



GRZEGORZ ŚWIT, *gswit@tu.kielce.pl*

BARBARA GOSZCZYŃSKA, *bgoszczyńska@tu.kielce.pl*

Politechnika Świętokrzyska Kielce

ALEKSANDRA KRAMPIKOWSKA,

IZABELA KWAŚNIEWSKA

PIOTR CHMURA

Studenci Koła Naukowego „SPECMOST” Politechnika Świętokrzyska Kielce

## ZASTOSOWANIE METODY EMISJI AKUSTYCZNEJ DO OCENY WYKONAWSTWA WIADUKTU NAD TORAMI KOLEJOWYMI

### APPLICATION OF ACOUSTIC EMISSION METHOD FOR CONSTRUCTION WORKS EVALUATION OF THE VIADUCT OVER THE RAIL WAY LINE

**Streszczenie** W referacie przedstawiono zastosowanie metody emisji akustycznej do oceny rozwoju rys w konstrukcji żelbetowej. Została ona wykorzystana do oceny aktywności procesu zarysowania nowo wybudowanego, ważnego z punktu widzenia bezpieczeństwa i płynności ruchu, wiaduktu na drodze krajowej S-7, nad linią kolejową relacji Kielce-Warszawa. Sygnały AE uzyskane z przeprowadzonego badania poddano wieloparametrowej analizie sygnału i grupowaniu ich w klasy, a także przypisano poszczególnym klasom kody zagrożenia uwzględniające intensywność i rozległość aktywnych uszkodzeń w skali sześciopostopniowej. Stwierdzono pełną przydatność zastosowanej metody EA do oceny i monitoringu procesów destrukcyjnych w konstrukcjach żelbetowych, a tym samym zastosowania jej do oceny wykonawstwa, jak i kontroli w stadium użytkowania obiektów.

**Abstract** The article shows the application of the Acoustic Emission method for assessment of the development of cracks in reinforced concrete structure. This method was used for estimation of cracks activity within the newly built viaduct, important because of safety and economy, over the railway line Kielce-Warszawa. AE signals were taken under service load, then were subjected to multiparameter analysis and grouped into Classes corresponding to active damage processes. To each Class, hazard codes taking into account intensity and extent of active damage in the six-scale, were assigned. It was found full usefulness of the applied AE method for detection and monitoring of damage processes within reinforced concrete structures. It means it can be applied for performance assessment and inspection of the structures in service.

## 1. Wstęp

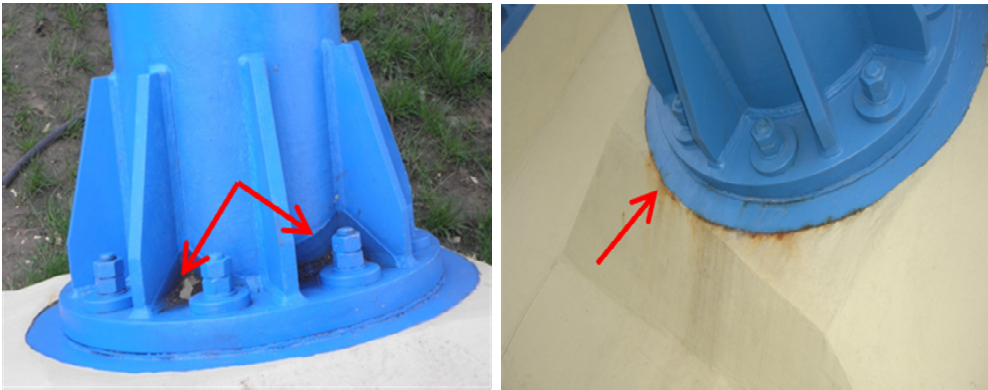
Problem trwałości obiektów mostowych, w tym obiektów nowych, przekładający się wprost na sprawność i niezawodność układu komunikacyjnego kraju, a więc na funkcjonowanie wielu podstawowych dziedzin życia gospodarczego i społecznego, został przedstawiony w pracy [1]. W Eurokodzie [2] w punkcie 2.4 (1)P Trwałość podano:

„Konstrukcję należy w taki sposób projektować, aby zmiany następujące w projektowym okresie użytkowania, z uwzględnieniem wpływów środowiska i przewidywanego poziomu utrzymania, nie obniżały właściwości użytkowych konstrukcji poniżej zamierzonego poziomu”, a projektowany okres użytkowania dla mostów został orientacyjnie przyjęty na 100 lat. W celu wykonania konstrukcji spełniającej określone wymagania użytkowe zaleca się

podjęcie środków zarządzania jakością obejmujących między innymi kontrole w stadium projektowania, wykonania i utrzymania.

W ostatniej dekadzie wybudowano wiele nowych obiektów infrastruktury drogowej o skomplikowanych układach konstrukcyjnych, wykorzystując najnowsze rozwiązania technologiczne i materiałowe zwiększające nośność i zapewniające trwałość tych konstrukcji. Obiekty te teoretycznie winny być przystosowane do pracy w określonych warunkach środowiskowych i obciążeniowych wynikających z istniejącego natężenia ruchu i tonażu przewożonych ładunków.

Obserwując jednak stan niektórych nowo budowanych obiektów, można mieć wątpliwości, co do ich trwałości w projektowanym okresie użytkowania. Obawy te wynikają z usterek, które zostały zaobserwowane np. na obiektach mostowych wybudowanych w ostatnich dwóch latach w województwie świętokrzyskim. Ogólnie można stwierdzić, że usterki spowodowane są zastosowaniem nieodpowiednich materiałów, błędami projektowymi np.: powodującymi utrudnione odprowadzenie wody opadowej i tym samym korozje stali (rys. 1), jednak głównie są to błędy wynikające z niskiej kultury pracy i nieprzestrzegania wymagań zawartych w specyfikacjach (rys. 2).



Rys. 1. Błędy projektowe zamocowania łuków rozporowych kładki



Rys. 2. Zniszczenia skarpy oraz złe odprowadzenie wody z obrębu kładki wynikające z nieprzestrzegania zaleceń SST oraz niskiej kultury pracy

## 2. Badania i wyniki

W pracy zaprezentowano możliwość przystosowania metody emisji akustycznej opracowanej dla konstrukcji sprężonych [3, 4] do oceny procesów destrukcyjnych występujących w trakcie eksploatacji elementów żelbetowych, w tym nowo wybudowanych. System oceny stanu technicznego konstrukcji wykorzystujący metodę EA dostosowano dodatkowo do obowiązującego zarządzenia GDDKiA [5].

Przeeglądy zostały wykonane, zgodnie z załącznikiem do Zarządzenia nr 64 Generalnego Dyrektora GDDKiA z dnia 13 listopada 2008 roku [5], na 7 obiektach zlokalizowanych w ciągu drogi krajowej S-7, w okolicy Kielc. Szerszym zakresem badań objęto pierwszy obiekt oznaczony jako WD1 (rys. 3).

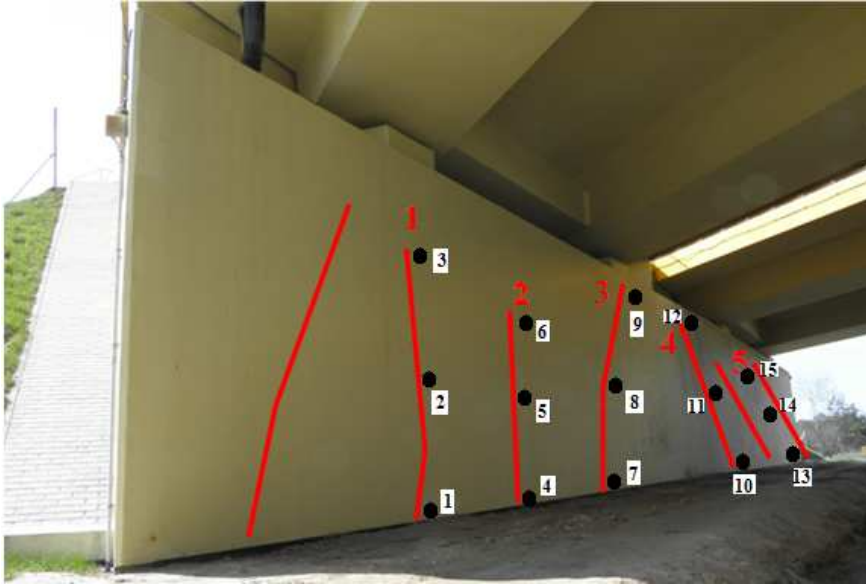


Rys. 3. Widok badanego wiaduktu WD-1 nad linią kolejową

Decyzja o wyborze obiektu uwzględniała kryterium konsekwencji ekonomicznych, społecznych i środowiskowych oraz stan uszkodzenia. Badany wiadukt nad linią kolejową relacji Kielce-Warszawa jest ważnym obiektem z punktu widzenia bezpieczeństwa i płynności ruchu na drodze krajowej S-7 i zaobserwowano na nim wyraźne uszkodzenia.

Analizując stan techniczny wiaduktu WD1 sporządzono dokumentację fotograficzną istniejących na obiekcie usterek wraz z ich inwentaryzacją oraz wykonano badania sklerometryczne wytrzymałości betonu przyczółków. Dodatkowo, w celu ustalenia czynnego rozwoju zauważonych rys, zastosowano metodę emisji akustycznej, a także podjęto próbę identyfikacji procesów destrukcyjnych występujących w badanym elemencie wiaduktu wykorzystując bazę sygnałów wzorcowych.

Badania zostały skupione głównie na przyczółkach wiaduktu ze względu na to, że zauważono na nich rysy występujące regularnie w odstępach od 1 do 3 metrów (rys. 4).



Rys. 4. Rozmieszczenie i kierunek rozwoju rys na przyczółku wraz z przyjętą numeracją rys i czujników

Konstrukcja wiaduktu płytowo belkowa, belki kablobetonowe oparte na przyczółkach. Przyczółki posadowione są bezpośrednio na gruncie stabilizowanym, w odległości  $\sim 4$  m od torów kolejowych. W trakcie wykonawstwa, realizowanego w okresie jesień-wiosna, pojawiły się już problemy ze stabilnością nasypów znajdujących się za przyczółkiem od strony Kielc, co spowodowało konieczność jego wzmocnienia poprzez doprężanie.

Na podstawie przeprowadzonych badań sklerometrycznych oszacowano: wytrzymałość charakterystyczną na poziomie 39,70 MPa, odchylenie standardowe 10,71 MPa, a współczynnik zmienności  $\nu = 0.18$ , można więc wstępnie stwierdzić, że jakość betonu była niedostateczna.

Rysy na przyczółkach zostały zauważone w pierwszym roku eksploatacji, szerokość ich wynosiła od 1 do 7 mm, a przez okres roku prowadzonych obserwacji szerokość rys średnio zwiększyła się o 2 mm. Po okresie około 18 miesięcy eksploatacji wiaduktu, została wykonana iniekcja istniejących rys. Niewątpliwie wpłynęło to na poprawę wyglądu obiektu, ale wydaje się, że najważniejszym jest stwierdzenie czy proces degradacji został zahamowany.

W celu oceny możliwości dalszego rozwoju powstałych rys, czyli skuteczności wykonanej iniekcji, zastosowano metodę emisji akustycznej wykorzystującą opracowaną dla konstrukcji sprężonych bazę sygnałów wzorcowych [3].

### 2.1 Metoda emisji akustycznej w kontroli aktywności procesu zarysowania

Na powierzchni przyczółka w obrębie pięciu rys rozmieszczono liniowo po 3 czujniki rezonansowe o płaskiej charakterystyce częstotliwości w zakresie 30÷80 kHz (numery rys i czujników pokazano na rys. 4). Odległość pomiędzy czujnikami wynosiła 170 centymetrów. Jest to odległość optymalna, wystarczająca do zarejestrowania wszystkich sygnałów EA z obrębu badanej rysy. Zastosowane rozmieszczenie czujników pokazano na rys. 5.

W czasie badania zastosowano tzw. lokalizację strefową. Oznacza to, iż sygnały AE rejestrowane były tylko przez ten czujnik, który znajdował się najbliżej źródła sygnałów. Przed przystąpieniem do właściwego pomiaru sprawdzono poprawność działania aparatury.





Rysunek nr 5. Rozmieszczenie czujników EA

W sąsiedztwie każdego z czujników wywołano sygnały do testowania sprawności czujników i poprawności ich zamocowania. Źródłem tych sygnałów był łamany grafit o średnicy 0,5 mm firmy Pentel. Stwierdzono, iż każdy z czujników zarejestrował sygnały AE. Amplituda tych sygnałów wynosiła około 98 dB.

Właściwe badanie prowadzono w czasie eksploatacji wiaduktu, w dzień powszedni w godzinach 10÷16, czyli w porze największego ruchu, przy przejeździe około 1000 pojazdów na godzinę, w którym przeważał udział samochodów ciężarowych o masie powyżej 12 t.

Zarejestrowane sygnały AE poddano analizie, wykorzystując 12 parametrów sygnału, i porównano z tymi samymi parametrami sygnałów wzorcowych emitowanych przez procesy niszczenia, jakie mogły mieć miejsce w przyczółku.

Bazę sygnałów wzorcowych tworzą sygnały charakteryzujące poszczególne procesy destrukcyjne, co umożliwia identyfikację tych procesów i pozwala na ocenę stanu technicznego konstrukcji. W bazie danych znajdują się także typowe sygnały szumów. Obróbkę statystyczną sygnałów wykonano przy użyciu programu NOESIS v.4.0 bazującego na analizie obrazu akustycznego z wykorzystaniem systemu Supervised Pattern Recognition. Pozwoliło to na stworzenie tzw. black box.

Mając na uwadze procesy destrukcyjne zachodzące w konstrukcjach sprężonych, poszczególnym procesom przypisano Klasy sygnałów oraz stopień zagrożenia dla konstrukcji:

- Klasa Nr 1 (Kod zagrożenia 5) – Mikropęknięcia w betonie na granicy frakcji kruszywa o małych wymiarach ( $\phi \leq 2$  mm) i zaprawy cementowej,
  - Klasa Nr 2 (Kod zagrożenia 4) – Mikropęknięcia w betonie na granicy frakcji kruszywa o małych i średnich wymiarach ( $\phi \leq 8$  mm),
  - Klasa Nr 3 (Kod zagrożenia 3) – Powstanie i propagacja rys w strefie rozciąganej betonu,
  - Klasa Nr 4 (Kod zagrożenia 3) – Rozwój rys,
  - Klasa Nr 5 (Kod zagrożenia 2) – Pęknięcie na granicy beton – zbrojenie,
  - Klasa Nr 6 (Kod zagrożenia 2) – Uplastycznienie stali i betonu,
  - Klasa Nr 7 (Kod zagrożenia 1) – Odspojenie się zbrojenia sprężającego od betonu,
  - Klasa Nr 8 (Kod zagrożenia 0) – Zerwanie splotów sprężających,
- a także odpowiadające im symbole i kolory (Tablica 1).

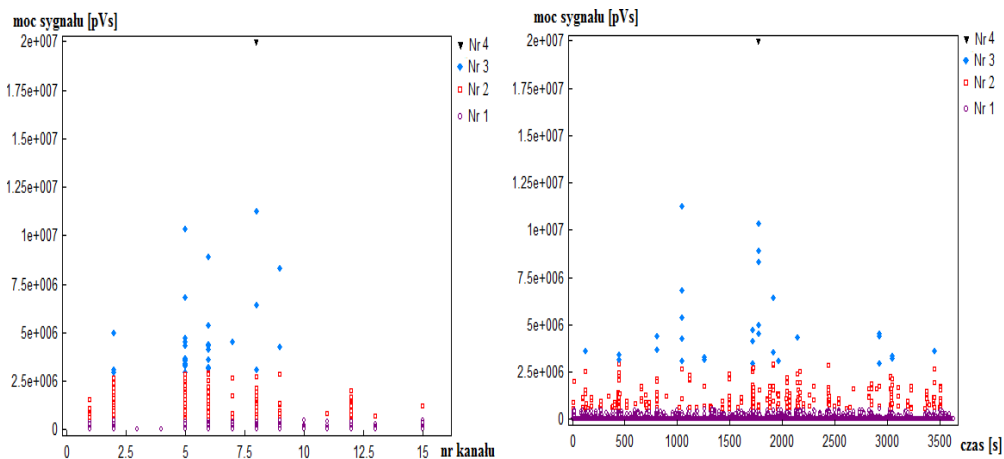
Tablica 1. Charakterystyczne klasy sygnałów, przypisane im symbole i kolory, kody zagrożenia

Kod zagrożenia	5	4	3	3	2	2	1	0
Kolor/kształt	○	□	◆	▼	▲	●	+	X
Nr klasy	Nr 1	Nr 2	Nr 3	Nr 4	Nr 5	Nr 6	Nr 7	Nr 8

Dokonując pomiarów sygnałów AE w badanym elemencie, oraz dysponując bazą danych sygnałów wzorcowych można zidentyfikować aktywne procesy destrukcyjne występujące w całej badanej objętości [4]. Ponieważ w przypadku elementów z betonu zbrojonego źródłami fal akustycznych będą uszkodzenia, przynajmniej w zakresie pierwszych czterech numerów klas sygnałów, takie jak dla elementów sprężonych, do oceny stanu technicznego przyczółka wiaduktu wykorzystano bazę sygnałów wzorcowych dla elementów sprężonych. Opracowanie pełnych kryteriów niszczenia konstrukcji żelbetowych oraz utworzenie bazy sygnałów wzorcowych dla tych konstrukcji jest przedmiotem obecnie prowadzonych badań.

W większości państw europejskich podstawowym sposobem kontroli mostów są inspekcje wizualne, których wyniki podawane są w postaci kodów cyfrowych w dwu tabelach: wrażliwości obiektu na uszkodzenie oraz rozległości uszkodzeń. W celach porównawczych opracowano tabelę umożliwiającą wyniki monitoringu metodą AE przedstawić w podobny sposób. Jako miarę stopnia uszkodzenia przyjęto występowanie sygnałów określonej klasy, kierując się źródłami sygnałów AE i związanymi z nimi procesami destrukcyjnymi.

Wykres punktowy mocy sygnału [pVs] w funkcji czasu [s] zarejestrowany przez 15 czujników przedstawiono przykładowo na rys. 6.



Rys. 6. Parametr mocy sygnału w funkcji: a) numeru kanału, b) czasu

Przyjętą [3] w skali sześciostopniowej klasyfikację wrażliwości i rozległości uszkodzeń przedstawiono w tablicy 2.

Tablica 2. Wrażliwość (kody A-F) i rozległość (kody 0-5) uszkodzeń [3, 5]

Kod	Kod	Opis
A	5	Brak znaczących wad/Nowy element bez wad
B	4	Miała ilość wad, obejmująca nie więcej niż 5% powierzchni (długości) bądź ilości elementów / Nowy element bądź element z wadą niemającą wpływu na jego nośność
C	3	Umiarkowana ilość wad, obejmująca od 5% do 20% powierzchni (długości) bądź ilości elementów / Pierwsze oznaki pogorszenia stanu technicznego konstrukcji, pojawiają się niewielkie wady (uszkodzenia), niewpływające na nośność elementu.
D	2	Duża ilość wad, obejmująca od 20% do 50% powierzchni (długości) bądź ilości elementów / Umiarkowana wada (uszkodzenie), która może mieć wpływ na utratę nośności
E	1	Rozległe wady, obejmujące od 50% do 70% powierzchni (długości) bądź ilości elementów / Poważna wada (uszkodzenie) i/ albo element jest blisko awarii (zniszczenia)
F	0	Rozległe uszkodzenia, obejmujące więcej niż 70% powierzchni (długości) bądź ilości elementów / Element niespełniający swojej funkcji użytkowej bądź zniszczony

Analizując rys. 6 można zauważyć, że rysy nr 1, 2, 3 (w obrębie czujników od 1 do 9) wykazują, pomimo wykonanej iniekcji, cechy dalszego rozwoju procesów destrukcyjnych w postaci rozwoju rys. Natomiast rysy nr 4 i 5 (czujniki od 10 do 15) nie wykazują dalszego rozwoju pod tym poziomem obciążenia. Stwierdzona aktywność procesów destrukcyjnych pod rzeczywistym obciążeniem eksploatacyjnym sugeruje pojawienie się pierwszych oznak pogarszania się stanu technicznego konstrukcji obiektu i wskazuje na konieczność interwencji w celu wyeliminowania przyczyn powstania i rozwoju rys.

Uwzględniając kryteria podane w tablicy 2 sporządzono tablicę z oceną punktową uwzględniającą wrażliwość konstrukcji na zaobserwowane defekty, jak i ich rozległość (tablica 3).

Tablica 3. Opis rozległości uszkodzeń i wpływu defektów na stan techniczny przyczółka

	0	1	2	3	4	5
A						
B						
C						
D				3	D	
E					4	E
F						

#### 4. Wnioski

Na podstawie obserwacji obiektu WD-1 można stwierdzić, że zauważony na przyczółkach proces zarysowania nadal się rozwija pomimo wykonanych prac naprawczych. Zastosowanie metody emisji akustycznej pozwala na stwierdzenie, że procesy destrukcyjne pod obciążeniem eksploatacyjnym są czynne, a zarejestrowane sygnały AE klasyfikują badany przyczółek jako 3D czyli są to pierwsze oznaki pogarszania się stanu technicznego, co na pewno będzie miało wpływ na trwałość obiektu. W tej sytuacji należy bezwzględnie ustalić wszystkie przyczyny zarysowania, ale co ważniejsze przyczyny dalszego rozwoju rys pod obciążeniem eksploatacyjnym, pomimo wykonanej naprawy oraz ze względu na zapewnienie

nie trwałości, zaprojektować i wykonać wzmocnienie przyczółka w celu wyeliminowania dalszego ich rozwoju.

Można więc stwierdzić, że zastosowana metoda emisji akustycznej, pozwalająca na rejestrację czynnych procesów destrukcyjnych pod obciążeniem eksploatacyjnym oraz ocenę ich intensywności i rozległości poprzez porównanie z bazą sygnałów wzorcowych, może być stosowana do monitorowania procesu zarysowania, a tym samym do oceny i analizy procesów wykonawstwa oraz kontroli w stadium eksploatacji obiektów żelbetowych.

### **Literatura**

1. Bień J.: Zagadnienia trwałości obiektów mostowych w europejskich projektach badawczych – 56. Konferencja KILiW PAN i KN PZITB Krynica 2010.
2. PN-EN 1990 Eurokod – Podstawy projektowania konstrukcji.
3. Świt G.: „Metoda emisji akustycznej w analizie uszkodzeń konstrukcji betonowych, wstępnie sprężonych” – Kielce 2008.
4. Gołaski L., Goszczyńska B., Świt G., Trąmpczyński W.: „System monitoringu umożliwiający ocenę stanu technicznego obiektów betonowych” – 56. Konferencja KILiW PAN i KN PZITB Krynica 2010.
5. Załącznik do Zarządzenia nr 64 Generalnego Dyrektora Dróg i Autostrad „Zasady stosowania skali ocen punktowych stanu technicznego i przydatności do użytkowania” Warszawa 2008.
6. Świt G.: „Zastosowanie emisji akustycznej w badaniach obiektów mostowych – weryfikacja procedury japońskiej i amerykańskiej” – 56. Konferencja KILiW PAN i KN PZITB Krynica 2010.

Pracę wykonano w ramach Projektu Badawczo Rozwojowego NR 04000710.