



GRZEGORZ ŚWIT, gswit@tu.kielce.pl

BARBARA GOSZCZYŃSKA, bgoszczynska@tu.kielce.pl

WIESŁAW TRAMPCZYŃSKI, wtrampczynski@tu.kielce.pl

Politechnika Świętokrzyska Kielce

ZASTOSOWANIE METODY EMISJI AKUSTYCZNEJ DO MONITORINGU STANU TECHNICZNEGO WIADUKTU DROGOWEGO

APPLICATION OF ACOUSTIC EMISSION METHOD FOR MONITORING OF THE ROAD VIADUCT TECHNICAL CONDITION

Streszczenie W referacie przedstawiono zastosowanie metody emisji akustycznej do monitoringu stanu technicznego wiaduktu drogowego, ważnego z punktu widzenia zarówno bezpieczeństwa jak i płynności ruchu. Sygnały AE uzyskiwane z przeprowadzonych badań poddawano wieloparametrowej analizie sygnału i grupowaniu ich w klasy odpowiadające określonym procesom destrukcyjnym. Poszczególnym klasom przypisano kody zagrożenia w skali sześciostopniowej. Stwierdzono pełną przydatność zastosowanej metody AE do monitorowania procesów destrukcyjnych w konstrukcjach sprężonych, tym bardziej, że umożliwia ona ocenę zachodzących procesów destrukcyjnych w warunkach rzeczywistych obciążeń eksploatacyjnych.

Abstract The paper shows the application of the Acoustic Emission method for technical condition monitoring of the road viaduct, which is important because of safety and economy. AE signals taken under service load, were subjected to multiparameter analysis and grouped into Classes corresponding to active damage processes. To each Class, hazard codes in the six-scale, were assigned. Full usefulness of the applied AE method was found for detection and monitoring of damage processes within pre-tensioned concrete structures, specially because it allows to estimate the damage processes developing under terms of actual service loads.

1. Wstęp

Dynamika rozwoju gospodarczego Polski uzależniona jest w dużym stopniu od sprawności i niezawodności układu komunikacyjnego. Można też stwierdzić, że rozwój sieci transportowej, w tym na terenach silnie zurbanizowanych, konieczny jest dla zapewnienia właściwego funkcjonowania życia gospodarczego i społecznego. 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. Średnia ocena główna mostów i wiaduktów na drogach krajowych w Polsce [1] w oparciu o wytyczne tzw. systemu gospodarki mostowej w skali 1–5 (1 – stan awaryjny, 5 – stan bez zarzutu), wynosi 3,64. Przyczyną znacznej degradacji stanu technicznego tych obiektów jest zarówno coraz większe wyciążenie, spowodowane wzrostem: mas pojazdów, nacisku na oś samochodu i natężenia ruchu, jak i zaniedbania w ich bieżącym utrzymaniu, wynikające z braku funduszy na remonty. Mosty i wiadukty najczęściej były poddawane naprawom polegającym na reprofiliacji ubytków, albo w celu dopuszczenia

zwiększonego ruchu i tonażu, były wzmocniane. Rozwiązania konstrukcyjne obiektów mostowych, jak również ich wyteżenie w warunkach ciągłego wzrostu natężenia ruchu powodują w nich dalszy niekontrolowany wzrost uszkodzeń.

Czasowe wyłączenie wiaduktu, czy mostu z eksploatacji powoduje powstanie znacznych strat ekonomicznych, społecznych i środowiskowych, stąd obecnie wiele prac jest ukierunkowanych na rozwój technologii i procedur odpowiedniego utrzymania obiektów drogowych, a także metod ich monitoringu i diagnostyki. Systemy monitorowania wg [2] 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 monitorowania, metodą emisji akustycznej (AE), wykazującego oznaki pogarszania stanu technicznego, 22 przęsłowego wiaduktu drogowego w Kielcach. Monitoring prowadzony był w latach 2006÷2011 i będzie prowadzony nadal.

2. Badania i wyniki

Obiekt został zinwentaryzowany, wykonano dokumentację fotograficzną usterek, przeprowadzono podstawowe badania nieniszczące betonu oraz zastosowano metodę emisji akustycznej, opracowaną dla konstrukcji sprężonych [3, 4], do oceny procesów destrukcyjnych występujących w trakcie eksploatacji obiektu. Wykonano obliczenia aktualnej nośności wiaduktu z uwzględnieniem pogarszającego się stanu technicznego. System oceny stanu technicznego konstrukcji wykorzystujący metodę AE dostosowano dodatkowo do obowiązującego zarządzenia GDDKiA [5].

2.1 Charakterystyka obiektu

Badany obiekt położony w Kielcach, stanowi obustronną estakadę dojazdową do wiaduktu nad torami PKP, poza estakadami jezdnia usytuowana jest na nasypie w żelbetowych ścianach oporowych. Estakada została wybudowana pod koniec lat pięćdziesiątych. Z jednej strony znajduje się dziesięć przęseł prostych, wolnopodparty rozpiętości 16,20 m oraz jedno przęsło trapezowe łączące estakadę z ukośnym wiaduktem o długości 12,41÷19,99 m, a z drugiej najpierw jest takie samo przęsło trapezowe, a następnie siedem przęseł prostych.

Konstrukcja wszystkich przęseł prostych składa się z siedmiu belek dwuteowych w rozstawie 1,48 m, sprężonych kablami Freyssineta, połączonych monolitycznie z żelbetową płytą pomostu o zmiennej grubości: 12 cm nad belkami i 8 cm w środku przęseł i poprzecznicami skrajnymi oraz pośrednimi co $L/4$. Zastosowano sprężenie jednostronne z zabezpieczeniem bloków kotwiących obetonowaniem. Odstępy nad podporami wynoszą ~5 cm. Dwa przęsła trapezowe zostały wykonane w technologii żelbetowej, monolitycznej przy ukształtowaniu przekroju podobnego jak w przęsłach prostych.

W ramach przeprowadzonego w 1994 roku remontu przęsła obu estakad zostały uciągnięte płyty pomostu z jednoczesnym ścięciem bolców w łożyskach stałych. Uciągnięcie obejmuje szerokość jezdni a zbrojenie uciągające zakotwione w poprzecznicach skrajnych, usytuowane jest między środkami belek.

Po przebudowie wiaduktu, pomost składa się z ośmiu trzyprzęsłowych (26,79 + 34,09 + + 25,79 m) belek stalowych (blachownica dwuteowa) w rozstawie 1,48 m, zespolonych z żelbetowymi płytami pomostu o grubości 16 cm wykonanych na żelbetowym, prefabryko-

wanym deskowaniu traconym. Konstrukcja została zaprojektowana na obciążenia użytkowe klasy „B” z kilku procentowym, dodatkowym zapasem bezpieczeństwa.

Przeprowadzone w roku 2006 badania obiektu metodami tradycyjnymi wykazały zarysowania belek, płyt, oczepów oraz filarów (rys. 1), a na badanych powierzchniach elementów widoczne były ślady migracji wody przez beton w postaci białych osadów wodorotlenku wapnia oraz stalaktytów. Ze względu na zauważone usterki, główne badania skupiono na dźwigarach kablobetonowych. Na większości belek zauważono uszkodzenia w postaci lekko skorodowanych strzemion, rys podłużnych od spodu stopek najczęściej z widocznymi osadami wodorotlenku wapnia. W przęsłach Pr7 i Pr8 (nadając numery przęsłom Pr1, Pr2,...od przęsła skrajnego estakady, od strony wschodniej) zaobserwowano poważniejsze uszkodzenia. W dźwigarze skrajnym przęsła siódmego (Pr7) przy podporze pojawiła się rysa ukośna przecinająca środkik (rys. 2). W dźwigarach D1, D2 i D7 przęsła siódmego (nadając numery dźwigarom D1, D2,... od dźwigara skrajnego, od strony południowej) oraz w dźwigarze D1 przęsła ósmego Pr8 zaobserwowano rysy prostopadłe do osi belek.



Rys. 1. Zarysowania belek, płyt, oczepów i filarów



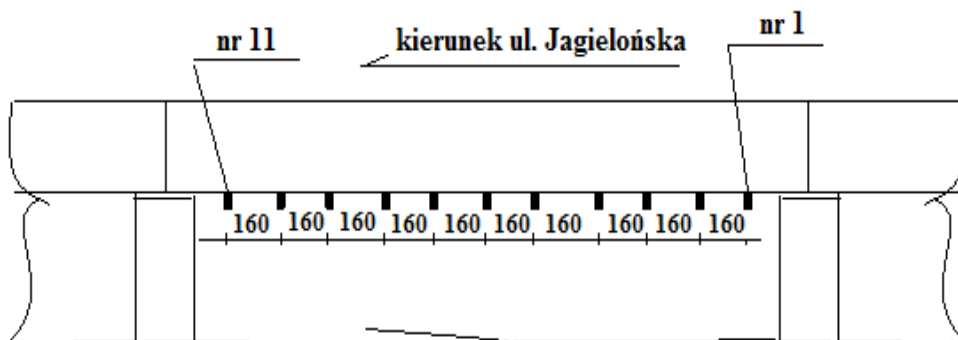
Rys. 2. Rysy ukośne w strefie podparcia i zakotwienia kabli

Analizując zauważone uszkodzenia, świadczące o pogarszającym się stanie obiektu oraz wzrost na nim natężenia ruchu podjęto decyzję o jego monitorowaniu, poddając wybrane belki comiesięcznym badaniom, przy użyciu metody AE. Remontu wiaduktu, do chwili obecnej, nie wykonano.

2.2 Metoda emisji akustycznej w monitoringu aktywności procesu degradacji stanu technicznego badanego wiaduktu

Na powierzchni belek przęsła Pr7 rozmieszczono liniowo po 11 czujników rezonansowych o charakterystyce 55 kHz, co daje 11 stref czujników Z1–Z11. Odległość pomiędzy czujnikami wynosiła 160 centymetrów [6]. Jest to odległość wystarczająca do zarejestrowania wszystkich sygnałów AE z obrębu badanej belki. Rozmieszczenie czujników pokazano na rysunku 3.

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.



Rys. 3. 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, co świadczy o właściwym zamocowaniu czujników.

Właściwe badania prowadzono w czasie eksploatacji wiaduktu, w dzień powszedni w godzinach 9÷16, czyli w porze największego ruchu, przy przejeździe około 600 pojazdów na godzinę, w którym przeważał udział samochodów osobowych.

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

Bazę sygnałów wzorcowych tworzą sygnały charakteryzujące poszczególne procesy destrukcyjne, co umożliwiła 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.

Baza sygnałów wzorcowych została utworzona dla elementów sprężonych i występującym w tego typu konstrukcjach 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 rys w strefie rozciąganej betonu
- Klasa Nr 4 (Kod zagrożenia 3) – Rozwój rysy
- 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

Dokonując pomiarów sygnałów AE, w badanym elemencie, oraz dysponując bazą danych sygnałów wzorcowych można zidentyfikować aktywne procesy destrukcyjne występujące w całej badanej objętości [4]. Klasy sygnałów oraz odpowiadające im symbole i kolory, a także kody zagrożenia przedstawiono w Tabelicy 1.

Porównując pomiary z lat 2006 i 2007, widać, że w obrębie stref od Z-5 do Z-11 nastąpił wzrost sygnałów EA, który zgodnie z przyjętą klasyfikacją oznacza łączenie się istniejących oraz tworzenie się nowych mikropęknięć. W obrębie stref Z-1, Z-2 i Z-6 pojawiły się dodatkowo sygnały klasy 3, co oznacza powstanie rys w strefie rozciąganej betonu. Oznacza to, iż mimo ograniczenia obciążenia użytkowego na obiekcie, procesy destrukcyjne nasiliły się. Wynika to z faktu obserwowanego wzrostu liczby pojazdów poruszających się po wiadukcie oraz z braku płynności ruchu powodującego powstawanie tzw. „korków”. Zalecono wykonywanie przynajmniej raz na miesiąc przeglądu obiektu i w razie stwierdzenia jakichkolwiek zmian zgłoszenia tego faktu odpowiednim organom.

Wyniki badań wykonanych w roku 2008 przedstawiono w Tabelicy 4.

Tabelica 4 Opis rozległości uszkodzeń w prześle 7 wiaduktu w roku 2008

	Klasa Nr 1	Klasa Nr 2	Klasa Nr 3	Klasa Nr 4	Klasa Nr 5	Klasa Nr 6	Klasa Nr 7	Klasa Nr 8
Strefa 1								
Strefa 2								
Strefa 3								
Strefa 4								
Strefa 5								
Strefa 6								
Strefa 7								
Strefa 8								
Strefa 9								
Strefa 10								
Strefa 11								

Na podstawie przeprowadzonej analizy można stwierdzić, że badana belka zawiera liczne mikrouszkodzenia na dużej powierzchni (sygnały klasy 1 i 2). Procesy destrukcyjne są czynne i wywołują coraz szybszą degradację obiektu. W obrębie stref Z-2, Z-4, Z-5 i Z-6 występują sygnały klasy 3, co oznacza powstawanie rys w betonie rozciągany. W strefach Z-4, Z-5 i Z-10 pojawiły się sygnały wyższej klasy – 4 oznaczające rozwój rys. Można więc stwierdzić, że niezbędnym jest jak najszybszy remont obiektu, a do czasu jego wykonania postanowiono ograniczyć dopuszczalną masę całkowitą przejazdu do 8 t.

Wyniki badań wykonanych w roku 2009 przedstawiono w Tabelicy 5.

Tabelica 5. Opis rozległości uszkodzeń w prześle 7 wiaduktu w roku 2009

	Klasa Nr 1	Klasa Nr 2	Klasa Nr 3	Klasa Nr 4	Klasa Nr 5	Klasa Nr 6	Klasa Nr 7	Klasa Nr 8
Strefa 1								
Strefa 2								
Strefa 3								
Strefa 4								
Strefa 5								
Strefa 6								
Strefa 7								
Strefa 8								
Strefa 9								
Strefa 10								
Strefa 11								

Na podstawie przeprowadzonej analizy można stwierdzić, że w badanej belce występują, podobnie jak w roku poprzednim, liczne mikrouszkodzenia na dużej powierzchni, sygnały klasy 1 i 2 występują w strefach od Z1 do Z11. Sygnały klasy 3 i 4, związane z powstawa-

niem i rozwojem rys, spowodowane brakiem szczelnej izolacji i przenikaniem wód w okolicy zakotwienia i trasy kabli sprężających oraz rozwojem już istniejących zarysowań, zarejestrowano w strefach Z-2, Z-4, Z-5 i Z-10. W strefie 5 zarejestrowano sygnały klasy 5 i 6. Badanie prowadzono w czasie zimy (temperatura ok. -15°C). Silne mrozy powodują najczęściej zamarzanie wody w mikrorysach i stąd przyjęto, że pękanie zlodowaciałej wody w wyniku obciążenia pojazdami poruszającymi się po obiekcie było przyczyną wystąpienia sygnałów klasy 5 i 6.

Obniżenie dopuszczalnej masy całkowitej pojazdów poruszających się po obiekcie do 8 ton przyczyniło się w znacznym stopniu do ograniczenia intensywności pojawiania się sygnałów EA generowanych przez różne procesy destrukcyjne. Przy obecnym poziomie natężenia ruchu nie zauważono dalszego pogłębiania się procesów destrukcyjnych w badanym elemencie. Jak wyjaśniono wyżej, silne sygnały w strefie Z-5 są wynikiem zamarzania wody w mikrorysach.

Wyniki badań wykonanych w roku 2010 przedstawiono w Tablicy 6.

Tablica 6 Opis rozległości uszkodzeń w prześle 7 wiaduktu w roku 2010

	Klasa Nr 1	Klasa Nr 2	Klasa Nr 3	Klasa Nr 4	Klasa Nr 5	Klasa Nr 6	Klasa Nr 7	Klasa Nr 8
Strefa 1								
Strefa 2								
Strefa 3								
Strefa 4								
Strefa 5								
Strefa 6								
Strefa 7								
Strefa 8								
Strefa 9								
Strefa 10								
Strefa 11								

Na podstawie przeprowadzonej analizy można stwierdzić, że w badanej belce występują liczne mikrouszkodzenia na całej powierzchni, sygnały klasy 1 i 2 występują we wszystkich strefach tj. od Z-1 do Z-11. Sygnały zakwalifikowane do klasy 3 zarejestrowano w strefach od Z-2 do Z-8, Z-10 i Z11, a sygnały zakwalifikowane do klasy 4 w strefach Z-5, Z-6, Z-8, Z-10 i Z-11.

Nastąpiło dalsze pogłębienie procesów destrukcyjnych: w strefach Z-3, Z-6, Z-7, Z-8 i Z-11 – pojawienie się sygnałów klasy 3 oraz strefach Z-6, Z-8 i Z-11 – pojawienie się sygnałów klasy 4.

Świadczy to o pojawieniu się nowych i rozwoju już istniejących rys, nastąpił dalszy proces degradacji struktury betonu płyty i belek oraz oczepu co na skutek nie wykonywania remontów może doprowadzić do "śmierci technicznej" badanego obiektu.

Zdecydowano o dalszym obniżeniu dopuszczalnej masy całkowitej pojazdów poruszających się po obiekcie do 6 t. Dopuszczenie to jest ważne do kwietnia 2011 r.

4. Wnioski

Obecny stan konstrukcji estakady wynika z daleko posuniętych procesów korozji betonu i stali sprężającej spowodowanych źle wykonaną izolacją w obrębie uciąglenia.

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.

Z punktu widzenia technicznego, obiekt powinien być rozebrany, gdyż remont i wzmocnienie w istniejącym stanie może jedynie przywrócić ograniczoną eksploatację estakad.

Monitorowanie (prowadzenie powtarzalnych, comiesięcznych badań) aktywnych procesów destrukcyjnych, ich intensywności i dynamiki, z wykorzystaniem metody AE, pozwoliło na użytkowanie bezpieczne wiaduktu, pomimo braku wykonania koniecznych prac remontowych. Można więc stwierdzić, że metoda AE pozwala na ocenę zachodzących procesów destrukcyjnych, w tym kumulacji uszkodzeń, w warunkach rzeczywistych obciążeń eksploatacyjnych, co potwierdza jej pełną przydatność do monitorowania obiektów. Metoda ta w pełni pozwala kontrolować i ewentualnie reagować na pojawianie się podczas eksploatacji nowych procesów destrukcyjnych, a także na ocenę wrażliwości obiektu na uszkodzenia i rozległości tych uszkodzeń. Została ona zaakceptowana przez Powiatowy Nadzór Budowlany w Kielcach do monitorowania stanu badanego wiaduktu.

Literatura

1. Flaga K.: „Diagnostyka, modernizacja i rewitalizacja obiektów mostowych z betonu” – 56. Konferencja KILiW PAN i KN PZITB Krynica 2010.
2. Łagoda M.: „Nowoczesne systemy diagnostyki i monitoringu obiektów drogowych w Europie – kierunki rozwoju” – 56. Konferencja KILiW PAN i KN PZITB Krynica 2010.
3. Świt G.: „Metoda emisji akustycznej w analizie uszkodzeń konstrukcji betonowych, wstępnie sprężonych” – Kielce 2008.
4. Świt G.: „Diagnostyka sprężonych konstrukcji betonowych za pomocą emisji akustycznej” – 55. Konferencja KILiW PAN i KN PZITB Krynica 2009.
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. 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.

Pracę wykonano w ramach POIG „Innowacyjne środki i efektywne metody poprawy bezpieczeństwa i trwałości obiektów budowlanych i infrastruktury transportowej w strategii zrównoważonego rozwoju”, temat 6.3.