

Marek Nowak¹
Józef Gawlik²
Jerzy Schmidt³

PRZYDATNOŚĆ METODY EMISJI AKUSTYCZNEJ W OCENIE STANU MOSTÓW KOLEJOWYCH O KONSTRUKCJI STALOWEJ - WYNIKI ZASTOSOWANIA I PROPOZYCJE ROZWOJU

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki prac przeprowadzonych dla sprawdzenia możliwości i opracowania skutecznego sposobu ujawniania, lokalizacji i oceny uszkodzeń korozyjnych metodą emisji akustycznej (AE) na stalowych konstrukcjach mostowych. Przedstawiono również przykłady i ocenę możliwości zastosowania metody AE do identyfikacji uszkodzenia typu pęknięcie bezpośrednio na elementach mostów stalowych. W artykule zawarto także propozycję dalszego rozwoju zastosowania metody AE mającego na celu określanie poziomu obciążenia granicznego bezpiecznej eksploatacji mostu i kontrolowanego czasowego użytkowania obiektu z występującym uszkodzeniem.

Słowa kluczowe: emisja akustyczna, stalowe mosty kolejowe

1. Wprowadzenie

Duże obiekty inżynierskie zbudowane ze stali wymagają zwykle prowadzenia nadzoru bezpieczeństwa ich eksploatacji. W grupie takich obiektów mosty kolejowe, często cechujące się dużą rozpiętością

¹ inż., Politechnika Krakowska, Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji, 31-864 Kraków, Al. Jana Pawła II 37, Polska, nowak@m6.mech.pk.edu.pl

² prof. dr hab. inż., Politechnika Krakowska, Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji, 31-864 Kraków, Al. Jana Pawła II 37, Polska, igawlik@m6.mech.pk.edu.pl

³ dr inż., Politechnika Krakowska, Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji, 31-864 Kraków, Al. Jana Pawła II 37, Polska, schmidt@m6.mech.pk.edu.pl

przesył muszą być poddawane okresowej diagnostyce kwalifikującej ich przydatność do bezpiecznej eksploatacji w warunkach ruchu zestawów kolejowych. W Polsce problem trwałości użytkowej kolejowych konstrukcji mostowych pogłębia długi okres ich eksploatacji i zwykle zwiększony w stosunku do założonego poziom obciążeń eksploatacyjnych. Stan taki sugeruje konieczność stałego dostosowywania metod kontroli do rozwoju nowych technik badawczych zwiększających stopień informacji i poprawności oceny stanu technicznego konstrukcji. Rekomendowane obecnie do wykorzystania klasyczne metody badań nieniszczących nie dają możliwości obserwacji dużych geometrii w warunkach działania obciążenia pracy. Powoduje to słuszne honorowanie znaczenia metod wizualnych we wstępnej ocenie stanu konstrukcji mostowej z koniecznym założeniem ograniczenia pewności oceny dla stref o złożonej geometrii.

Rozwijana w technice badania konstrukcji metoda emisji akustycznej (AE) jest metodą badawczą mogącą stanowić istotne uzupełnienie innych metod nieniszczących, dodatkowo umożliwiającą kontrolę nad rozwojem ujawnionego uszkodzenia. Metoda AE jest już powszechnie stosowana w diagnostyce konstrukcji i obiektów przemysłowych na podstawie opracowanych licznych norm i przepisów branżowych. Skutecznie wykorzystywana jest również w diagnostyce betonowych konstrukcji mostowych. W przypadku kolejowych mostów stalowych problem wykorzystania komplikuje geometryczna i konstrukcyjna złożoność budowy konstrukcji, stanowiąca naturalną przeszkodę w rozchodzeniu się każdego rodzaju fal pochodzących od rozwoju uszkodzenia oraz silny wpływ środowiska przyrody na stan metalu. Jednakże szybki rozwój metody AE możliwy dzięki postępowi w przetwarzaniu danych, spowodował coraz szersze jej stosowanie na świecie w badaniu konstrukcji stalowych.

Pierwsze dokumentowane literaturowo zastosowania metody emisji akustycznej do badania stalowych konstrukcji mostowych wykonane zostały w USA w roku 1971. Zapoczątkowało to kolejne badania wykonane w następnych latach na tego typu konstrukcjach. W literaturze największej liczby przykładów badań mostów stalowych dotyczy obiektów zlokalizowanych w Ameryce Północnej, gdzie metoda AE znalazła najwcześniej swoje praktyczne zastosowanie. Przedstawiane w literaturze zastosowania tej metody w diagnostyce stalowych konstrukcji mostowych stanowią tylko fragmentaryczny wycinek chronionej wiedzy zespołów badawczych.

Wyniki potwierdzające możliwość zastosowania metody AE przedstawiono między innymi w artykule *Acoustic Emission Testing of a Difficult-To-Reach Steel Bridge Detail* (Journal of Acoustic Emission, 2009), gdzie opisano przypadek lokalnego monitoringu uszkodzenia propagującego w kierunku grubości materiału, znajdującego się w trudno dostępnym miejscu, w trakcie normalnej eksploatacji mostu drogowego o dużej rozpiętości w warunkach niekontrolowanego obciążenia.

Skuteczny przykład monitoringu rozwoju pęknięcia metodą AE w konstrukcji stalowej mostu przedstawiono również w wydaniu Springer'a z 2008 roku pt. *Acoustic Emission Testing – Basic for Research – Applications in Civil Engineering*.

Zarówno w opracowanym i wydanym w roku 2008 przez European Commission Joint Research Centre raporcie pt. *Assessment of Existing Steel Structures; Recommendations for Estimation of Remaining Fatigue Life* jak również w artykule *Acoustic emission monitoring of bridges: Review and case study* (Engineering Structures vol.32, 2010), wykazano emisję akustyczną jako jedną z uznanych metod badawczych do badania stalowych konstrukcji mostowych, która może stać się integralną częścią każdego badania stanu technicznego tego typu konstrukcji. Wskazanie jednak zaznacza niezbędność prowadzenia dalszych testów na obiektach rzeczywistych.

Należy zaznaczyć, że specyfika metody AE powoduje, że kluczowym do skutecznej oceny konstrukcji jest posiadanie odpowiedniej bazy danych oraz doświadczeń, które stanowi know-how każdego zespołu badawczego.

Dzięki intensywnemu rozwijaniu w Polsce badań podstawowych już w końcowych latach ubiegłego wieku rozpoczęto prace doświadczalne dla skutecznego wykorzystania metody AE w badaniu stalowych obiektów przemysłowych. Zdobyta wiedza została udokumentowana uzyskaniem przez Laboratorium Badań Stosowanych Politechniki Krakowskiej (LBS PK) uznania Urzędu Dozoru Technicznego. Wykorzystując posiadaną już wiedzę i umiejętność jej zastosowania w ocenie pracujących konstrukcji, wiodące w stosowaniu metody AE w kraju ośrodki, zrealizowały w ramach projektu finansowanego ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego prace badawcze w zakresie -*Opracowanie oraz wstępna weryfikacja procedury diagno-*

zowania metodą emisji akustycznej konstrukcji metalowych ze szczególnym uwzględnieniem mostów stalowych.

Przeprowadzone przez prowadzącą projekt Politechnikę Świętokrzyską badania potwierdziły skuteczną możliwość wykorzystania metody AE w ocenie identyfikacji i stanu typowych uszkodzeń związanych z pękaniem konstrukcji struktury mostu. Wykazano poprawność i skuteczność zastosowania bazy sygnałów wzorcowych opracowanych dla stali stosowanych w budowie konstrukcji do identyfikacji uszkodzenia bezpośrednio na elementach konstrukcji mostu.

Ze względu na brak informacji w tym zakresie w literaturze światowej oraz stan krajowych konstrukcji mostowych szczególną uwagę w realizacji projektu zwrócono na badanie i doświadczenia w zakresie wykrywania i oceny procesu korozji w warunkach użytkowanego obiektu mostowego.

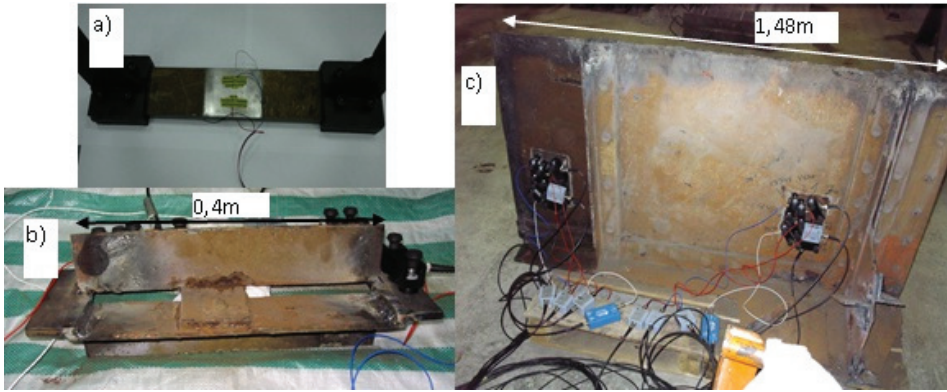
2. Badania doświadczalne

W eksploatowanych w Polsce mostach kolejowych o konstrukcji stalowej istotnym inicjatorem procesu lokalnego uszkodzenia jest proces korozji rozwijający się od stanu równomiernej korozji powierzchniowej do stanu korozji wżerowej. Zjawisko to ma zwykle istotny wpływ na powstanie i rozwój miejscowego procesu pękania i często oba procesy występują współzależnie. Opanowanie umiejętności wykrywania i lokalizacji lokalnie zaawansowanego procesu korozji w geometrycznie złożonej konstrukcji mostowej daje nową, dodatkową informację o stanie konstrukcji mostu.

W tym zakresie Laboratorium Badań Stosowanych PK zrealizowało innowacyjny program doświadczeń mających na celu opracowanie sposobu oceny procesu korozji materiału konstrukcji mostu oraz wykorzystanie uzyskanych wyników do wykrycia i oceny procesu korozji bezpośrednio w warunkach eksploatacji obiektu mostowego. Efekty tych działań zaprezentowane były w referacie *The use of Acoustic Emission metod for detection and location corrosion defects on railway steel bridges* przedstawionym przez zespół Politechniki Krakowskiej na 29 European Conference on Acoustic Emission Testing w roku 2010.

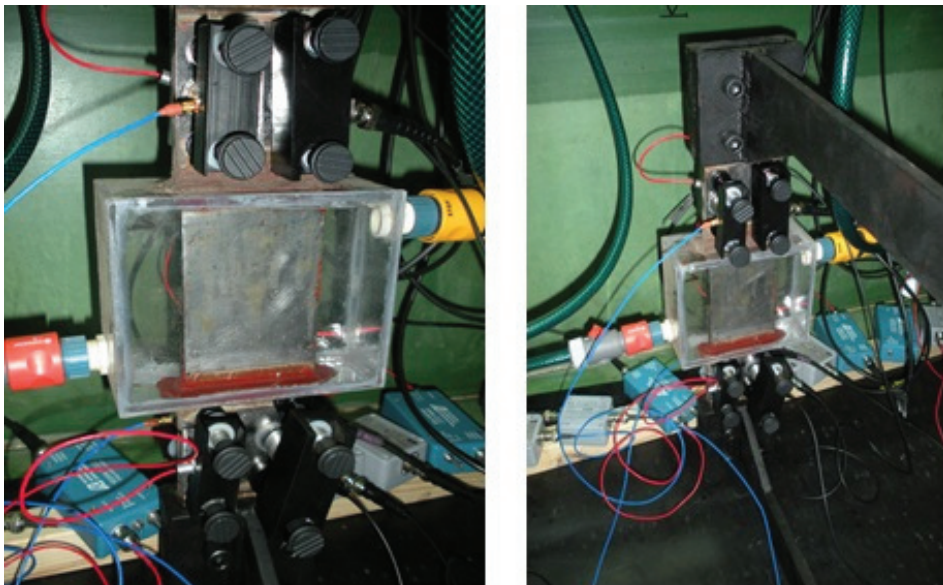
W opracowanym programie doświadczeń w zakresie badań podstawowych wykonano badania laboratoryjne na różnych typach próbek

oraz na elementach mostu kratownicowego (rys. 1.) z występującymi widocznymi uszkodzeniami korozyjnymi. Materiały do badania uzyskano ze złomowanego mostu kolejowego.



Rys. 1. Widok próbek bazowych a) oraz elementów mostu b) i c) do badań laboratoryjnych z zamontowanymi czujnikami AE

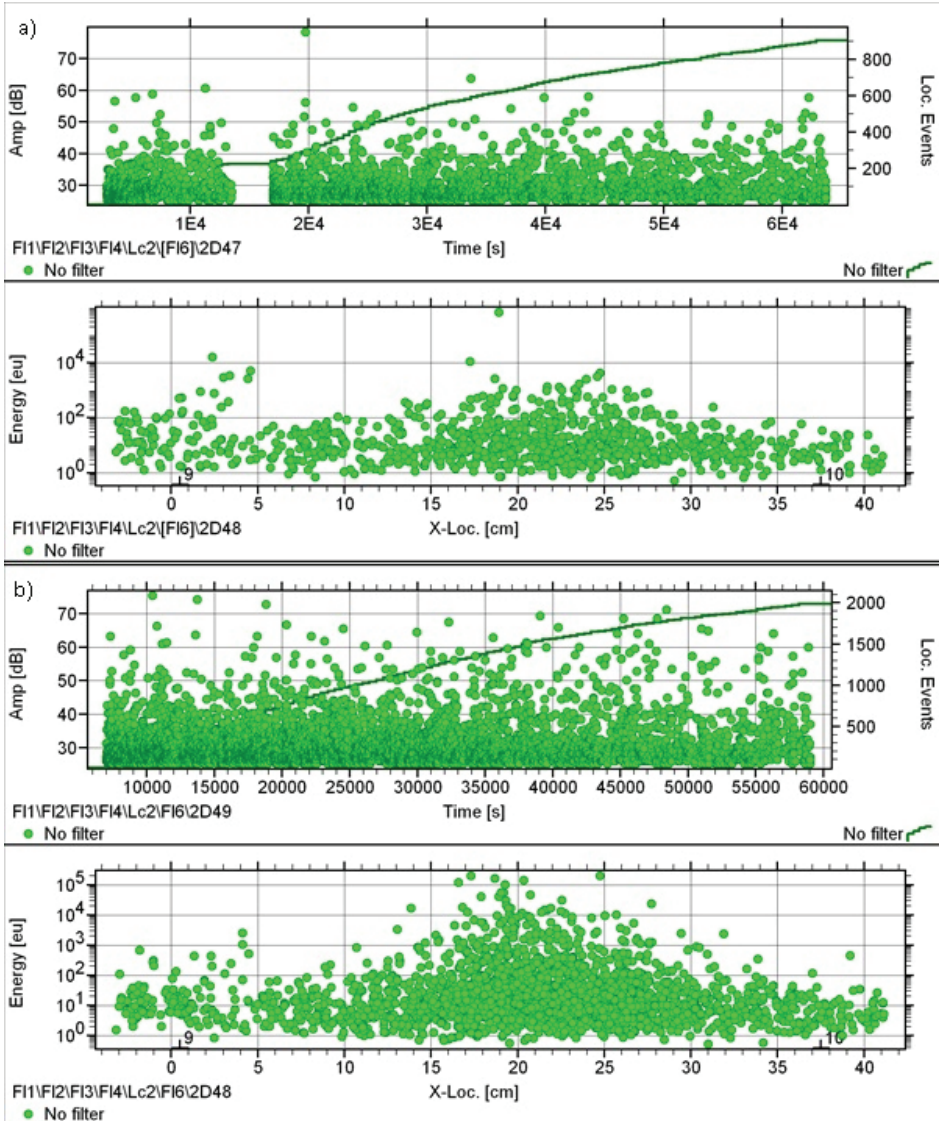
Próbki bazowe poddawane były obciążeniu do różnych wartości, a dla zintensyfikowania procesu korozji wykonano „komory” (rys. 2.) umożliwiające miejscowe długotrwałe działanie środowiska korozyjnego na badane próbki.



Rys.2. Próbką z zamontowanymi czujnikami AE i komorą korozyjną

Pomiary prowadzone były w różnych stanach degradacji korozyjnej próbek, dla różnych warunków obciążeniowych oraz przy zmiennych warunkach środowiskowych.

Badania laboratoryjne prowadzone były również na przedstawionych na rys. 1 elementach mostu kratownicowego z widocznymi uszkodzeniami korozyjnymi.



Rys. 3. Wartości amplitud, energii i ilość zlokalizowanych sygnałów na węzle poddawane działaniu środowiska korozyjnego dla elementu a) bez obciążenia, b) z obciążeniem

Pomiary na małym węźle (rys. 1b) prowadzono zarówno bez obciążenia jak również przy różnych wartościach obciążenia, natomiast pomiary na dużych elementach (rys. 1c) prowadzone były tylko w warunkach bez działania obciążenia, możliwe było natomiast przeprowadzenie prób lokalizacji źródeł korozji przy zastosowaniu aktywatora korozyjnego dla zintensyfikowania procesu korozyjnego.

Obciążanie elementów wykazało wpływ na intensywność rejestrowanych sygnałów, ich amplitudę oraz energię (rys. 3.), dlatego też późniejsze doświadczenia na obiektach rzeczywistych prowadzone były w czasie normalnej pracy obiektu mostowego w warunkach ruchu zestawów kolejowych.

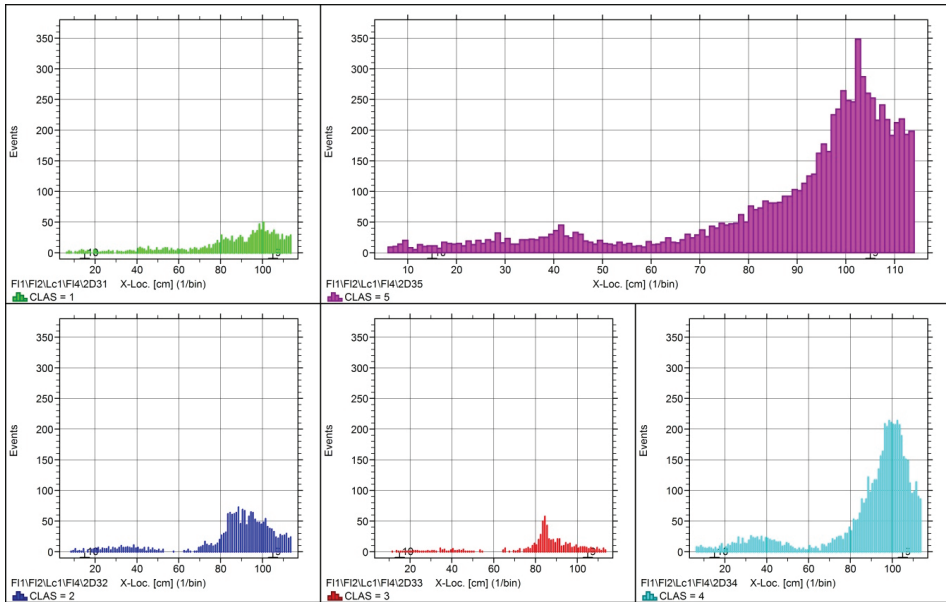
Przeprowadzone badania laboratoryjne miały na celu zebranie charakterystyk częstotliwościowych sygnałów AE pochodzących od uszkodzeń korozyjnych, które następnie analizowano z wykorzystaniem aplikacji VisualClass do częstotliwościowej analizy opartej o metodę wzorców uczących się („Pattern Recognition”) wchodzącej w skład oprogramowania firmowego Vallen. Metoda ta wykorzystuje pełny przebieg i kształt fali AE oraz jej częstotliwości składowe (transformaty Fouriera), amplitudę szczytową, amplitudy składowe, wartość skuteczną sygnału (RMS) i energię sygnału impulsowego, do kojarzenia w indywidualne grupy podobnych przebiegów fal. Zbudowany na tej podstawie klasyfikator, ma na celu wydzielenie sygnałów pochodzących od uszkodzeń od całego szeregu zakłóceń i sygnałów pochodzących od czynników występujących w czasie normalnej eksploatacji, np. procesu tarcia, itp.

Po przeprowadzeniu badań i analiz uzyskano ostatecznie 5 klas sygnałów AE, których aktywność stanowi podstawę do określenia stopnia degradacji korozyjnej materiału. Uwzględniając powyższe przyjęto następującą klasyfikację stopnia korozji:

- stopień I - równomierna korozja powierzchniowa (niski stopień degradacji materiału),
- stopień II - korozja mieszana zaawansowana równomierna powierzchniowa i wyraźna wżerowa (średni stopień degradacji materiału),
- stopień III - korozja wżerowa (wysoki stopień degradacji materiału).

Przykład klasyfikacji sygnałów zarejestrowanych na dużym węźle (rys. 1c) przedstawiono na rysunku 4. Widoczna większa ilość syg-

nałów klas 4 i 5 wskazuje na występowanie źródeł korozyjnych o zaawansowanej korozji powierzchniowej oraz korozji wżerowej.



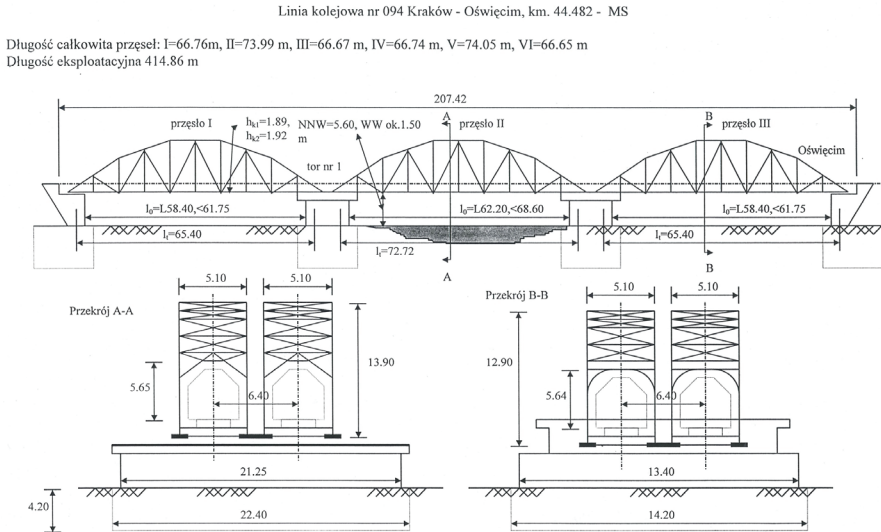
Rys. 4. Lokalizacja źródeł AE dla poszczególnych klas sygnałów wzdłuż dużego węzła

3. Badania na obiektach rzeczywistych

Kolejnym krokiem realizacji projektu były badania na obiektach rzeczywistych, które miały na celu:

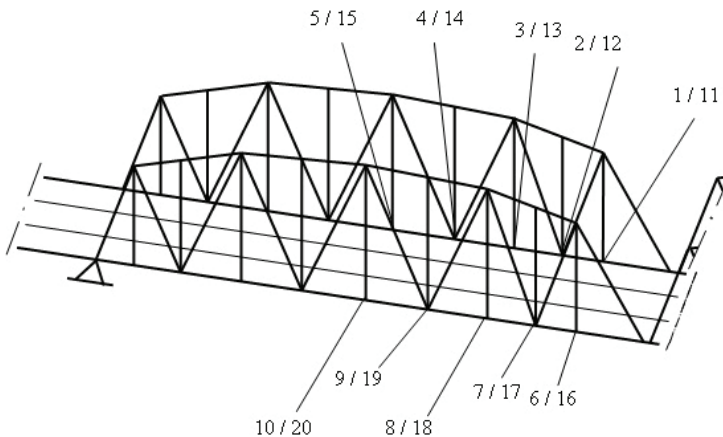
- sprawdzenie możliwości lokalizacji sygnałów pochodzących od uszkodzeń korozyjnych konstrukcji mostu,
- sprawdzenia wpływu stopnia degradacji korozyjnej materiału rzeczywistej konstrukcji na intensywność rejestrowanych sygnałów,
- określenie wpływu obciążania konstrukcji (ruch zestawów kolejowych) oraz zmiennych warunków środowiska przyrody (zmiana temperatury i wilgotności) na rejestrowane sygnały emisji akustycznej (AE),
- sprawdzenie skuteczności wykorzystania opracowanego wcześniej klasyfikatora sygnałów AE do oceny występujących uszkodzeń korozyjnych.

W wyniku podjęcia współpracy i uzyskania pomocy od Dyrekcji PKP Polskich Linii Kolejowych S.A. możliwe było przeprowadzenie doświadczeń na różnych obiektach mostowych. Jednym z obiektów był most kolejowy usytuowanym na trasie Kraków- Oświęcim (rys. 5.).



Rys. 5. Schemat obiektu badań z ogólnymi wymiarami

Ze względu na organizację i cele pomiaru, badaniem objęto połowę jednego z przeseł mostu, rozmieszczając punkty pomiarowe w węzłach konstrukcyjnych według schematu przedstawionego na rysunku 6.



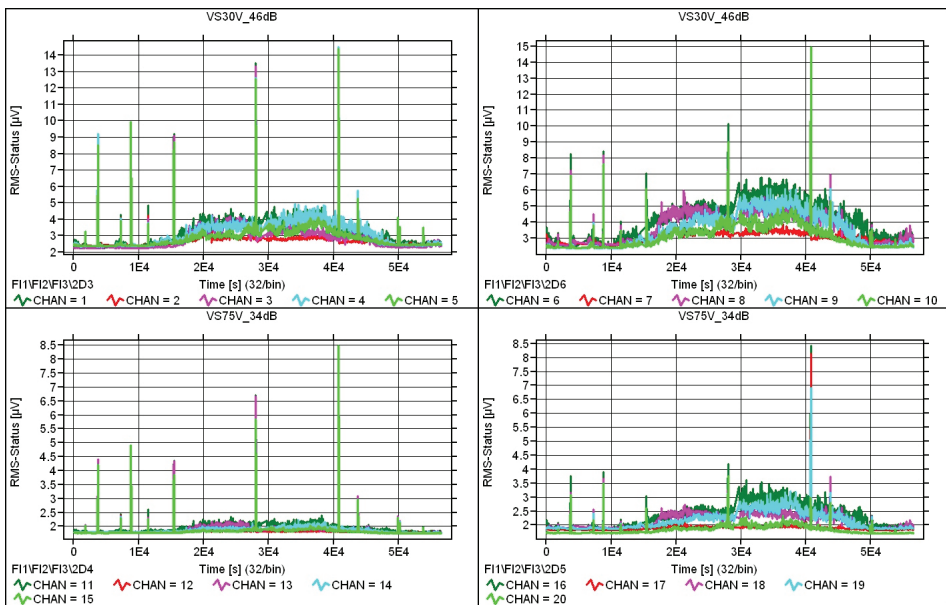
Rys. 6. Schemat rozmieszczenia czujników pomiarowych na badanym przęśle

W przeprowadzonych testach wykorzystywane były czujniki wytypowane na podstawie wcześniej przeprowadzonych badań wstępnych oraz badań laboratoryjnych jako optymalne do rejestracji sygnałów AE pochodzących od uszkodzeń korozyjnych na konstrukcjach mostowych.

Pomiary prowadzone były w normalnych warunkach eksploatacyjnych obiektu w warunkach ruchu zestawów kolejowych i w różnych warunkach środowiska przyrody. W trakcie prowadzenia części pomiarów wykorzystywane były miejscowo aktywatory korozji między innymi w celu sprawdzenia poprawności lokalizacji źródeł AE.

Prowadzone testy miały charakter wielogodzinnych sesji z równoczesnym monitorowaniem warunków środowiska przyrody.

Zapis wartości RMS-Status sygnałów rejestrowanych w czasie trwania jednego z pomiarów uwzględniających zmiany warunków środowiska, występowanie zakłóceń itp. przedstawiono na rysunku 7.

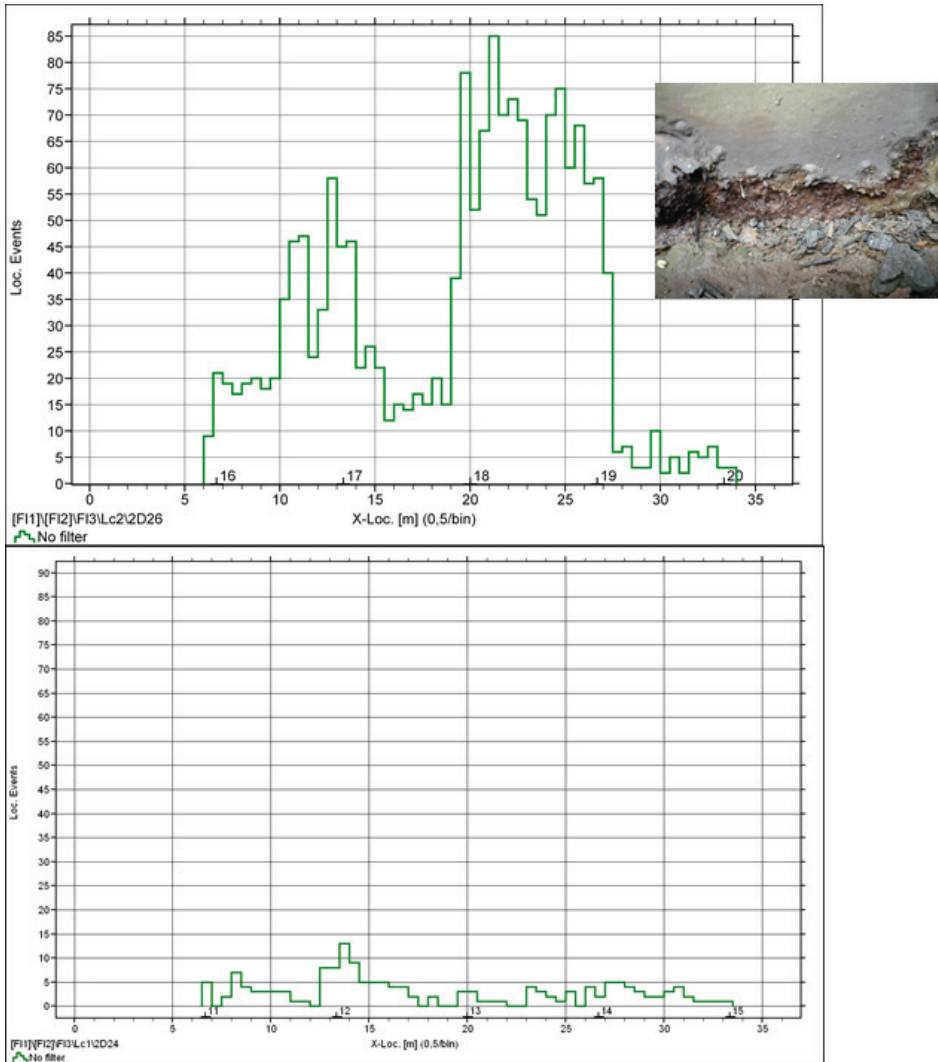


Rys. 7. Wartości RMS – Status [µV] dla poszczególnych kanałów pomiarowych w czasie trwania pomiaru (Time [s])

Widoczne na wykresach gwałtowne krótkotrwałe zmiany wartości RMS-Status dokumentują występowanie zakłóceń najczęściej spowodowanych ruchem zestawów kolejowych.

Badania na obiektach rzeczywistych potwierdziły możliwości lokalizacji źródeł AE pochodzących z uszkodzeń korozyjnych z wykorzystania

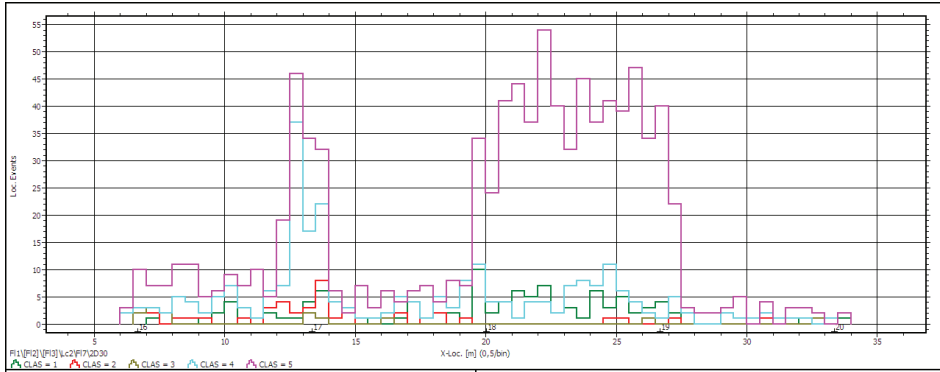
niem algorytmów do lokalizacji liniowej. Przykład lokalizacji źródeł AE wzdłuż długości przęsła przedstawiono na rysunku 8, gdzie widoczne jest również uszkodzenie korozyjne wykazane w czasie badania wizualnego.



Rys. 8. Lokalizacja źródeł AE (Loc.Events) wzdłuż przęsła mostu (X-Loc [m]) oraz widok uszkodzenia korozyjnego

Istotnym celem badania na obiekcie mostowym było sprawdzenie możliwości wykorzystania klasyfikatora sygnałów AE utworzonego na podstawie wcześniejszych badań. Wynik zastosowania klasyfikatora przedstawiono na rysunku 9, gdzie podzielone zostały zlokalizowany

sygnały AE do jednej z pięciu klas. W miejscach o podwyższonej aktywności stwierdzono występowanie sygnałów klasy 4 i 5, które odpowiadały uszkodzeniom korozyjnym o charakterze zaawansowanej korozji powierzchniowej oraz korozji wżerowej.



Rys. 9. Lokalizacja źródeł AE wzdłuż przęsła VI z uwzględnieniem klas z aplikacji VisualClass

4. Ocena wyników oraz kierunki rozwoju

Przeprowadzona ocena dostępnych informacji oraz analiza literatury przedmiotu połączona z wynikami przeprowadzonych w kraju doświadczeń potwierdzają możliwość skutecznego wykorzystania metody AE w ocenie stanu krytycznych stref mostów kolejowych o konstrukcji stalowej.

Na przykładzie wyników badań wybranych obszarów konstrukcji mostów udowodniono możliwość wykrywania i identyfikacji uszkodzeń zarówno o charakterze korozji jak i uszkodzeń typu pęknięcie diagnozowanych w warunkach eksploatacji obiektu mostowego.

Doświadczenia udowodniły celowość wykorzystania metody AE dla lokalizacji aktywnego uszkodzenia geometrycznie skomplikowanych konstrukcji mostowych, umożliwiając w dalszym działaniu możliwość zastosowania innych metod nieniszczących celem określenia geometrii uszkodzenia.

Uzyskana wiedza podczas realizowanych doświadczeń w ramach projektu *Opracowanie oraz wstępna weryfikacja procedury diagnozowania metodą emisji akustycznej konstrukcji metalowych ze szczególnym uwzględnieniem mostów stalowych* daje podstawy do podjęcia dalszych prac mających na celu rozwój i wdrożenie metody AE dla

określania poziomu obciążenia granicznego bezpiecznej eksploatacji mostu i kontrolowanego czasowego użytkowania obiektu.

Cel taki wymaga zrealizowania dodatkowych badań w warunkach laboratorium z następnym przeniesieniem wyników do testowania na różnych mostach w warunkach ruchu zestawów kolejowych. Wykorzystując posiadaną już w tym zakresie wiedzę zaproponowano przy współpracy z PKP Polskimi Liniami Kolejowymi S.A. realizację prac, dla opracowania skutecznego sposobu monitorowania eksploatacji nośnych elementów mostów z uszkodzeniem.

Proponowany w realizacji pracy rozwój metody AE wymaga niestandardowego zaawansowanego sposobu wykorzystania analizy i monitorowania procesu rozwoju pęknięcia zmęczeniowego struktury mostu w warunkach działania środowiska korozji oraz przypadek działania krytycznego uszkodzenia korozyjnego.

Dla uzyskania celu, konieczne będzie zbudowanie nowej bazy danych uzyskanych w wyniku pomiarów prowadzonych w laboratorium i podczas testów prowadzonych na obiektach rzeczywistych. Baza ta będzie uzupełniona posiadaną już bazą danych opracowanych na podstawie wykonanych pomiarów środowiskowych.

Proponowany system AE dedykowany będzie badaniu nośnych stref mostów kolejowych eksploatowanych z podejrzeniem lub stwierdzonym wystąpieniem niebezpiecznego uszkodzenia struktury. Zastosowanie metody AE na tym poziomie wiedzy będzie pomocne w wykryciu i lokalizacji uszkodzenia działającego w trudno dostępnych miejscach konstrukcji mostu, szczególnie w węzłach składających się z kilku elementów o utrudnionej wizualnej ocenie stanu materiału.

Bibliografia

- [1] Kosnik D.E.: *Acoustic Emission Testing of a Difficult-To-Reach Steel Bridge Detail*. Journal of Acoustic Emission, vol. 27, 2009.
- [2] Nowak M., Baran I., Schmidt J.: *The use of Acoustic Emission method for detection and location corrosion defects on railway steel bridges*. 29 European Conference on Acoustic Emission Testing, 2010.

- [3] Gołaski L., Goszczyńska B., Świt G., Trampeczyński W.: *Zastosowanie metody emisji akustycznej do identyfikacji procesów niszczenia w konstrukcjach stalowych.*
- [4] Hay R.D., Cavaco J.A., Mustafa V.: *Monitoring the civil infrastructure with acoustic emission: bridge case studies.*
- [5] Archana Nair, Cai C.S.: *Acoustic emission monitoring of bridges: Review and case study*, Engineering Structures vol.32, 2010.
- [6] Shigeishi M.: *Acoustic Emission Testing – Basic for Research – Applications in Civil Engineering*, Springer, 2008.
- [7] Sedlacek G., Bijlaard F., Geradin M., Pinto A., Dimova S.: *Assessment of Existing Steel Structures; Recommendations for Estimation of Remaining Fatigue Life*. Raport European Commission Join Research Centre, 2008.

USEFULNESS OF THE ACOUSTIC EMISSION METHOD IN THE ASSESSMENT OF STEEL RAILWAY BRIDGES - THE RESULTS AND DEVELOPMENT PROPOSALS

Summary

The results of works for elaboration an efficient way to reveal, locate and estimate corrosion damages using acoustic emission (AE) method at steel bridge constructions have been presented in the paper. The examples and assessment of AE method application to identification damages like cracks directly on steel bridges elements have been also presented. The proposals for AE method application development to define the level of admissible load in bridge safety exploitation and time controlled usage of the object with an emerging damage have been given.

Keywords: *acoustic emission, railway steel bridges*