elementów wielogałęziowych, tzn. słupków, krzyżulców i pasów, a także w miejscu łączenia kątowników z blachami środków i pasów poprzecznik i podłużnic. Ponadto zauważono nieodpowiednie odwodnienie stalowych płyt ortotropowych stanowiących jezdnię mostu, co prowadzi do powstawania dodatkowych ognisk korozji.

Opisane zniszczenia spowodowane są działaniami czynników korozyjnych na skutek zalegania wody opadowej, co przy braku odpowiedniej warstwy antykorozyjnej jaką

zabezpieczone powinny być wszystkie elementy stalowe mostu, sprzyja szybkiemu rozwojowi zjawisk korozyjnych i niszczeniu struktury materiału.



Rys. 2. Węzeł górny (widok od wewnątrz), widoczna korozja powierzchniowa i wżerowa podłużnic oraz korozja wżerowa i powierzchniowa blachy oraz nitów

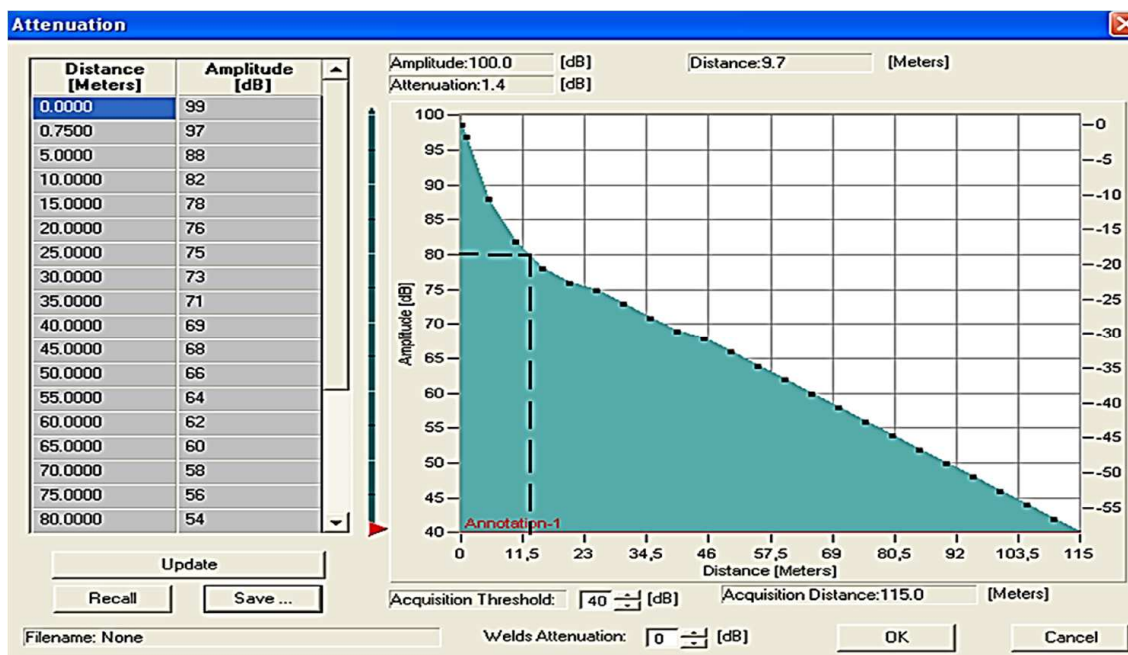
### 3.2. Zastosowanie metody IADP

Badania prowadzono z wykorzystaniem zestawu pomiarowego AE (rys. 3) składającego się z: 24-kanalowego systemu emisji akustycznej wraz z komputerem PC pozwalającym na rejestrację i przetwarzanie sygnałów AE oraz ich parametrów; przedwzmacniaczy umożliwiających przesyłanie sygnałów na większe odległości (do 150 m) od punktu pomiarowego; piezoelektrycznych czujników rezonansowych emisji akustycznej o częstotliwości 55kHz; uchwytów do mocowania czujników wyposażonych w elastyczne wkładki umożliwiające odpowiedni docisk czujników; aplikacji umożliwiających rejestrację, przetwarzanie i wizualizację wyników pomiaru (rejestrowanych danych pomiarowych); aplikacji do analizy numerycznej sygnałów AE umożliwiającej klasyfikację źródeł AE, np. NOESIS 4.0; bazy danych sygnałów wzorcowych; aplikacji pozwalającej na lokalizację źródeł emisji akustycznej.



Rys. 3. Zestaw pomiarowy

Czujniki pomiarowe rozmieszczono w najbardziej wyężonych węzłach i podłużnicach wskazanych przez zespół wykonujący ekspertyzę mostu z wykorzystaniem NDT [1]. W wyznaczonych punktach pomiarowych oczyszczono mechanicznie powierzchnię konstrukcji z zabrudzeń. Na elementach liniowych (belki) uchwyty mocujące czujniki zostały zamocowane na dolnej powierzchni belki równolegle do osi, w odstępach określonych na podstawie sporządzonej krzywej tłumienia (zgodnie z zaleceniami PN-EN 14584:2006 (U)). Na elementach płaskich (płyty, węzły) czujniki rozmieszczono na całej powierzchni elementu w taki sposób, aby wyznaczały naroża regularnych figur geometrycznych, np. trójkąty, trapezy, a odległość między czujnikami określona została również na podstawie krzywej tłumienia (rys. 4).



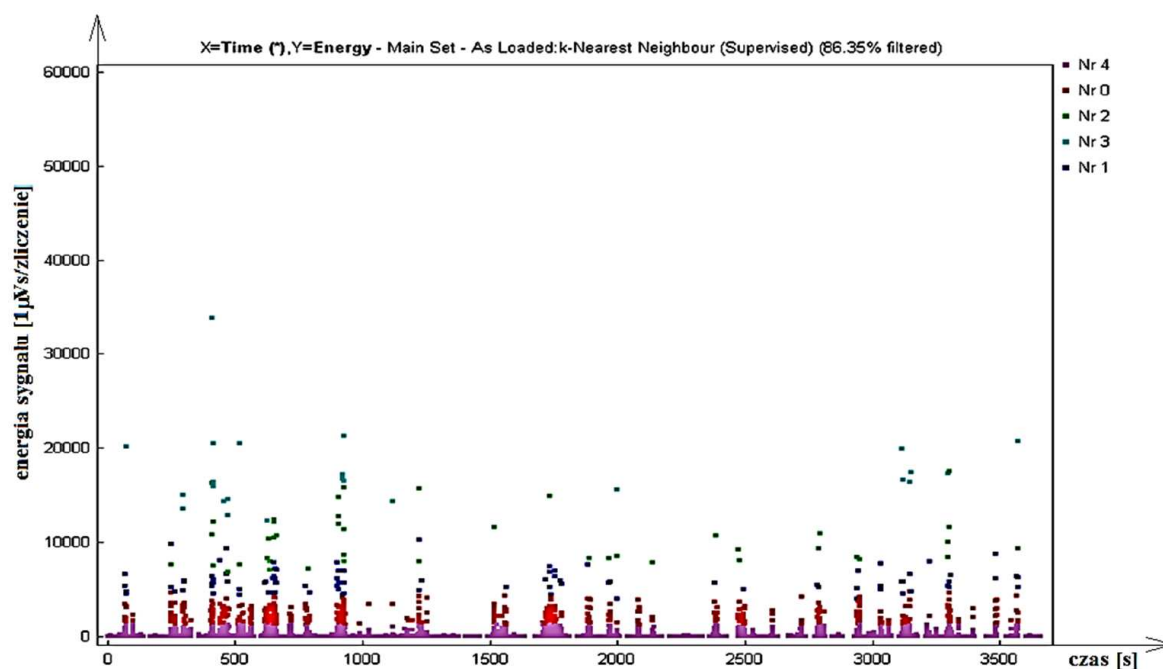
Rys. 4. Krzywa tłumienia

Przyjęto, mając na uwadze poprawność pomiaru, iż tłumienie sygnału akustycznego nie może być większe niż 20 dB, co umożliwiło przyjęcie maksymalnej odległości pomiędzy czujnikami 12,50 m (rys. 4).

Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono przykładowy wynik pomiaru wykonany metodą IADP pokazując rejestrowane klasy sygnałów jako wartość jednego z parametrów emisji akustycznej (czas trwania sygnału – rys. 5 i energia sygnału – rys. 6) w funkcji czasu.



Rys. 5. Pomiar metodą IADP – czas trwania sygnału w funkcji czasu



Rys. 6. Pomiar metodą IADP – energia sygnału w funkcji czasu

Przedstawione wyniki (czujniki 5 i 6 umieszczone na dolnej powierzchni belki w odległości 12,5 m od siebie) zarejestrowano na przęśle 1 w podłużnicy 3, która wykazuje znaczne ślady korozji i gdzie obserwowane są najsilniejsze sygnały AE.

Na podstawie zarejestrowanych sygnałów AE, poddanych analizie z wykorzystaniem bazy sygnałów wzorcowych, można zauważyć, że w analizowanym elemencie pojawiają się sygnały wszystkich klas. Czas trwania (*duration*) tych sygnałów jak i energia są wysokie i osiągają wartość: 200 000  $\mu\text{s}$  czas trwania, natomiast energia emitowana w trakcie powstawania sygnałów osiąga wartość do 20 000 eu. Sygnały emisji akustycznej o wysokich parametrach

nie są generowane w sposób ciągły tylko inicjowane przejeżdżającymi pojazdami o określonych cechach (ciągniki siodłowe z naczepą poruszające się z prędkością ponad 60 km/h lub pojazdy ciężarowe poruszające się w kolumnie z prędkością powyżej 60 km/h). Zlokalizowane i zarejestrowane sygnały generowane są głównie w strefie środkowej badanej podłużnicy.

Niski czas narastania sygnałów (*rise time*) 2 500  $\mu$ s wskazuje, że sygnały pochodzą od procesów korozyjnych zachodzących przy powierzchni górnego pasa podłużnicy oraz płyty ortotropowej mostu. Sugeruje to, że procesy korozyjne są zaawansowane a obciążenia dynamiczne doprowadzają do powstawania pęknięć rozwarstwiających w obrębie powierzchni skorodowanych i ich tarcia pomiędzy sobą.

### 3.3. Wyniki badań przy użyciu metody IADP

Badania prowadzone z wykorzystaniem metody IADP wykazały pojawianie się w obrębie otworów blach nitowanych niewielkich mikropęknięć zmęczeniowych, które nie stwarzają w tej chwili zagrożenia bezpieczeństwa, jednak muszą być monitorowane gdyż ich ewentualny rozwój może doprowadzić do powstania pęknięć zmęczeniowych. Obecnie nie wykryto żadnego, aktywnego pęknięcia zmęczeniowego. Zarejestrowano także nieznaczne poluzowanie nitów i ich ruch, będące wynikiem znacznego skorodowania powierzchniowego blach węzłowych.

Na podstawie wyników badań wszystkich elementów (7 węzłów, 10 podłużnic) w trzech przęsłach należy stwierdzić że:

Sygnały emisji akustycznej nie są rejestrowane w sposób ciągły tylko generowane są przejeżdżającymi pojazdami o określonych cechach (ciągniki siodłowe z naczepą poruszające się z prędkością ponad 50 km/h lub pojazdy ciężarowe poruszające się w kolumnie z prędkością powyżej 50 km/h). Ma to związek ze stanem dylatacji na obiekcie oraz obciążeniami dynamicznymi powodującymi generowanie sygnałów AE w obrębie zamocowania krzyżulców w analizowanych węzłach i podłużnicach.

Zarejestrowane sygnały wskazują, że następuje wzrost naprężeń w połączeniach nitowanych w obrębie środka węzła ze względu na zmniejszenie grubości blach spowodowane korozją powierzchniową, a w niektórych miejscach i wżerową oraz nieznaczne poluzowanie nitów i ich ruch. Powoduje to pojawianie się w obrębie otworów niewielkich mikropęknięć zmęczeniowych, które nie stanowią obecnie zagrożenia, ale muszą być monitorowane gdyż ich ewentualny rozwój może doprowadzić do powstania pęknięć zmęczeniowych. Liczba sygnałów przypisana procesom uplastycznienia i rozwoju pęknięć jest obecnie mała i skupiona w strefie środkowej blachy węzłowej. Sygnały te powstają tylko w chwili przejazdu samochodów ciężarowych poruszających się z prędkością przekraczającą prędkość dopuszczalną na moście tj. 50 km/h.

Sygnały AE zarejestrowane i zlokalizowane w strefie środkowej badanych podłużnic są głównie wynikiem procesów korozyjnych zachodzących przy powierzchni górnego pasa podłużnicy oraz płyty ortotropowej mostu.

Zarejestrowane sygnały wskazują, że procesy korozyjne są zaawansowane a obciążenia dynamiczne prowadzą do powstawania mikropęknięć rozwarstwiających w obrębie powierzchni skorodowanych i ich tarcia pomiędzy sobą. Ponieważ liczba sygnałów klas wyższych nr 1, 2, 3 nie jest duża, można wnioskować, że procesy te nie stanowią zagrożenia bezpieczeństwa dla badanego mostu. Należy jednak zwrócić uwagę, że pozostawienie obiektu bez remontu może prowadzić do powstania pęknięć zmęczeniowych badanego elementu, a tym samym osłabić całą konstrukcję.

Nie zaobserwowano pęknięć zmęczeniowych w badanych, najbardziej wytężonych, przęsłach propagujących się w trakcie obciążenia mostu.

Bezpośrednią przyczyną takiego stanu jest zaniedbanie właściwego utrzymania obiektu:

- dopuszczenie do zniszczenia izolacji pod nawierzchnią
- brak konserwacji widocznych elementów stalowych.
- brak konserwacji powierzchni elementów betonowych.

Uwzględniając stan techniczny obiektu oraz jego parametry dotyczące nośności zalecany jest jego remont generalny bądź rozbiórka obiektu i budowa nowej przeprawy.

Przeprowadzona ocena stanu technicznego mostu w Sandomierzu są analogiczne do wyników uzyskanych przez Zespół z Politechniki Rzeszowskiej pod kierunkiem prof. T. Siwowskiego prowadzonych z wykorzystaniem metod NDT.

#### 4. Wnioski

Przeprowadzone badania wykazały użyteczność metody IADP do oceny stanu technicznego konstrukcji stalowych. Pozwala ona nie tylko na identyfikację aktywnych procesów destrukcyjnych przy obciążeniach eksploatacyjnych, ale także ich lokalizację.

Zaletą metody IADP jest możliwość analizy całego badanego elementu, a nie tylko jego wybranego fragmentu, jak w metodach NDT. Pozwala ona także na lokalizację miejsc szczególnie niebezpiecznych, wskazując obszary dla dodatkowych badań z wykorzystaniem innych metod.

#### Literatura

1. Siwowski T., Kulpa M., Zimerowicz A.: Ocena trwałości zmęczeniowej mostu kratowniowego przez Wisłę w Sandomierzu. Materiały z seminarium pn.: „Trwałość obiektów mostowych”. Politechnika Wrocławska, 22-23 listopad, 2012. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, s. 239-252.
2. Flaga K.: „Diagnostyka, modernizacja i rewitalizacja obiektów mostowych z betonu” – 56. Konferencja KILiW PAN i KN PZITB Krynica 2010.
3. Łagoda M.: „Nowoczesne systemy diagnostyki i monitoringu obiektów drogowych w Europie – kierunki rozwoju” – 56. Konferencja KILiW PAN i KN PZITB Krynica 2010.
4. Gołaski L., Świt G., Kalicka M., Kanji O.: Acoustic Non Destructive Techniques as a new Method for Evaluation of Damages in Prestressed Concrete Structures: Failure of Concrete Structures, *Journal of Acoustic Emission*, Vol. 24, pp. 187-195 (2006), USA.
5. Świt G.: Metoda emisji akustycznej w analizie uszkodzeń konstrukcji betonowych wstępnie sprężonych. Politechnika Świętokrzyska, Kielce, 2008, pp. 1-158 (monografia).
6. Gołaski L., Goszczyńska B., Świt G., Trąmpczyński W.: System for the global monitoring and evaluation of damage processes developing within concrete structures under service load, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, vol.7, No 4, December 2012, pp.237- 245.
7. Gołaski L., Goszczyńska B., Świt G., Trąmpczyński W.: Zastosowanie metody emisji akustycznej do identyfikacji procesów niszczenia w konstrukcjach stalowych, *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej*, 3/2011/III, s. 173-180.