

EMISJA AKUSTYCZNA W ZASTOSOWANIU DO BADANIA STALOWEGO MOSTU KOLEJOWEGO Z USZKODZENIAMI¹

Marek Nowak

mgr inż., Politechnika Krakowska, Al. Jana Pawła II
37, 31-864 Kraków, tel. +48 12 374 3745, e-mail: no-
wak@mech.pk.edu.pl

Igor Lyasota

dr inż. Politechnika Krakowska, Al. Jana Pawła II 37,
31-864 Kraków, tel. +48 12 374 3267, e-mail: igor.ly-
asota@mech.pk.edu.pl

***Streszczenie.** Konstrukcje mostowe eksploatowane są w warunkach działania zmiennego środowiska atmosferycznego, co powoduje stałą degradację materiałów wykorzystanych do ich budowy. Istotne niebezpieczeństwo awarii w eksploatacji konstrukcji mostowych powoduje potrzebę usystematyzowania i rozszerzenia stosowanych procedur oceny związanych z postępem nowoczesnych metod badawczych. Dla wdrożenia nowego skutecznego sposobu opartego o system procedur wykorzystujących metodę emisji akustycznej (acoustic emission - AE), a opracowanych dla monitorowania i określenia bezpiecznych warunków eksploatacji nośnych elementów mostów z uszkodzeniem, zorganizowane zostało konsorcjum złożone z Politechniki Krakowskiej oraz właściciela linii i mostów kolejowych, przedsiębiorstwo PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. Konsorcjum to realizuje wspólnie projekt w ramach Programu Badań Stosowanych finansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. Jednym z etapów realizacji projektu były badania na konstrukcji mostowej z uszkodzeniem o różnej wielkości ubytku materiału. Dla przedmiotowej konstrukcji kratownicowej wykonano obliczenia numeryczne oraz szereg pomiarów z rejestracją sygnałów emisji akustycznej. Badania wykonano przy kontrolowanym ruchu zestawów kolejowych o różnym obciążeniu i różnej prędkości przejazdu zestawu kolejowego. Wyniki obliczeń, analiz, korelacji sygnałów AE i obciążenia, a także badań laboratoryjnych niezbędnych dla przeprowadzonych analiz zostały przedstawione w artykule.*

***Słowa kluczowe:** emisja akustyczna, stalowe mosty kolejowe, degradacja materiału*

1. Wstęp

W państwach Unii Europejskiej jest użytkowanych około 250 000 kolejowych obiektów inżynierskich [1]. W warunkach polskich głównym zarządcą infrastruktury kolejowej jest spółka PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., która zarządza ponad 3500 obiektami mostowymi o łącznej długości ponad 130 000 metrów, z czego znaczny odsetek, bo około 37%, stanowią konstrukcje z przęsłami stalowymi [2].

Konstrukcje mostowe eksploatowane są w warunkach działania zmiennego środowiska atmosferycznego, a także drgań i zmiennych naprężeń eksploatacyj-

¹ Wkład autorów w publikację: Nowak M. 50%, Lyasota I. 50%

nych wywołanych przejazdem zestawów kolejowych, co powoduje stałą degradację materiałów. Negatywny wpływ środowiska ma szczególnie duże znaczenie właśnie dla konstrukcji stalowych. Jednocześnie długoletnia eksploatacja konstrukcji mostowych eksploatowanych w Polsce powoduje, że często obiekty te są w złym stanie technicznym, gdyż ich wiek jest zbliżony lub przekracza zakładany w trakcie projektowania okres trwałości.

Istotne niebezpieczeństwo awarii w eksploatacji konstrukcji mostowych powoduje potrzebę usystematyzowania i rozszerzania stosowanych procedur oceny związanych z postępowaniem nowoczesnych metod badawczych.

Na podstawie opracowanego i wydanego w roku 2008 przez European Commission Joint Research Centre raportu [3] jedną z uznanych metod badawczych, która może być wykorzystywana do oceny stanu technicznego tego typu konstrukcji jest metoda emisji akustycznej (AE).

Dla wdrożenia nowego skutecznego sposobu opartego o system procedur wykorzystujących metodę AE, a opracowanych dla monitorowania i określenia bezpiecznych warunków eksploatacji nośnych elementów mostów z uszkodzeniem, zorganizowane zostało konsorcjum złożone z Politechniki Krakowskiej oraz właściciela linii i mostów kolejowych, przedsiębiorstwo PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. Konsorcjum to realizuje wspólnie projekt w ramach Programu Badań Stosowanych finansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. Jednym z etapów realizacji projektu były badania przedstawione w niniejszym artykule.

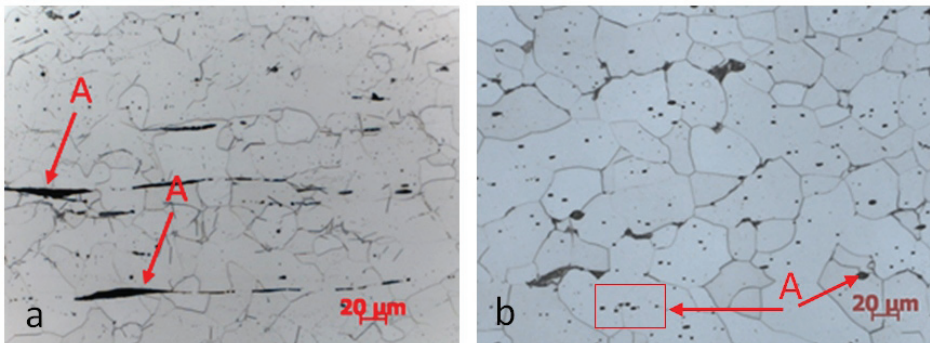
2. Badania laboratoryjne

Dla zrealizowania badań laboratoryjnych, skierowanych na opracowanie metodyki diagnostycznej, pozyskano elementy konstrukcji stalowego mostu eksploatowanego od początku XX wieku. Dla scharakteryzowania ww. materiału (dalej materiał I) przeprowadzono badanie składu chemicznego. Badanie takie wykonano również w późniejszym etapie realizacji projektu dla wycinka pobranego z eksploatowanego mostu (materiał II) będącego przedmiotem badań na obiekcie rzeczywistym. Skład chemiczny obu stali, jak również dane literaturowe zawartości pierwiastków w stali zlewnej wykorzystywanej na początku XX wieku do budowy konstrukcji mostowych przedstawiono w tab. 1.

Tabela 1. Skład chemiczny badanych stali oraz dane literaturowe [4]

Material	Pierwiastki chemiczne							
	C	Mn	S	P	Cu	Cr	Ni	Si
I	0,054	0,37	0,029	0,05	0,20	-	0,15	0,002
II	0,05	0,50	0,023	0,04	0,04	0,02	0,05	0,02
Stal zlewna	0,03-0,35	0,04-0,75	0,004-0,16	0,004-0,16	0,11-0,14	0,007-0,014	0,03-0,04	śladowa-0,18

Kolejnym etapem dla scharakteryzowania badanych materiałów było wykonanie badań metalograficznych struktury materiału. Przykładowe zdjęcia przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Mikrostruktura stali, powiększenie 500 razy: a – materiał I, b – materiał II

W trakcie obserwacji mikroskopowych, przeprowadzonych z użyciem optycznej mikroskopii świetlnej, stwierdzono, że obydwa materiały (materiał I i II) zawierają dużą ilość wtrąceń niemetalicznych o kształtach globularnym i wyciągniętym wzdłuż kierunku walcowania stalowego profilu (oznaczono literą A na rys. 1). Dodatkowe badania metalograficzne, przeprowadzone z wykorzystaniem SEM, wykazały, że wtrącenia te, to głównie związki siarki (MnS, FeS) oraz krzemiany.

Mikrostruktura obu materiałów, ze względu na niską zawartość węgla (ok. 0,05% C), jest ferrytyczną z nieznacznym udziałem perlitu, który rozmieszczony jest głównie na granicach ziaren. Badania metalograficzne materiałów I i II, wykonane za pomocą SEM, wykazały postępujące procesy starzenia się ich mikrostruktur, polegające na wydzieleniu się węglików i azotków w środku ziaren ferrytu. W obydwu przypadkach na granicach ziaren ferrytu zaobserwowano wtrącenia cementytu Fe_3C_{III} .

Badania składu chemicznego oraz badania struktury wykazały podobieństwa obydwu materiałów oraz przynależność do grupy materiałów wykorzystywanych do budowy konstrukcji mostowych na początku XX wieku.

3. Badania laboratoryjne na próbkach wzorcowych

Dla wyznaczenia charakterystyk emisyjnych materiału pozyskanego z konstrukcji mostowej wykonano pomiary emisji akustycznej w warunkach laboratoryjnych. Jednym z badań była statyczna próba rozciągania. Badania wykonano na maszynie wytrzymałościowej Zwick/Roell Z100 z wykorzystaniem uchwytów hydraulicznych. Do rejestracji sygnałów AE wykorzystano dwa typy czujników VS75-V i VS150-M o częstotliwościach rezonansowych odpowiednio 75 kHz i 150 kHz, przedwzmacniacze zewnętrzne AEP4 ze wzmocnieniem 34 dB oraz

system pomiarowy Vallen AMSY6. Badania wykonano na próbkach płaskich, na których montowano po dwa czujniki każdego typu. Dla rejestracji wartości siły oraz przemieszczenia w systemie AMSY6 użyto kanałów parametrycznych połączonych z wyjściowymi kanałami parametrycznymi maszyny wytrzymałościowej.

Konstrukcje mostowe bardzo często posiadają liczne uszkodzenia korozyjne, które mogą mieć wpływ na generowane sygnały emisji akustycznej, dlatego też, pomiary przeprowadzono na próbkach dwóch typów: A – bazowych o stanie powierzchni wymaganej normą [5] (materiał IA) oraz B – wyciętych z elementów z licznymi uszkodzeniami korozyjnymi (materiał IB). Próbki te zostały przygotowane w taki sposób, aby ich część pomiarowa posiadała naturalne uszkodzenia korozyjne wraz z produktami korozyjnymi.

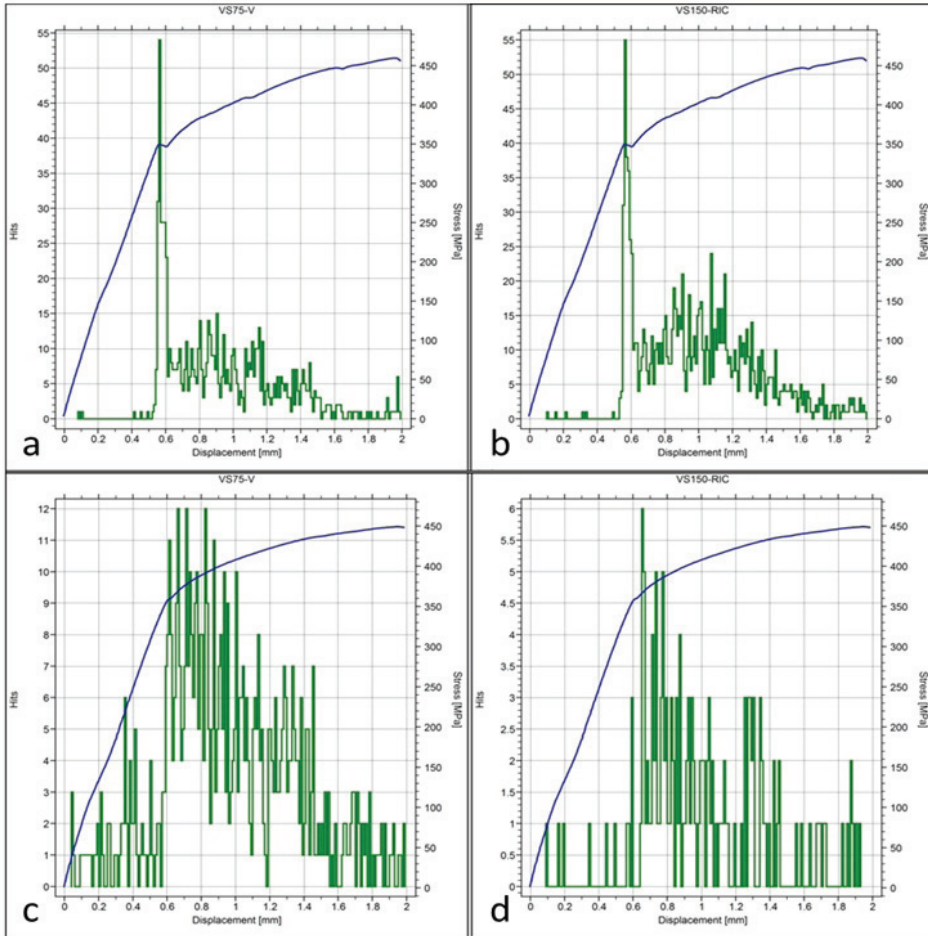
W trakcie statycznej próby rozciągania rejestrowano sygnały generowane przez materiał, a dodatkowo, w trakcie obciążania próbek z uszkodzeniami korozyjnymi, rejestrowano sygnały pochodzące od tarcia, pęknięcia i odpajania się produktów korozji. Procesy takie występują również podczas obciążania rzeczywistych konstrukcji z tego typu uszkodzeniami i zalegającymi produktami korozyjnymi.

Na rysunku 2 przedstawiono przykładowe wykresy rozciągania oraz intensywność dla obu typów czujników AE dla reprezentatywnych próbek typu IA i IB. Pokazano fragmenty wykresów obejmujące zakres przemieszczenia trawersy do 2 mm, ponieważ część ta jest najbardziej interesująca z punktu widzenia diagnostyki konstrukcji. Wyeliminowany fragment, charakteryzujący zakrytyczne stadium procesu zniszczenia, znajduje się poza zakresem badań NDT, gdyż ich głównym celem jest zapobieganie utracie stateczności elementu konstrukcji.

Analiza otrzymanych wyników wykazała istotne różnice w charakterze generowania sygnałów AE podczas rozciągania próbek poszczególnych typów. Jediną wspólną cechą dla badanych próbek był wyraźny pik maksymalnej aktywności AE w momencie przejścia od sprężystej pracy materiału do powstania odkształceń plastycznych.

W trakcie rozciągania materiału IA zarejestrowano największą aktywność zlokalizowanych sygnałów AE (54 hits/sek (zdarzeń/sek) – czujniki VS75-V, 55 hits/sek (zdarzeń/sek) – czujniki VS150-M). W tym przypadku czujniki typu VS75-V zlokalizowały ok. $880 \div 900$ sygnałów, a czujniki typu VS150-M odpowiednio – ok. $1350 \div 1400$ sygnałów.

Aktywność AE w czasie rozciągania próbek materiału IB wynosiła na poziomie 12 hits/sek przy ogólnej liczbie $760 \div 780$ zlokalizowanych sygnałów dla VS75-V i 6 hits/sek oraz $200 \div 220$ zlokalizowanych sygnałów dla VS150-M. Warto zaznaczyć duże różnice w ilościach zlokalizowanych sygnałów dla poszczególnych materiałów, jak również fakt, że dla materiału IA większą ilość sygnałów AE rejestrowały czujniki o wyższym zakresie częstotliwości – 150 kHz, natomiast podczas rozciągania próbek z produktami korozji (materiał IB) zaobserwowano efekt odwrotny, tzn. więcej sygnałów rejestrowały czujniki o częstotliwości rezonansowej 75 kHz.



Rys. 2. Aktywność emisyjna oraz wykres rozciągania dla próbek materiału IA (a, b) oraz IB (c, d); wykresy: a, c – czujniki VS75-V oraz b, d – VS 150-M

Prawdopodobnie spowodowane jest to faktem, że w procesie rozciągania próbek materiału IA źródłami AE są głównie procesy odkształcenia oraz zniszczenia składników mikrostruktury stali, a przy rozciąganiu próbek materiału IB występują dodatkowe źródła AE, tzn. tarcie, odspojenie oraz pęknięcie produktów korozji.

4. Badania konstrukcji mostowej

4.1. Obiekt i metodyka badań

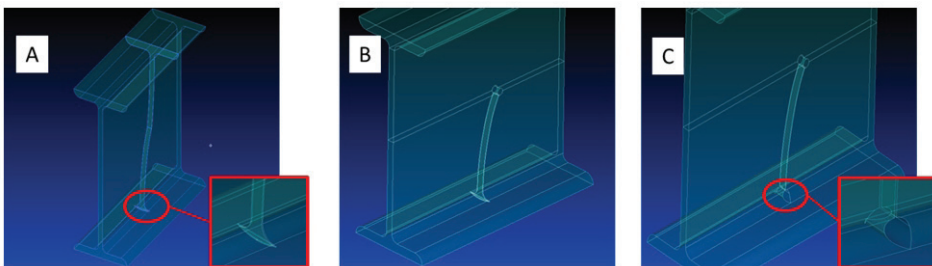
Jednym z obiektów mostowych, na którym prowadzone były badania z wykorzystaniem metody AE, był stalowy most o konstrukcji rusztowej o długości

13,5 m, eksploatowany od 1915 roku. Cały obiekt posiadał liczne uszkodzenia korozyjne, a dodatkowo w jednej podłużnicy występowało pęknięcie obejmujące około 75% przekroju dwuteowej belki. Widok konstrukcji mostu oraz widok nieciągłości przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Widok mostu oraz nieciągłości w podłużnicy

Badania z rejestracją sygnałów AE wykonywane były przy kontrolowanym obciążaniu konstrukcji poprzez przejazd lokomotywy spalinowej Fablok 401Da-466 z wagonami towarowymi o różnej masie. W trakcie realizacji kolejnych sesji pomiarowych, zgodnie z opracowanym programem, uszkodzenie typu pęknięcie było poddawane stopniowo naprawie, jak również wykonano działanie mające na celu zatrzymanie rozwoju istniejącego pęknięcia poprzez wykonanie otworu w wierzchołku. Zrealizowano pomiary dla różnych wielkości uszkodzenia. Uszkodzenie oznaczone jako A charakteryzowało się nieciągłością obejmującą około 75% przekroju podłużnicy, B – nieciągłość wynosząca około 25% przekroju, C – nieciągłość wynosząca około 25% przekroju zakończona otworem w wierzchołku pęknięcia. Schematycznie uszkodzenia jako geometryczne modele elementu belki do obliczeń MES (Finite Element Method) przedstawiono na rys. 4. Dla każdego typu uszkodzenia pojedyncza sesja pomiarowa obejmowała jednakową ilość przejazdów składu po obiekcie z różnymi prędkościami. Wykonano po kilka sesji pomiarowych, a w artykule przedstawiono wyniki reprezentatywne.



Rys. 4. Schemat uszkodzeń podłużnicy mostu poddawanego badaniom AE

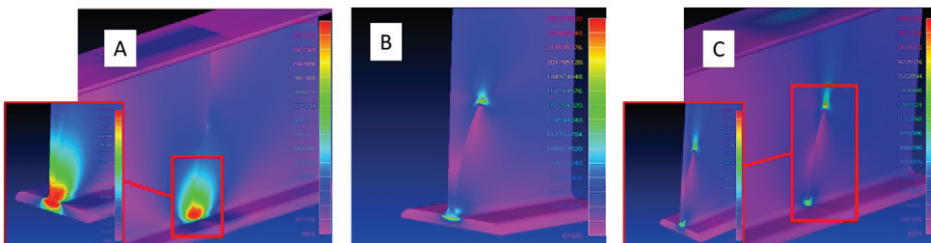
Do badania konstrukcji wykorzystano dwa typy czujników (75 kHz i 150 kHz) rozmieszczone w węzłach konstrukcyjnych mostu. Dla potrzeb dalszych analiz, w strefie pęknięcia zamontowano dodatkowe czujniki AE, tensometry do pomiarów odkształceń oraz ekstensometr rejestrujący rozwarcie pęknięcia połączony z systemem pomiarowym AE, jako wejście kanału parametrycznego. W czasie obciążania mostu rejestrowane były również ugięcia mostu w różnych punktach pomiarowych z wykorzystaniem potencjometrycznych czujników przemieszczeń o skoku 100mm.

4.2. Obliczenia numeryczne pola naprężeń welemencie mostu z uszkodzeniem

Pomiary tensometryczne, pomiary ugięć konstrukcji oraz wyznaczone własności materiałowe posłużyły do obliczeń MES, mających na celu wyznaczenie rzeczywistego obciążenia od lokomotywy w miejscu pęknięcia konstrukcji, a następnie do wyznaczenia pola naprężeń w strefie pęknięciapodłużnicy.

Na rysunku 5 przedstawiono przykładowe wyniki obliczeń MES dla poszczególnych typów uszkodzeń.

Dla każdego typu uszkodzenia (A ÷ C) stworzono obliczeniowy model trójwymiarowy, w których użyto tetragonalnych elementów skończonych o różnych wymiarach. W obszarze otworów siatka elementów została zagęszczona w celu zwiększenia dokładności obliczeń w danych strefach.



Rys. 5. Pole naprężeń Hubera-Misesa w strefie uszkodzeń typu A, B i C

Dla uszkodzenia typu A przedstawiono rozkład naprężeń Hubera-Misesa w całej strefie uszkodzenia oraz powiększony obszar wierzchołka pęknięcia (rys. 5). Maksymalne wartości w tym przypadku skoncentrowane w wierzchołku pęknięcia osiągają wartości około 270 MPa. Zbliżone są one do wartości granicy plastyczności materiału podłużnicy. Naprężenia Hubera-Misesa w strefie uszkodzenia typu B są mniejsze i osiągają wartości około 200 MPa. Wykonanie otworu w wierzchołku pęknięcia (uszkodzenie typu C) spowodowało duży spadek koncentracji pola naprężeń do wartości ok. 130 ÷ 140 MPa. Działanie takie często wykorzystywane jest jako działanie naprawcze i ma na celu powstrzymanie rozwoju uszkodzenia.

4.3. Wyniki badań AE

Analiza otrzymanych wyników wykazała istotne różnice w ilości generowanych sygnałów AE podczas obciążania konstrukcji mostowej z poszczególnymi typami uszkodzeń podłużnicy.

W trakcie obciążania konstrukcji z uszkodzeniem typu A (nieciągłość około 75% przekroju podłużnicy) maksymalna intensywność lokalizowanych zdarzeń wynosiła 10 zdarzeń/sek. W strefie pęknięcia lokalizowano około 650 ÷ 700 sygnałów AE dla pojedynczych sesji, a ich największa ilość zlokalizowana była w środkowej części uszkodzenia. Wartości amplitud zlokalizowanych sygnałów mieściły się w zakresie 40 ÷ 65 dB (maks. 75 dB), a energie tych sygnałów w zakresie 20 ÷ 10000 eu (maks. 100000 eu), gdzie jednostką energii jest $1\text{eu} = 1\text{E}^{-14}\text{V}^2\text{s}$.

Dla uszkodzenia typu B (nieciągłość materiału około 25% przekroju) maksymalna ilość lokalizowanych zdarzeń nie przekraczała 5 hits/sek, przy całościowej liczbie 130 ÷ 140 hits dla pojedynczej sesji obciążeniowej. Sygnały lokalizowały się równomiernie wzdłuż całego uszkodzenia, ze zwiększoną ilością w wierzchołku pęknięcia. Amplituda i energia rejestrowanych sygnałów wynosiła odpowiednio 40 ÷ 60 dB (maks. 70 dB), oraz 50 ÷ 1600 eu (maks. 38500 eu).

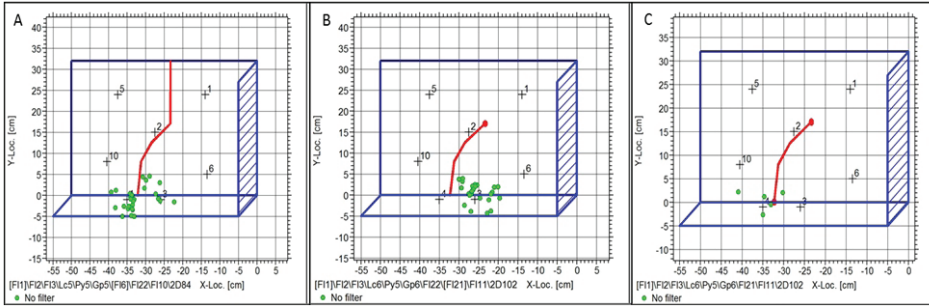
Najmniejszą aktywność i ilość zlokalizowanych sygnałów zarejestrowano przy obciążaniu konstrukcji z uszkodzeniem typu C (brak ciągłości materiału wynoszący około 25% przekroju, zakończony otworem w wierzchołku pęknięcia). Wartości dla pojedynczych sesji i czujników 150 kHz wynosiły odpowiednio: aktywność – 2 hits/sek i łączna liczba 60 ÷ 65 hits, amplituda rejestrowanych sygnałów wynosiła 40 ÷ 60 dB (maks. 75 dB), a energia 500 ÷ 2200 eu (maks. 29000 eu).

Kolejnym krokiem analizy zarejestrowanych sygnałów było wydzielenie sygnałów lokalizowanych w strefie wierzchołka pęknięcia (rys. 6).

W przypadku obciążania konstrukcji z uszkodzeniem typu A i B, łączne ilości zlokalizowanych sygnałów dla poszczególnych sesji były podobne i wynosiły około 25 ÷ 30 hits/sesje.

Różniły się natomiast wartości amplitud i energii dla obciążania konstrukcji z poszczególnymi uszkodzeniami. W przypadku uszkodzenia typu A, gdzie wartości naprężeń w wierzchołku pęknięcia były wyższe, amplitudy rejestrowanych sygnałów osiągały wartość 55 dB, a energia 1000 eu, natomiast dla uszkodzenia typu B (niższy poziom naprężeń Hubera-Misesa) wartości te wynosiły odpowiednio 50 dB i 260 eu.

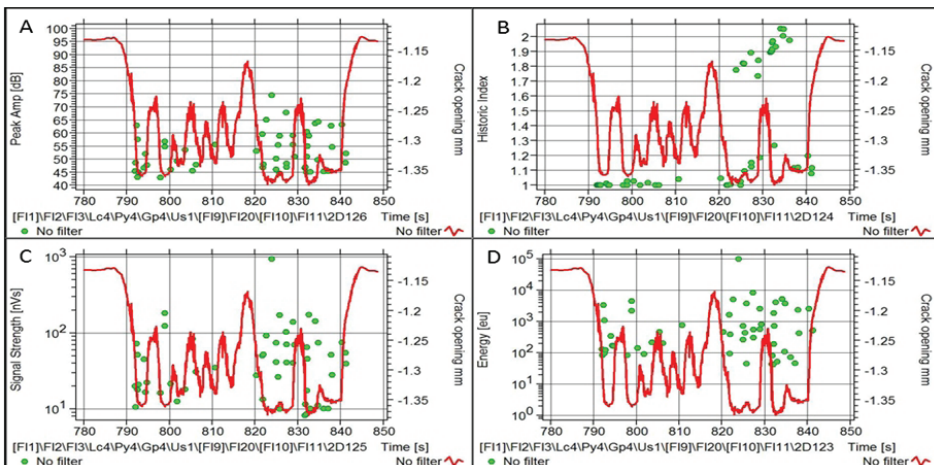
Stwierdzono, że wykonanie okrągłego otworu w wierzchołku pęknięcia skutkowało znacznym zmniejszeniem wartości naprężeń w tej strefie (rys. 4c), co przyczyniło się do obniżenia aktywności generowania sygnałów AE do wartości około 5 hits/sesje. Lokalizacje sygnałów dla poszczególnych typów uszkodzeń w strefie wierzchołka pęknięcia przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Lokalizacje sygnałów AE w strefie wierzchołka pęknięcia dla uszkodzeń A, B i C

W trakcie wykonania badań metodą AE realizowano również pomiar przemieszczeń brzegów pęknięcia za pomocą zamontowanego ekstensometru, umieszczonego poprzecznie do pęknięcia w środkowej jego części. Służył on również, jako sygnał wejściowy do kanału parametrycznego systemu pomiarowego AE. Umożliwiało to korelację zarejestrowanych sygnałów AE z występującym obciążeniem strefy uszkodzenia. Na rys. 7. przedstawiono przykładowy wykres obrazujący wpływ masy przejeżdżającego składu (wielkość pęknięcia) na rejestrowane sygnały AE. Otrzymane wyniki wskazały, że w badanym przypadku wzrost obciążenia powodował zmniejszenie się wartości rozwarcia szczeliny pęknięcia – zamykanie się szczeliny (mechanizm ścinania w wierzchołku pęknięcia). Na rysunku przedstawiono również wartości amplitud, energii, signal strength, a także parametru Historic Index w korelacji z wielkością obciążenia (wielkością przemieszczenia brzegów szczeliny).

Stwierdzono istotny wzrost parametrów sygnałów AE (maksymalna amplituda, signal strength i energia) ze zwiększeniem obciążenia konstrukcji mostowej. Również analiza z wykorzystaniem parametru Histic Index potwierdziła wpływ obciążenia na rejestrowane sygnały AE.



Rys. 7. Maksymalna amplituda (a), Historic Index (b), moc (c) i energia (d) sygnałów AE zlokalizowanych w wierzchołku uszkodzenia typu A podczas przejazdu składu towarowego

5. Wnioski

Badania składu chemicznego oraz badania metalograficzne potwierdziły, że pozyskany materiał na próbki do badań laboratoryjnych oraz podłużnica badanego mostu wykonane są ze stali zlewnej wykorzystywanej do budowy mostów na początku XX wieku.

Badania laboratoryjne wykazały istotne różnice w charakterze rejestrowanych sygnałów AE podczas rozciągania próbek bez (IA) i z zalegającymi produktami korozyjnymi (IB).

Dla próbek bez produktów korozyjnych najwięcej sygnałów AE zarejestrowano za pomocą czujników o częstotliwości rezonansowej 150kHz, a dla próbek z produktami korozyjnymi, większa ilość sygnałów rejestrowana była przez czujniki o niższej częstotliwości.

Obliczenia MES wykazały znaczne różnice w wielkości zredukowanych naprężeń Hubera-Misesa w wierzchołku pęknięcia dla poszczególnych typów uszkodzeń, a szczególnie na zmniejszenie naprężeń wpłynęło wykonanie otworu w wierzchołku pęknięcia.

Typ uszkodzenia podłużnicy mostu wpływał na ilość oraz parametry rejestrowanych sygnałów AE. W wyniku występowania większych wartości naprężeń (uszkodzenie A) rejestrowano sygnały o większej amplitudzie i energii w porównaniu do uszkodzenia, dla którego wartości naprężeń były mniejsze (uszkodzenie B). Dla uszkodzenia typu A bardzo duża ilość sygnałów generowana była w środkowej części pęknięcia.

Największe wartości amplitud, a także innych parametrów energetycznych sygnałów rejestrowanych w trakcie obciążania konstrukcji mostowej występowały przy największym obciążeniu, potwierdzono wpływ obciążenia na rejestrowane sygnały AE.

Bibliografia

- [1] M. Maksymowicz, P.J.S. Cruz, J. Bień, Load Capacity Of Damaged RC Slab Spans Of Railway Bridges. Archives Of Civil And Mechanical Engineering, 11 (4) (2011) 963-968.
- [2] Szadkowski K., Raport o stanie technicznym kolejowych obiektów inżynierskich PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. według stanu na dzień 31 grudnia 2013 roku. Biuro Dróg Kolejowych PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., Warszawa, 2014.
- [3] Assessment of Existing Steel Structures; Recommendations for Estimation of Remaining Fatigue Life. European Commission Joint Research Centre, 2008.
- [4] Hołowaty J., Wichtowski B., Properties of Steel in Railway Bridge Constructed in 1887. Roads and Bridges, 14 (4) (2015) 271-283
- [5] PN-EN ISO 6892-1:2010 Metale – Próba rozciągania – Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej.