

Badania kolejowych podkładów strunobetonowych z zastosowaniem emisji akustycznej

Dariusz KOWALCZYK¹

Streszczenie

W artykule opisano badania podkładów strunobetonowych wykonywanych według metody określonej wymaganiami norm europejskich PN-EN 13230 (Kolejnictwo – Tor – Podkłady i podrozdne betonowe) i WTWiO oraz zastosowano dodatkową metodę pomiarową – emisji akustycznej (AE). Celem przeprowadzonych badań metodą emisji akustycznej była weryfikacja uzyskanych wyników innymi metodami badawczymi opisanymi w normie. Zastosowanie tej metody w badaniach podkładów umożliwia uzyskanie precyzyjnych danych z przebiegu próby obciążenia podkładu i wyznaczenie charakterystycznych parametrów na podstawie rejestrowanych sygnałów AE. Ze względu na różnorodność produkowanych konstrukcji podkładów strunobetonowych i rozwój produktów w tym obszarze: podkłady drewniane, podkłady kompozytowe, stalowe (tzw. Y), zastosowanie metody emisji akustycznej w badaniach będzie dobrym wsparciem i będzie umożliwiało właściwą ocenę tych elementów drogi kolejowej.

Słowa kluczowe: podkłady strunobetonowe, emisja akustyczna, pęknięcie

1. Wprowadzenie

Wymagania dla podkładów strunobetonowych w zakresie sposobu przeprowadzenia badań, kryteriów wytrzymałościowych i materiałowych oraz cechowania są określone w WTWiO „Warunki techniczne wykonania i odbioru podkładów i podrozdnic strunobetonowych Id-101” opracowanych przez PKP PLK [1] oraz w normach europejskich PN-EN 13230 pt. „Podkłady i podrozdne betonowe” [2].

Podkłady strunobetonowe są ważnymi elementami drogi kolejowej, które swoje parametry konstrukcyjne powinny zachować przez dziesiątki lat (powyżej 30–40 lat), będąc jednocześnie poddawane obciążeniom eksploatacyjnym i zmiennym warunkom atmosferycznym. Podkłady strunobetonowe są ważnymi elementami w budowie drogi kolejowej i mają bezpośredni wpływ na bezpieczeństwo przewozów pasażerskich i towarowych. W zależności od planowanych warunków eksploatacyjnych na danych szlakach kolejowych (klasyfikacja linii kolejowych, przewidywane obciążenia eksploatacyjne toru, prędkość maksymalna), stosuje się różne typy konstrukcji podkładów strunobetonowych. Do najmocniejszych konstrukcji podkładów strunobetonowych zaliczyć można podkłady typu

PS-94 i PS-93, które są najczęściej stosowane w zabudowie głównych dróg kolejowych – magistralnych, gdzie prędkości przejazdu pociągów pasażerskich wynoszą powyżej 160 km/h, z przewidzianym naciskiem 22,5 ton na oś (225 kN/oś) [3]. Podkłady tego typu stosowane są również na liniach kolejowych towarowych, gdzie przewożone są największe ilości ładunku (powyżej 25 Tg/rok – linie magistralne) [4].

Metoda emisji akustycznej jest już znana i stosowana od wielu lat w różnych dziedzinach przemysłu. W ostatnich dziesięciu latach nastąpił znaczący rozwój tej metody w wyniku integracji układów elektronicznych, ich miniaturyzacji, większej wydajności oraz tworzenia i projektowania programów i aplikacji umożliwiających szybszą analizę strumieni danych (np. podczas jednego badania podkładu strunobetonowego urządzenia AE mogą rejestrować setki i tysiące zdarzeń AE w ciągu 1 sekundy). To spowodowało, że emisja akustyczna stała się narzędziem badawczopomiarowym coraz powszechniej stosowanym w wielu gałęziach przemysłu. Emisja akustyczna jest już stosowana od wielu lat w przemyśle rafineryjnym do monitoringu i oceny przemysłowych instalacji, zbiorników w rafineriach, rurociągów oraz innych ważnych obiektów konstrukcyjnych. Istnieje wiele prac

¹ Dr inż.; Instytut Kolejnictwa, Laboratorium Badań Materiałów i Konstrukcji; e-mail: dkowalczyk@ikolej.pl.

poświęconych metodzie emisji akustycznej, wykorzystywanej do oceny konstrukcji mostów i wiaduktów, również często stosowanej w ocenie konstrukcji betonowych czy żelbetonowych [5, 6, 7].

W zakresie badań wytrzymałościowych, podkłady są poddawane różnym wariantom obciążeń: obciążeniom statycznym, dynamicznym i zmęczeniowym. Celem przeprowadzanych badań na wytypowanych obiektach z produkcji jest określenie charakterystycznych parametrów wytrzymałości, np.: F_r – pojawienie się pierwszego pęknięcia, $F_{r,0,05}$ – pojawienie się rysy o szerokości 0,05 mm po zdjęciu obciążenia, F_{rB} – siła niszcząca podkład.

Wykonywanie pełnych badań dotyczy nowej konstrukcji, nowej technologii wykonania lub zmian technologicznych, w takim przypadku wymagany jest pełny zakres badań opisanych w ww. dokumentach: norma PN-EN 13230 – w przypadku wymagań europejskich oraz WTWiO [1, 2] w przypadku wymagań PKP PLK. Zakres WTWiO [1] dla podkładów strunobetonowych w dużym obszarze pokrywa się z wymaganiami normy PN-EN 13230 [2]. W przypadku badań sprawdzających, ten obszar badań, wymagany normą PN-EN 13230, jest zazwyczaj realizowany w ograniczonym zakresie. Badania podkładów strunobetonowych pełne, jak również okresowe, powinny być wykonywane przez niezależne jednostki badawcze, które posiadają akredytowane przez PCA (Polskie Centrum Akredytacji) metody badawcze [1, 2].

Pracownia Badań Materiałów i Elementów Konstrukcji Instytutu Kolejnictwa ma akredytowane procedury badawcze na wykonywanie badań podkładów strunobetonowych, według których były wykonywane badania opisane w niniejszym artykule. Dodatkowy zakres badań emisji akustycznej jest metodą nieopisaną w wymienionych dokumentach i ta metoda jest zastosowana jako dodatkowa, niezależna ocena stanu konstrukcji podkładu strunobetonowego. W artykule opisano badania wykonywane

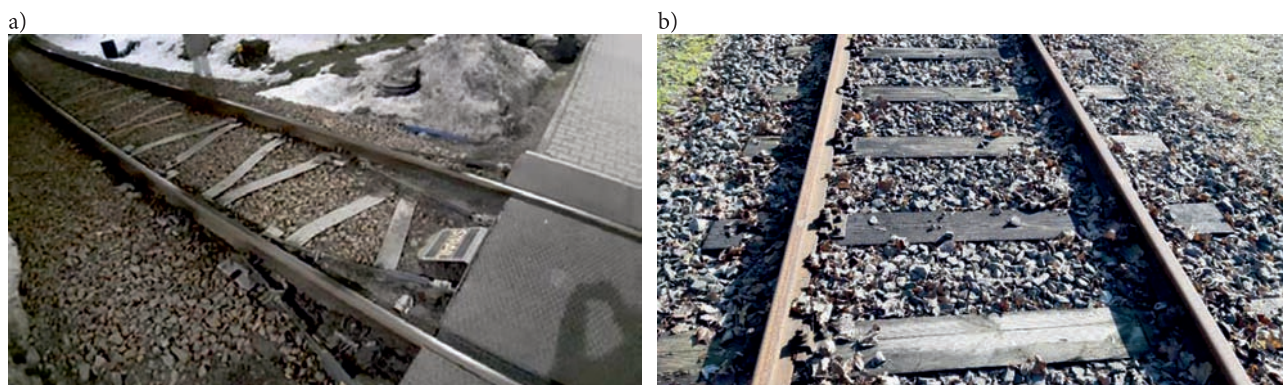
na podkładach strunobetonowych typu PS-94, które są zabudowywane na głównych liniach kolejowych. Do budowy dróg kolejowych stosowane są również inne rodzaje podkładów: stalowe (rys. 1a) drewniane (rys. 1b) lub kompozytowe. Szczególnie ten ostatni obszar podkładów kompozytowych rozwija się dynamicznie. W przypadku wymienionych podkładów nie obowiązują te same wymagania norm, co w przypadku podkładów strunobetonowych.

Metoda emisji akustycznej jako jedna z grupy metod NDT (ang. *Non-Destructive Testing* – badania nieniszczące) jest coraz częściej stosowana w różnych obszarach badań przemysłowych jako efektywna metoda monitoringu ważnych obiektów przemysłowych, np. w przemyśle rafineryjnym, co potwierdza coraz więcej prac naukowych, w których opisano badania realizowane tą metodą. W wyniku badań prowadzonych metodą AE, rozszerzają się podstawy naukowe do implementacji jej zastosowań w nowych gałęziach przemysłu. Również w obszarze oceny różnego typu podkładów kolejowych lub innych obiektów infrastruktury kolejowej jest potencjalna możliwość zastosowania tej metody badawczej.

Firma MISTRAS Group od 1978 r. jest światowym liderem w opracowywaniu i produkcji urządzeń emisji akustycznej do przemysłowych zastosowań kontrolnych i monitorujących. Niniejsze badania na podkładach strunobetonowych wykonano na aparaturze kontrolno-pomiarowej firmy MISTRAS – AEWinEXP8.

2. Sygnały emisji akustycznej

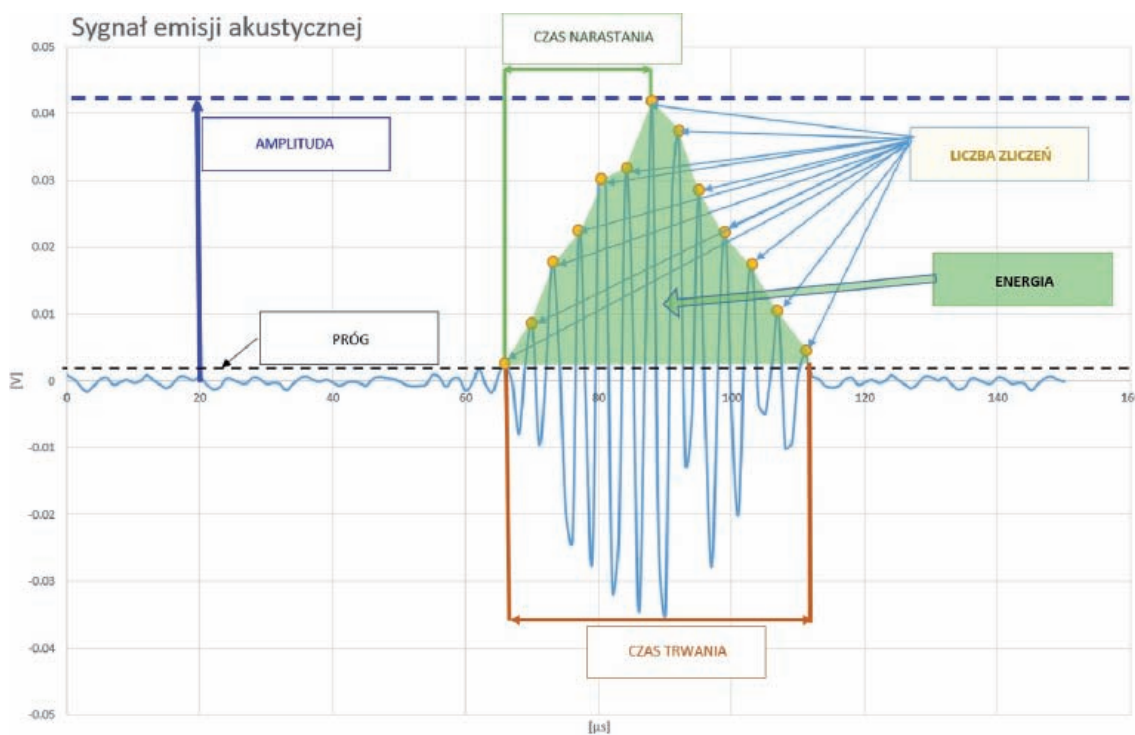
Emisja akustyczna to metoda z grupy badań NDT, gdzie za pomocą specjalnej aparatury, zdefiniowanej w przedmiotowych normach – np. PN-EN 13477-1 [8], PN-EN 13477-2 [9], PN-EN 13554:2011 [10] oraz instrukcja użytkownika „Users Manual” [11], rejestruje fale



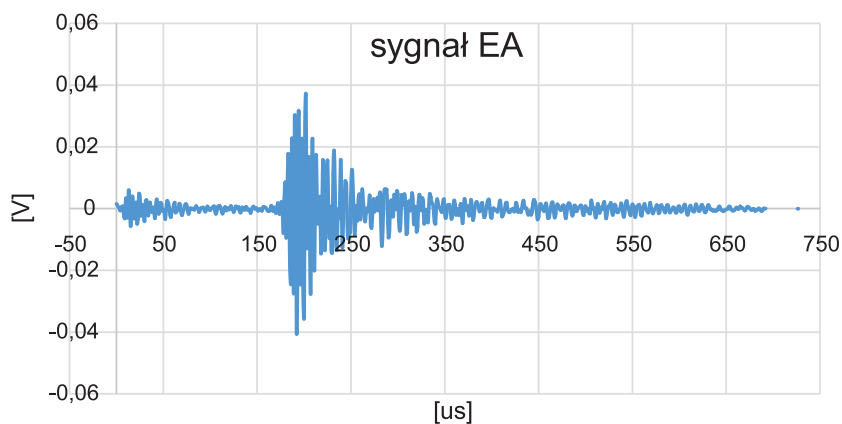
Rys. 1. Zastosowane w budowie drogi kolejowej podkłady stalowe (a) i drewniane (b) [fot. D. Kowalczyk]

sprężyste. Fale, które są uwalniane w materiale, który ulega mikroodkształceniom w wyniku różnych czynników, zdarzeń, np. zmian w mikrostrukturze, pęknięcia sieci krystalicznych, odkształcenia sieci krystalicznej, tarcia, korozji. Metoda emisji akustycznej jest metodą pasywną polegającą na nasłuchiowaniu sygnałów powstających w materiale lub na jego powierzchni (w odróżnieniu od metody ultradźwiękowej, która polega na wysyłaniu sygnałów ultradźwiękowych i ich odbiorze).

Fala pochodząca z wad lub uszkodzonych obszarów propaguje przez materiał i dociera do czujnika emisji akustycznej, gdzie sygnał analogowy jest przetwarzany na dane cyfrowe w urządzeniu pomiarowym przez odpowiednie przetwarzanie sygnału napięciowego za pomocą układów elektronicznych ADC (ang. *Analog to Digital Converter*)². Ideowy sygnał AE i jego charakterystyczne cechy przedstawiono na rysunku 2, rzeczywisty sygnał AE zarejestrowany podczas badań na rysunku 3.



Rys. 2. Przykładowy sygnał emisji akustycznej (ideowy) [opracowanie własne]



Rys. 3. Przykładowy rzeczywisty sygnał emisji akustycznej (AE) [opracowanie własne]

² *Analog Digital Converter* – czasem jest nazywany skrótowo przetwornikiem A/C lub A/D (ang. *Analog to Digital*).

Na podstawie zebranych zdarzeń dokonuje się oceny parametrów charakterystycznych, tym samym określając istotność zdarzenia, co ma bezpośrednie przełożenie na ocenę stanu obiektu (konstrukcji) poddawanemu obciążeniu. Do najistotniejszych parametrów emisji akustycznej należą: *rise time* (ang.) – czas narastania sygnału aż do osiągnięcia maksimum amplitudy, *duration* (ang.) – czas trwania sygnału ponad zdefiniowany poziom szumów, *energy* (ang.) – energia zdarzenia AE, *amplitude* (ang.) – amplituda, *counts* (ang.) – liczba zliczeń maksimum w czasie trwania zdarzenia AE, *threshold* (ang.) – określony poziom szumów. Parametry te zostały przedstawione na rysunkach 2, 3.

Szczegółowe wymagania dotyczące aparatury do badań emisji akustycznej opisano w normie PN-EN 13477-1 [8], a definicje szczegółowo opisano w normach dotyczących emisji akustycznej PN-EN 1330-9:2017 – Badania nieniszczące – Terminologia – Część 9: Terminy stosowane w badaniach emisją akustyczną [12]. Poniżej przedstawiono wzór (1) na dynamiczny zakres emisji akustycznej, wzór sygnału AE oznaczenia zgodnie z opisem w normie ASTM E976 [12], DR – *Dynamic Range* (ang.).

$$DR = 20 \log \left[\frac{V_{\text{peak signal}}}{V_{\text{peak electronic noise}}} \right]. \quad (1)$$

Przed przystąpieniem do badań wytrzymałościowych podkładów strunobetonowych sprawdzono poprawność działania aparatury kontrolno-pomiarowej do rejestracji emisji akustycznej, dokonano pomiarów tłumienności sygnału oraz określono prędkość rozchodzenia się fali w podkładzie strunobetonowym. Sprawdzone również aparaturę zgodnie z akredytowanymi procedurami badawczymi wszystkich niezbędnych urządzeń do badania podkładów strunobetonowych.

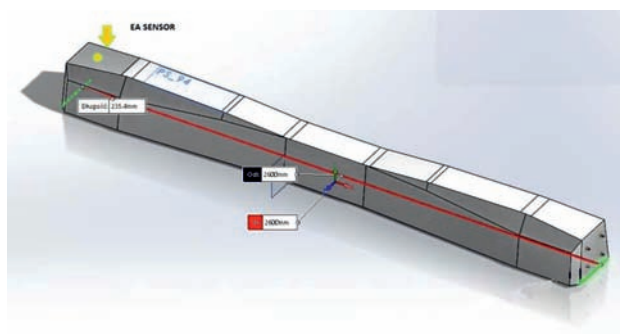
3. Badania tłumienności (AE)

Przeprowadzono badania określenia tłumienności sygnału emisji akustycznej w podkładzie strunobetonowym. Aparatura kontrolno-pomiarowa emisji akustycznej zastosowana w badaniach, spełniała wytyczne i wymagania norm PN-EN 13554:2011 [10] i PN-EN 13477-2 [9]. Pomiary i rejestrację sygnałów wraz z ich analizą wykonano na urządzeniu firmy Mistras wyposażonym w 8-kanalową kartę sygnałów AE wraz z oprogramowaniem EAwinEXP8. W tym celu umieszczono czujnik emisji akustycznej typu PKI6 (ze zintegrowanym przedwzmacniaczem) w strefie podszytowej podkładu, a w określonych odległościach od czujnika generowano wzorcowe sygnały AE

(dystans od czujnika 500 mm, 1000 mm, 1500 mm, 2000 mm, 2500 mm).

Czujnik PK6I używany w badaniach, to rezonansowy czujnik emisji akustycznej średniej częstotliwości ze zintegrowanym, ultraniskoszumowym przedwzmacniaczem. Czujnik jest wyposażony w układ AST (zintegrowana funkcja automatycznego testu czujnika). Próg wykrywalności sygnału emisji akustycznej ustawiono na wartość powyżej 40 dB.

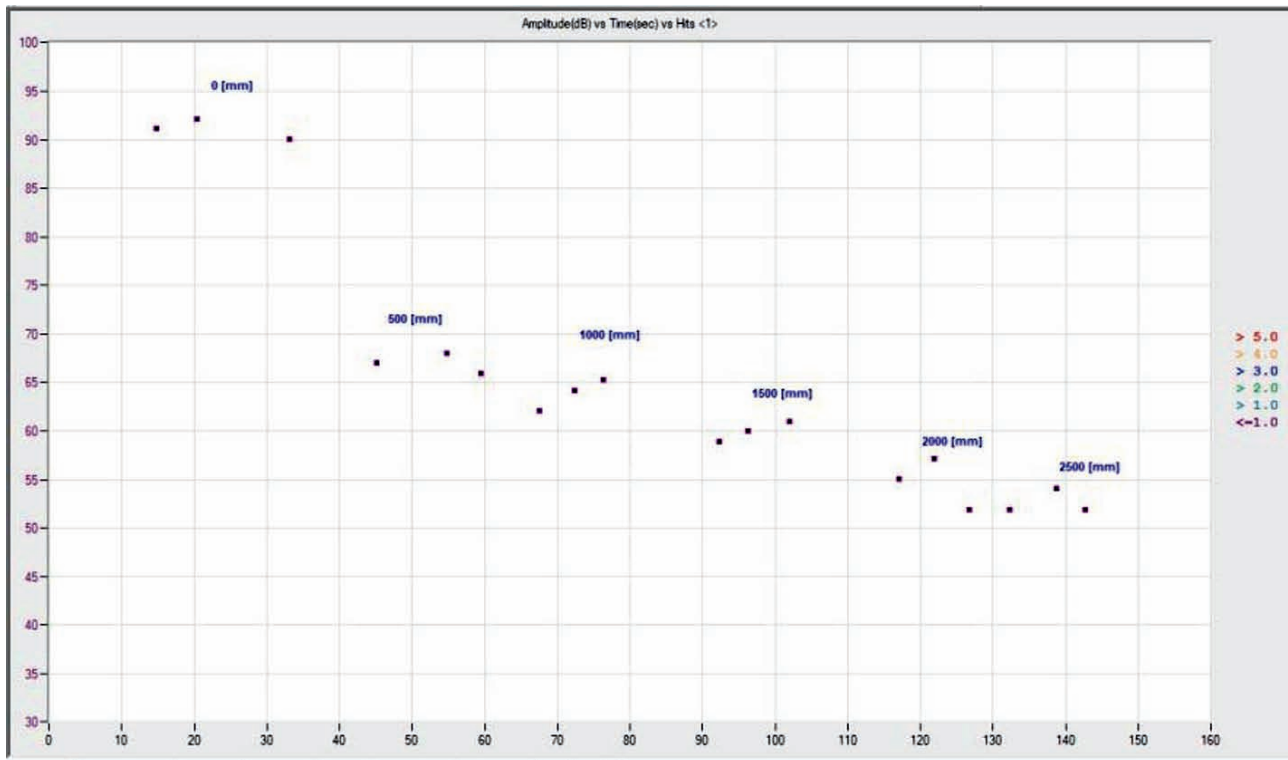
Badania tłumienności sygnału AE wykonano z wykorzystaniem źródła wzorcowego sygnału AE – Hsu-Nielsen zgodnie z wymaganiami opisanymi w normie PN-EN 1330-9:2017 punkt 2.5.21 i ASTM E976. Dla umieszczonego czujnika AE typu PKI6 przedstawionego na rysunku 4 wywołano sygnały wzorcowe w odległości 0 mm, 500 mm; 1000 mm, 1500 mm, 2000 mm oraz 2500 mm.



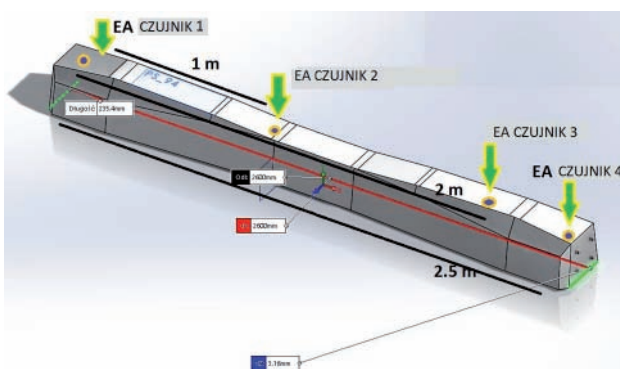
Rys. 4. Sposób pomiaru tłumienności sygnału AE w podkładzie strunobetonowym PS-94 [opracowanie własne]

Celem przeprowadzonych testów było określenie, czy sygnały zdarzeń AE pochodzące z jednej skrajnej części podkładu są rejestrowane przez czujnik znajdujący się po jego przeciwnej stronie. Jak wykazały przeprowadzone testy, dla zainicjowanego sygnału AE, w odległości około 2,5 m od czujnika, sygnał był wykrywany przez system emisji akustycznej (rys. 5). Niniejsze wskazuje, że każdy istotny sygnał AE, który zostanie wygenerowany podczas badania w podkładzie, może być zarejestrowany przez czujnik AE (w przypadku odpowiednich ustawień systemowych i określenia właściwego progu szumów).

Przeprowadzono również dodatkowe badania określające poziom tłumienia sygnału AE w podkładzie strunobetonowym; w niniejszym przypadku w badaniu wykorzystano ten sam układ pomiarowy rejestrujący EAwinEXP8 wyposażony w 4 czujniki PKI15 (ze zintegrowanymi w czujnikach układami przedwzmacniaczy). Czujniki zostały rozmieszczone na podkładzie strunobetonowym, tak jak przedstawiono na rysunku 6 (w jednej osi). Zdarzenia AE były generowane blisko czujników 1 i 4, w odległościach około 5 mm od czujnika.



Rys. 5. Uzyskane wyniki tłumienności wzorcowych sygnałów AE (Hsu-Niesen) [opracowanie własne]



Rys. 6. Sposób rozmieszczenia czujników na podkładzie strunobetonowym podczas określania tłumienności sygnałów wzorcowych EA (Hsu-Niesen) [opracowanie własne]

Uzyskany sygnał emisji akustycznej tego samego zdarzenia, zarejestrowany przez poszczególne czujniki rozmieszczone w różnych odległościach od źródła przedstawiono na rysunku 7.

Na rysunku 8 przedstawiono uzyskane sygnały AE (zebrane z poszczególnych czujników) na jednej osi czasu. Ze względu na dużą różnicę napięciową amplitudy sygnałów zarejestrowanych na poszczególnych czujnikach, w celu ich lepszego zobrazowania, sygnał z czujnika 1 został przedstawiony w ograniczonym zakresie od $-0,1$ V do $+0,1$ V. Różnice w czasach początku rejestracji sygnału emisji

akustycznej dla poszczególnych czujników wynikają z czasu przemieszczania się fali w podkładzie od źródła AE do danego czujnika. Określa to wzór (2) na tłumienie sygnału w zależności od odległości czujnika od źródła (AE).

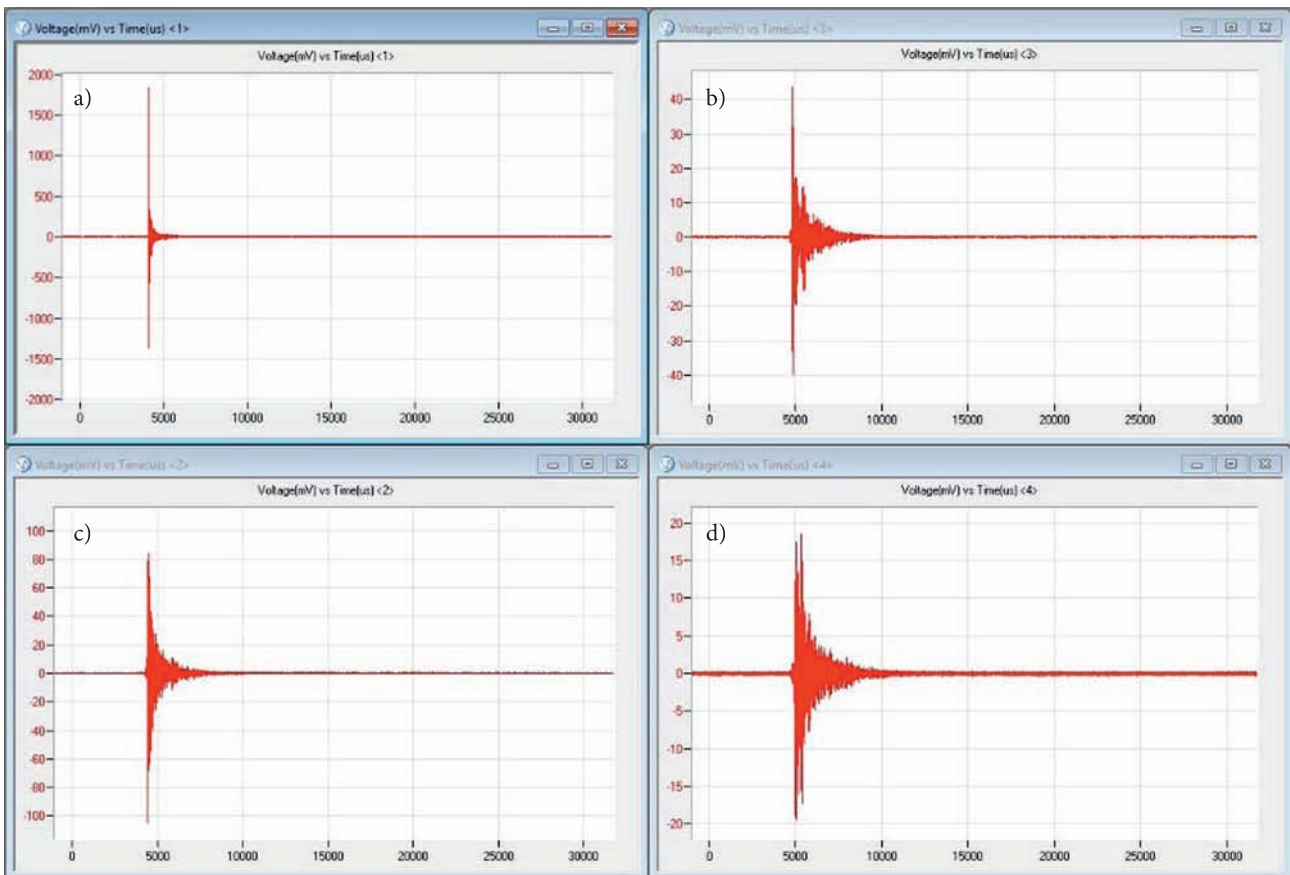
$$\alpha_t = \frac{20}{D} \log_{10} \left(\frac{A_1}{A_2} \right) = \frac{A_r}{D}, \quad (2)$$

gdzie:

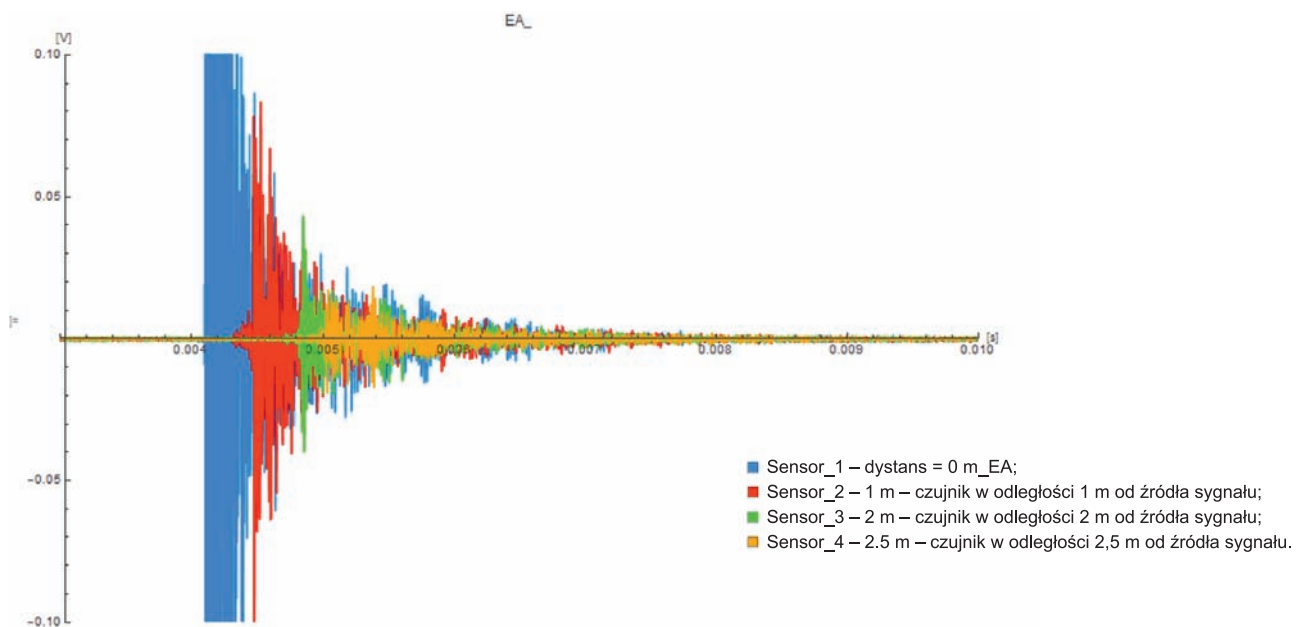
- α_t – tłumienność sygnału [dB / m],
- A_1 – amplituda sygnału z czujnika nr 1 [V],
- A_2 – amplituda sygnału z czujnika nr 2 [V],
- D – odległość między czujnikami 1 i 2 [m],
- A_r – względna amplituda,
- A – maksymalny zmierzony sygnał napięciowy [V] przez czujnik w odległości X od źródła,
- A_0 – maksymalny referencyjny sygnał napięciowy [V].

$$A_r = 20 \log_{10} \left(\frac{A}{A_0} \right). \quad (3)$$

Na podstawie wyników badań i analizy danych dla poszczególnych czujników, ze wzoru nr 2 i 3 obliczono wartości tłumienia sygnałów, a wyniki przedstawiono w tablicach 1, 2.



Rys. 7. Sygnał emisji akustycznej AE zarejestrowany na czujnikach tego samego typu rozmieszczonych w różnej odległości od źródła (miejsca zdarzenia AE): a) 2,5 [m], b) 2 [m], c) 1 [m], d) 0,1 [m]; wykres (oś Y – sygnał napięcia [V], oś X – czas [μs]); [opracowanie własne]



Rys. 8. Sygnały emisji akustycznej uzyskane na poszczególnych czujnikach w zdefiniowanych odległościach (zgodnie z rys. 5) od źródła powstałego zdarzenia AE [opracowanie własne]

Tablica 1
Określenie wartości tłumienia sygnału w badanym materiale – podkładzie strunobetonowym

Czujnik	Amplituda sygnału [V]	Odległość czujnika od źródła sygnału EA [m]	Tłumienność sygnału [dB/m]
4	1,82	0,01	–
3	0,105	1	24,7
2	0,044	2	16,16
1	0,0194	2,5	15,77

Przeprowadzone badania tłumienności sygnałów AE wykazały, że czujniki mogą wykryć zdarzenia emisji akustycznej nawet w odległości ponad 2,5 metra. W przypadku badań niszczących jest to o tyle istotne, że czujniki mogą znajdować się w większej odległości od miejsca, w którym przewidywane jest zniszczenie obiektu, bez narażenia na uszkodzenie aparatury badawczej. Określenie „tłumienność sygnału w badaniach emisją akustyczną” odgrywa ważną rolę – dane te służą do lokalizacji zdarzeń AE [14], a tym samym do określania miejsc niewralgicznych w konstrukcjach. Dokładne określenie tego parametru umożliwi precyzyjną lokalizację takich miejsc. Ze względu na wiele różnych czynników, jak np. wielkość frakcji (uziarnienie kruszywa), rodzaj materiału, z jakiego jest kruszywo, skład mieszanki betonu itp., określenie parametru tłumienności lokalnie może być różne w badanym obiekcie. Wynika to również z faktu, że obiekty, którymi są podkłady strunobetonowe, mają dodatkowo

złożoną geometrię i stalowe zbrojenie, co stanowi dodatkowy czynnik wpływający na prędkości rozchodzenia się fal w materiale, a tym samym na tłumienność sygnałów emisji akustycznej w materiale. Dodatkowym czynnikiem wpływającym na tłumienność są naprężenia, które również występują w podkładzie strunobetonowym. Szerzej opisany wpływ czynników na tłumienność sygnałów w betonie jest przedstawiony w publikacji [15].

4. Badanie prędkości rozchodzenia się fali sprężystej w betonie (podkładzie typu PS-94)

Przeprowadzono badania określenia prędkości rozchodzenia się fali sprężystej – sygnału AE w podkładzie strunobetonowym typu PS-94. Pomiar i rejestrację sygnałów wraz z ich analizą wykonano na urządzeniu AE (system firmy Mistras wyposażony w 8-kanałową kartę sygnałów AE wraz z oprogramowaniem EAwinEXP8). W tym celu umieszczono dwa czujniki AE typu PKI6 (ze zintegrowanym przedwzmacniaczem): jeden czujnik w obszarze końca podkładu i drugi po przeciwnej jego stronie (jak przedstawiono na rysunku 9), odległość między czujnikami wynosiła 2560 mm. Do badania określenia prędkości fali sprężystej wykorzystano źródła wzorcowego sygnału AE (Hsu-Nielsen) i wygenerowano trzy sygnały w bezpośrednim położeniu czujnika 2. Uzyskane wyniki przedstawiono w tablicy 3.

Tablica 2
Uzyskane charakterystyczne parametry sygnałów AE tego samego zdarzenia na tym samym typie czujników w różnej odległości od źródła sygnału (zgodnie z rysunkiem 6)

SS.mmmuuun	CH	Czas narastania sygnału EA [ns]	Liczba zliczeń	Energia [aJ]	Czas trwania AE [ns]	Amplituda	ABS-ENERGY	Odległość [m]
02.3520760	4	10	233	388	4435	97	34	0
02.3521715	3	103	204	141	3933	74	55	1
02.3524495	2	176	149	84	3558	65	99	2
02.3528555	1	260	121	57	3741	58	100	2,5
SS.mmmuuun	CH	Czas narastania sygnału EA [ns]	Liczba zliczeń	Energia [aJ]	Czas trwania AE [ns]	Amplituda	ABS-ENERGY	Odległość [m]
52.1478750	4	14	375	750	5253	95	53	0
52.1479695	3	107	311	259	5965	76	71	1
52.1482475	2	284	216	162	5801	65	99	2
52.1486535	1	1154	185	133	5492	62	100	2,5

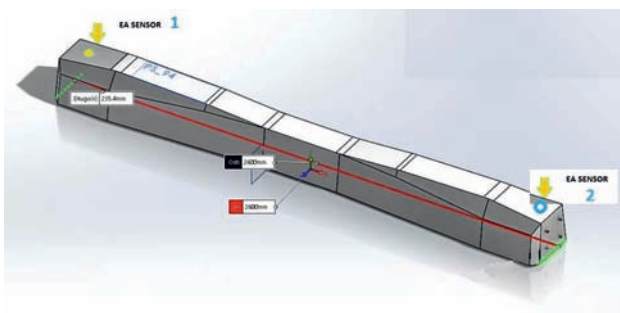
Objaśnienia: „SS.mmmuuun” oznacza czas odpowiednio: s – sekunda, m – milisekundy [ms], u – mikrosekundy [μs], n – nanosekundy [ns]; Energia 1[J] = 1·10¹⁸ [aJ]; [opracowanie własne].

Tablica 3

Uzyskane wyniki dla próby rozchodzenia się fali sprężystej w podkładzie typu PS-94

SS.mmmuuun	Czujnik	Czas narastania EA [ns]	Liczba zliczeń	Energia [aJ]	Czas trwania EA [ns]	Różnica w czasie sygnału EA zarejestrowana przez czujniki 1 i 2 [ns]	Odległość [mm]	prędkość V [m/s]
52.6657873	2	4	121	179	4211	–	–	–
52.6666072	1	711	115	128	5032	0.000819	2560	3122.3
59.1154292	2	4	128	234	3176	–	–	–
59.1162463	1	714	128	179	5244	0.000817	2560	3133.0
69.1372473	2	4	136	233	3312	–	–	–
69.1380673	1	712	125	150	5242	0.000820	2560	3122.0

[Opracowanie własne].



Rys. 9. Uzyskane wyniki tłumienności wzorcowych sygnałów AE (Hsu-Niesen) [opracowanie własne]

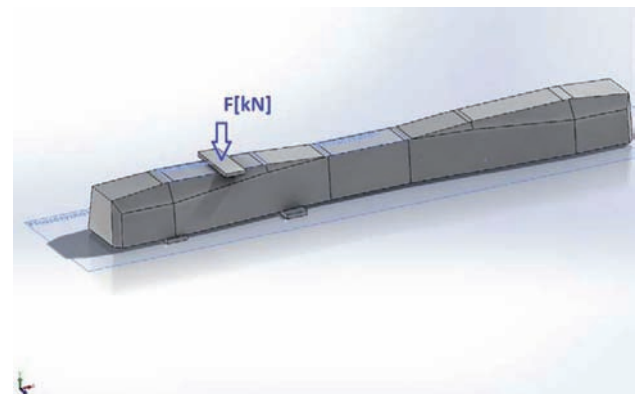
Na podstawie przeprowadzonych badań oraz analizy artykułu dotyczącego wpływu poziomu naprężeń na zmiany szybkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej w wybranych rodzajach betonu [15] stwierdzono, że w przypadku podkładów strunobetonowych, w których technologicznie występuje wytwarzanie naprężeń ściskających oraz złożona geometria i niejednorodność materiałowa, uzyskanie dokładnej, powtarzalnej prędkości rozchodzenia się fali jest trudne. Uzyskane wartości natomiast pokrywają się z danymi literaturowymi dla tego typu materiału. Badania opisane w artykule [15] wskazują, że przy wzroście naprężeń do 60% właściwości wytrzymałości betonu, może nastąpić spadek prędkości rozchodzenia się fali nawet o około 40%.

5. Badania wytrzymałości podkładów strunobetonowych

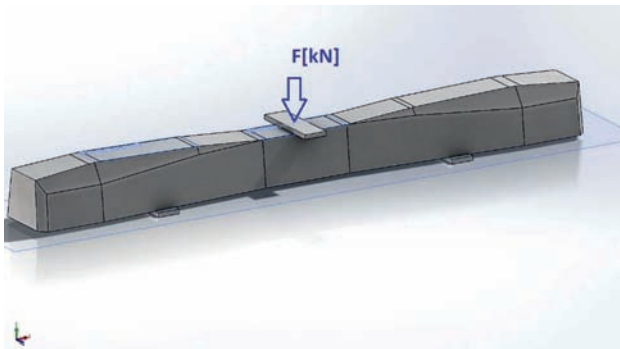
Celem badań podkładów strunobetonowych jest: ocena konstrukcji, sprawdzenie prawidłowości znaczeń,

ocena w zakresie występowania wad (lub ich braku), uszkodzeń produkcyjnych, sprawdzenie wymiarów na zgodność z dokumentacją konstrukcyjną, ocena stosowanych materiałów do produkcji oraz w zakresie wytrzymałości konstrukcyjnej; przeprowadzenie badań podkładów i poddanie ich obciążeniom statycznym, dynamicznym i zmęczeniowym z odniesieniem do kryteriów określonych w normach [1, 2].

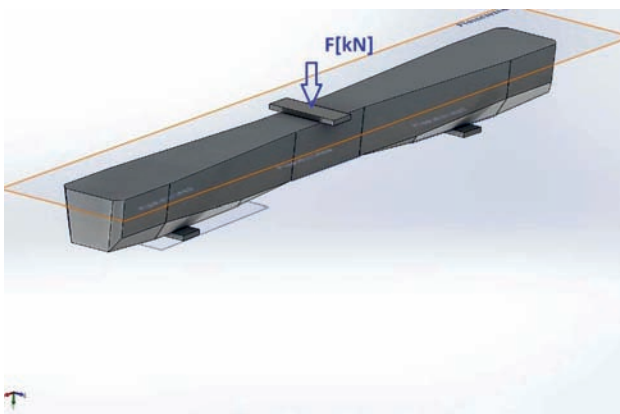
W zakresie badań statycznych, podkłady strunobetonowe poddaje się obciążeniom w części podszynowej (rys. 10), części środkowej w pozycji normalnej (rys. 11) i w pozycji odwróconej (rys. 12). W badaniach dynamicznych konstrukcja poddawana jest obciążeniom w części podszynowej (patrz rys. 10), a przeprowadzenie badania zmęczeniowego polega na obciążeniu konstrukcji podkładu w części podszynowej do momentu w którym pojawi się rysa, a następnie podkład poddawany jest obciążeniom o zdefiniowanej amplitudzie sił przez 2 000 000 cykli obciążeń.



Rys. 10. Schemat obciążenia podkładu w części podszynowej [opracowanie własne]

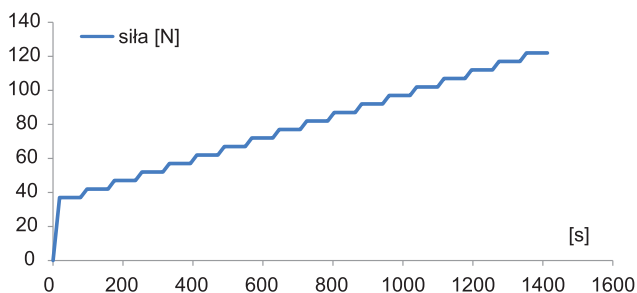


Rys. 11. Schemat obciążenia podkładu w części środkowej w pozycji normalnej [opracowanie własne]



Rys. 12. Schemat obciążenia podkładu w części środkowej w pozycji odwróconej [opracowanie własne]

Tak jak opisano, każdy typ badań wymaga odpowiedniego przygotowania stanowiska badawczego. Poniżej przytoczono wyniki badań dotyczących obciążeń statycznych w części środkowej w pozycji odwróconej (rys. 10), gdzie podczas badania realizowany był schemat obciążeń przedstawiony na rysunku 13 i dokonywano rejestracji sygnałów emisji akustycznej.



Rys. 13. Schemat obciążenia podkładu podczas badania w części środkowej w pozycji odwróconej [opracowanie własne]

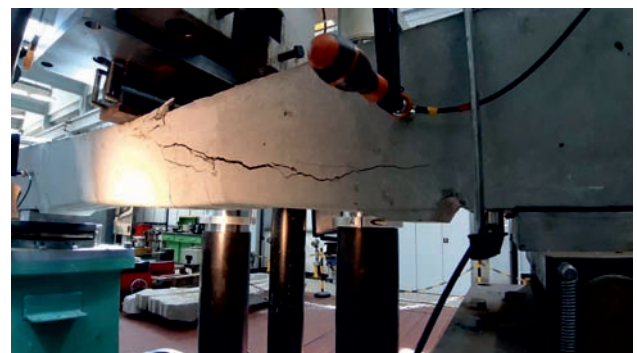
Podkład, obciążany wstępną siłą 37 kN, poddawano stopniowym obciążeniom, zwiększając siłę o 5 kN (rys. 13). Podczas obciążania przeprowadzano inspekcję, i obserwowano pojawiające się rysy i pęknięcia. Przykładowe wyniki inspekcji (wykrywanie rysy) przedstawiono na rysunku 14.



Rys. 14. Wynik prowadzonych inspekcji – stwierdzenie pojawienia się rysy podczas obciążania podkładu [opracowanie własne]

Badanie podkładu strunobetonowego w pozycji środkowej odwróconej symuluje najbardziej ekstremalny przypadek słabego podparcia w eksploatacji podkładu w części środkowej. Podczas obciążania podkładów w części środkowej w zakresie metody AE zastosowano trzy czujniki AE, dwa czujniki PKI6 i jeden WDI.

W badaniach do rejestracji sygnałów emisji akustycznej zastosowano system EAwinEXP8 [11], który umożliwia również wprowadzenie analogowych sygnałów zewnętrznych. Wprowadzanie zewnętrznych sygnałów z innych urządzeń pomiarowych pozwala na lepszą korelację przebiegu badania ze zdarzeniami emisji akustycznej i stanem badanego obiektu. Badania podkładów strunobetonowych wykonywane były na maszynie wytrzymałościowej LFV (rys. 15), która wyposażona jest w czujnik siły o pierwszej klasie dokładności. Z maszyny wytrzymałościowej LFV wprowadzono sygnał siły i dodatkowym kanałem wprowadzono do systemu EAwinEXP8, co umożliwiło bezpośrednią rejestrację zdarzeń AE wraz z informacją o obciążeniu jakim był poddawany podkład.



Rys. 15. Badanie na maszynie wytrzymałościowej LFV podkładu strunobetonowego, obciążenie w części środkowej w pozycji odwróconej [fot. D. Kowalczyk]

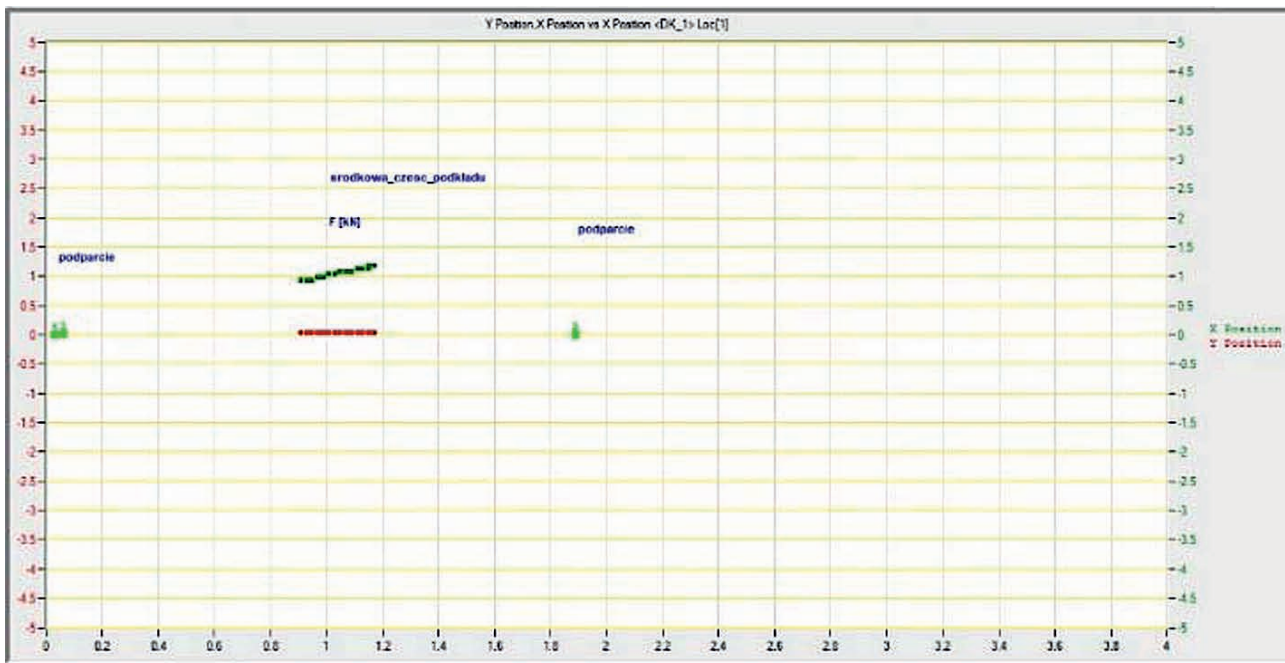
Czujniki umieszczono z dala od bezpośredniego obszaru występowania rys i największych naprężeń w celu ochrony czujników przed nieprzewidywanym przebiegiem procesu pęknięcia podkładu struno-

betonowego. Ponieważ badania są prowadzone do całkowitego zniszczenia obiektu (wyznaczenie siły Fr) [1, 2], tym samym przebieg takiej próby narażałby czujniki AE na uszkodzenie. W przypadku badania w części środkowej, siły niszczące dochodzą do 130 kN, w przypadku badań w części podszykowej do 600 kN. Rozmieszczenie czujników w sposób jaki zaproponowano (umieszczenie ich w obszarze części podszykowych podkładu), umożliwiło przeprowadzenie dodatkowej analizy przebiegu pęknięć (rozwój pęknięć w podkładzie od pierwszych zdarzeń AE do jego zniszczenia), co przedstawiono na rysunku 16.

Przedstawione przykładowe sygnały AE z końcowego etapu badania, dokładniej pozwalają określić

właściwą siłę zniszczenia i powiązać ją ze zdarzeniami emisji akustycznej.

Przedstawione przykładowe sygnały AE z końcowego etapu badania, pozwalają dokładniej określić właściwą siłę zniszczenia i powiązać ją ze zdarzeniami emisji akustycznej. Dane dotyczące opisów w tablicach 4 i 5. Zapis SSS.mmmuun – czas badania [ms] – milisekunda, – mikrosekunda [μs], n – nanosekunda [ns], czas mierzony od rozpoczęcia badania, PARA1_kN – sygnał siły [kN], CH1 – czujnik nr 1, PKI6, CH2 – czujnik nr 2, PKI6, Rise time – czas narastania sygnału, Counts – liczba zliczeń, Energy – energia, duration – czas trwania sygnału, AMP – amplituda; szczegółowe opisy sygnałów i wyjaśnienia znajdują się w normie [12].



Rys. 16. Przykładowy przebieg pojawiania się zdarzeń AE w podkładzie w zakresie obciążeń do wizualnej inspekcji stwierdzenia pęknięcia (rysy) na powierzchni podkładu (około 63 kN – obciążenie w części środkowej podkładu) [opracowanie własne]

Tablica 4

Fragment danych AE zgromadzonych podczas badania podkładu PS-94 oznaczonego jako podkład_strunobetonowy_2_9, poddanych analizie sortowania względem kolumny „Energia” [12]

SSSS.mmmuun	Siła [kN]	Nr czujnika	Czas narastania EA [ns]	Liczba zliczeń EA	Energia [a]	Czas trwania EA [ns]	Amplituda [dB]
635.815	-111.084	2	17570	6164	65535	1E+06	99
636.134	-112.457	1	25914	3795	65535	1E+06	97
636.816	-110.016	2	12307	8572	65535	999996	95
637.135	-110.931	1	41080	5903	65535	999941	99
637.817	-110.169	2	15208	12613	65535	1E+06	99
638.136	-109.711	1	47477	6910	65535	1E+06	99
638.818	-107.88	2	21949	13214	65535	999999	99
639.137	-108.795	1	4664	9664	65535	1E+06	99
639.819	-108.49	2	2034	10540	65535	1E+06	99

Tablica 5

Fragment danych AE zgromadzonych podczas badania podkładu Ps-94 oznaczonego jako podkład _strunobetonowy_1_14, poddanych analizie sortowanych względem kolumny „Energia” [11]

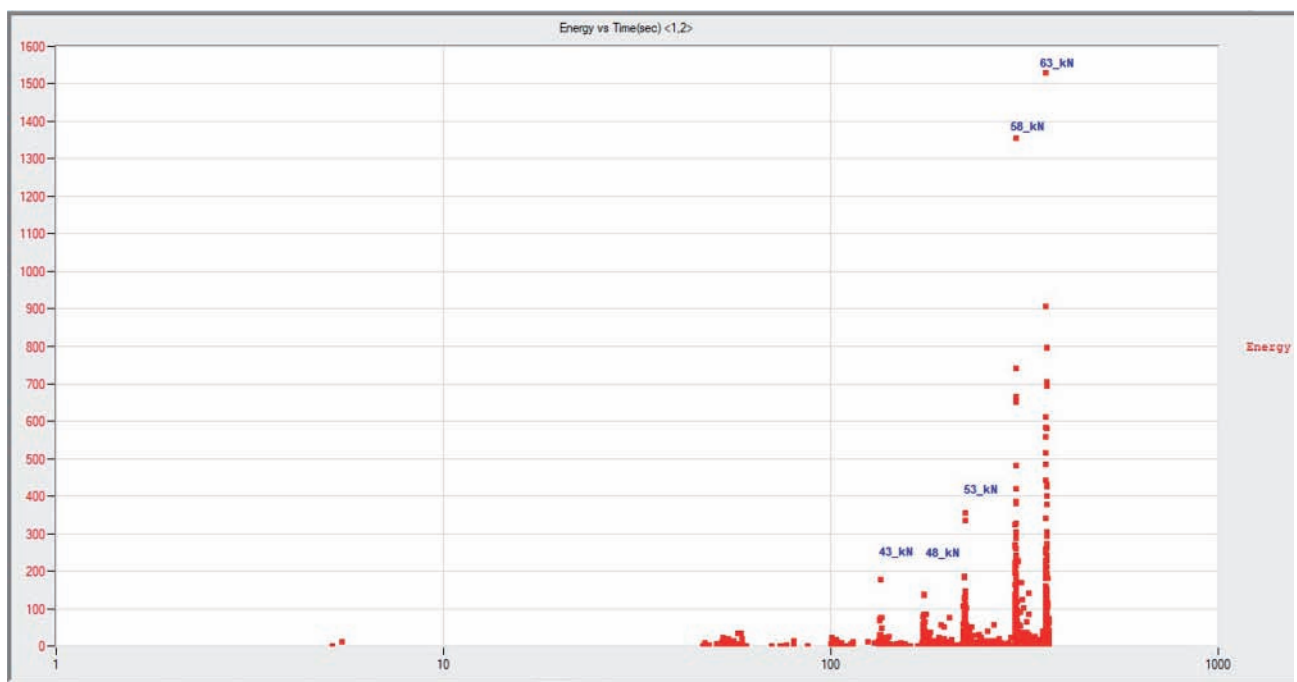
SSSS.mmmuuun	Siła [kN]	Nr czujnika	Czas narastania EA [ns]	Liczba zliczeń EA	Energia [a]	Czas trwania EA [ns]	Amplituda [dB]
718.532	-119.324	1	9664	6599	65535	1E+06	96
719.533	-121.46	1	38150	10576	65535	1E+06	92
720.399	-121.002	2	978	4658	65535	1E+06	89
720.534	-120.697	1	62076	16551	65535	1E+06	99
721.4	-116.272	2	5090	7717	65535	1E+06	90
721.535	-114.594	1	11147	16557	65535	1E+06	99
722.401	-111.694	2	52077	9935	65535	1E+06	95
722.536	-114.594	1	47165	17751	65535	1E+06	99
723.402	-97.1985	2	63222	8621	65535	1E+06	99
723.537	-92.6208	1	58454	17232	65535	1E+06	99
723.679	-87.5854	3	47739	4725	65535	809082	99
724.403	-47.9126	2	30170	30387	65535	885564	97

Analiza sygnałów emisji akustycznej i parametru siły pozwala określić moment niszczący podkład. W świetle analizy zarejestrowanych zdarzeń AE można stwierdzić, że siła niszcząca podkład w części środkowej wyniosła 121 kN (dla podkład_strunobetonowy_1_14).

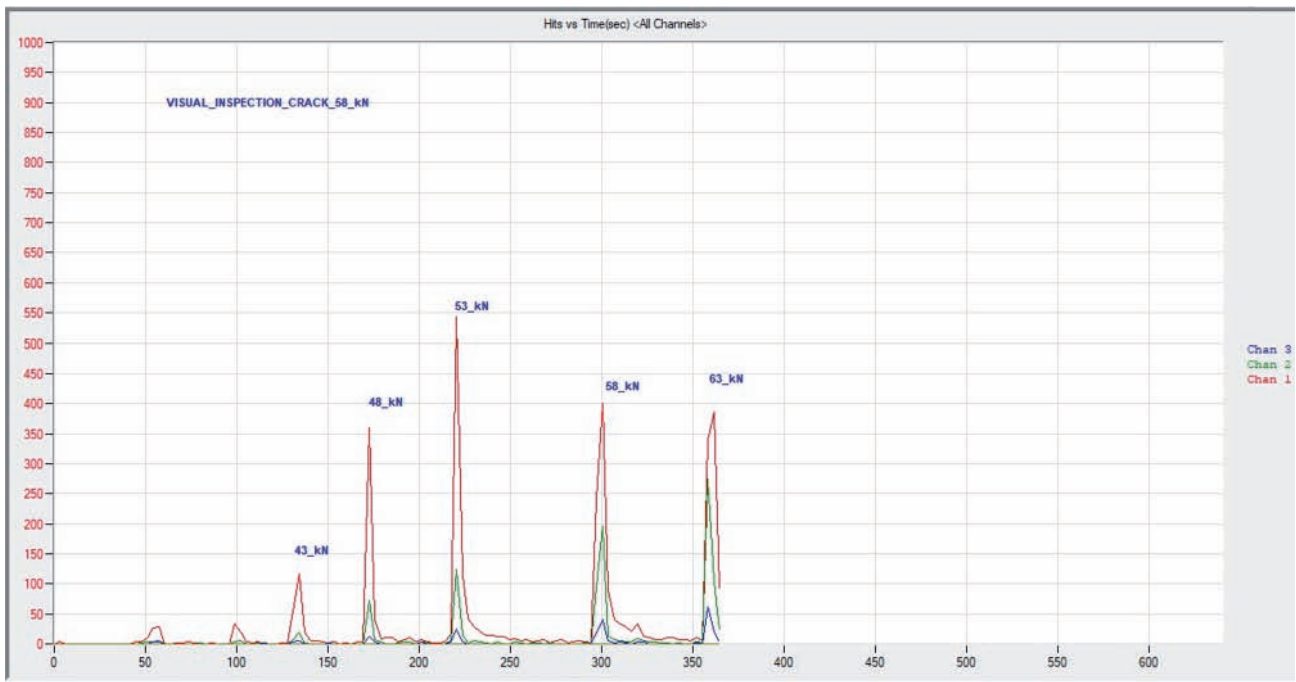
Podczas badania podkładu strunobetonowego dotyczącego wykrywania pierwszej rysy (tzw. badania

inspekcyjne), również była prowadzona rejestracja sygnałów EA. Wyniki badań emisji akustycznej przedstawiają rysunki 17 i 18.

Norma PN-EN 13260 opisuje sposób przeprowadzenia badań obciążeń podkładów w celu określenia momentu pojawienia się pierwszej rysy (określenie parametru Fr_0), co szczegółowo przedstawiono w niniejszym artykule. Ponieważ podkłady



Rys. 17. Przebieg obciążenia podkład _strunobetonowy_1_14 podczas etapu wykrywania rysy (wykres czas energia zdarzeń AE) [opracowanie własne]



Rys. 18. Przebieg obciążenia podkładu strunobetonowego oznaczonego jako N_1_14 podczas etapu wykrywania rysy (liczba zdarzeń AE zarejestrowanych na poszczególnych czujnikach) [opracowanie własne]

strunobetonowe są obiektami bryłowymi (na rysunkach przedstawione w formie 3D), inspekcje wizualne nie są jednak precyzyjne w zakresie określenia parametru F_{r0} . Propagacja rysy ma miejsce w obszarze o najmniejszej wytrzymałości. Zakładając, że takie miejsce może wystąpić w wewnętrznej części podkładu (np. wada materiałowa), inspekcja może takiej wady nie wykryć. W świetle przedstawionych wyników badań, emisja akustyczna może być istotnym wsparciem w prowadzonych badaniach. Należałoby na podstawie większej liczby badań testowych określić oraz zdefiniować poziomy sygnałów uznawanych za pojawienie się rysy/pęknięć w podkładzie strunobetonowym i uzupełnić zapisy w normach.

Na podstawie uzyskanych wyników badań inspekcyjnych wykrywania rysy stwierdzono, że wystąpiły one przy obciążeniu 58 kN (jak opisano na rysunku 18). W odniesieniu do uzyskanych sygnałów AE i analizy tych danych, przy wcześniejszych progach obciążenia podkładu, można stwierdzić, że dla podkładu oznaczonego jako N_1_14 parametr F_{r0} mógłby być określony dla siły obciążenia wynoszącej 48 kN lub 53 kN. Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że inspekcje wizualne w dość dobry sposób pozwalają określić parametr badań F_{r0} , jednak rejestracja sygnałów AE umożliwiłaby bardziej dokładne określenie tego parametru.

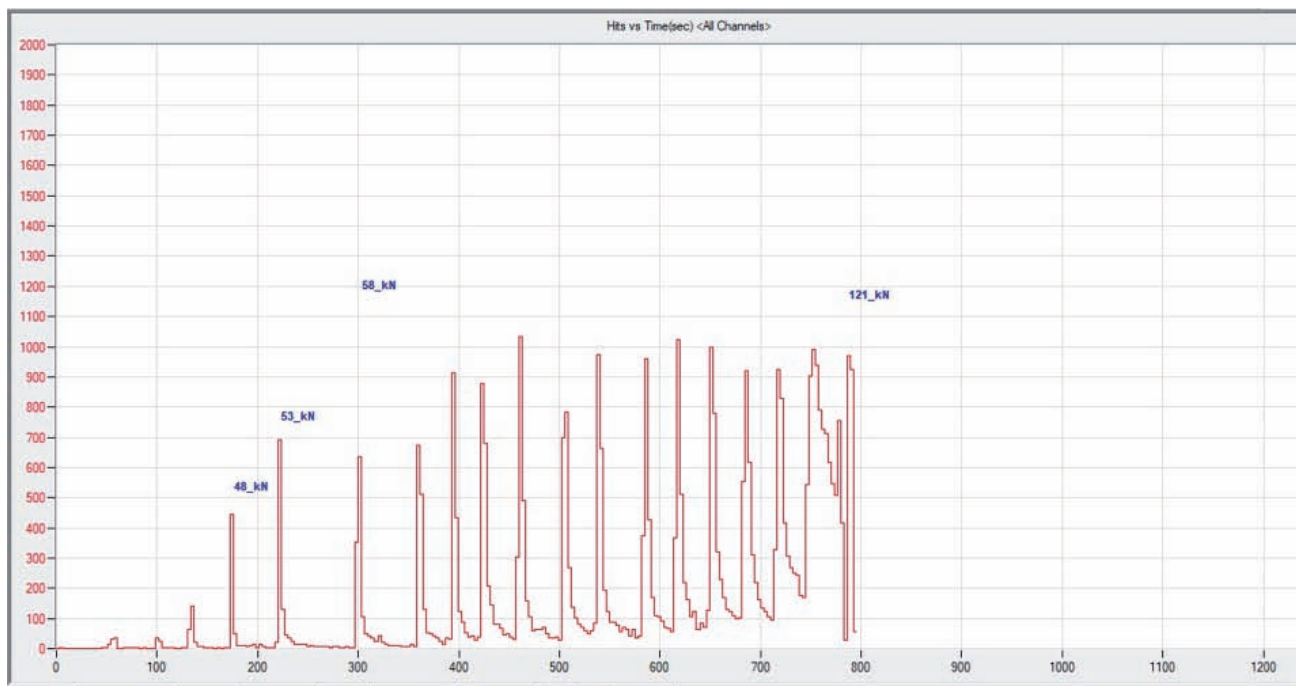
Podczas prowadzenia badania zgodnie z normą PN-EN 13230 [1] wymagana jest ocena konstrukcji badanych podkładów strunobetonowych na poszczególnych jego etapach obciążenia, stwierdzając np.

występowanie tzw. pierwszej rysy czy określenie siły niszczącej F_r/F_{rB} . Jak wykazano, metoda emisji akustycznej może być dużym, dodatkowym wsparciem w prowadzonych badaniach podkładów, może być pomocna w prowadzonych inspekcjach wykrywania rys, pęknięć, jak również, przy zdefiniowanych parametrach zdarzeń AE, umożliwiłaby stwierdzić stan krytyczny obciążenia badanego obiektu (rys. 19).

6. Wnioski

Metoda emisji akustycznej, jako jedna z grupy metod NDT, jest coraz częściej stosowana w różnych obszarach badań przemysłowych. Jak wykazano w artykule również może posłużyć jako dodatkowa metoda oceny stanu konstrukcji podkładów strunobetonowych (lub przywołana w normach, jako alternatywny sposób oceny uszkodzeń, oceny stanu technicznego). Zaletą tej metody jest to, że sygnały uszkodzeń pochodzą z całego badanego obiektu 3D i również można uzyskać informacje o charakterze zniszczeń, które dynamicznie pojawiają się podczas trwania próby / badania (określenie energii zdarzenia). Rejestrowane sygnały wskazują nawet krytyczny stan przed całkowitym zniszczeniem podkładu i umożliwiają na wyznaczenie parametru F_{rB} – siły niszczącej podkład (wymagania normy PN-EN 13230).

Badania i prace naukowe w tym zakresie wprowadzenia metody emisji akustycznej do oceny wszystkich typów podkładów powinny być nadal prowadzone.



Rys. 19. Całkowita energia [aJ] rejestrowana na podstawie zdarzeń AE do zniszczenia podkładu [opracowanie własne]

Implementacja metody emisji akustycznej jako alternatywnej oceny stanu podkładów, ze względu na fakt stosowania różnego typu materiałów używanych do ich budowy jest zagadnieniem złożonym. W przypadku polskiego rynku kolejowego stosowane są podkłady strunobetonowe i podkłady drewniane oraz stalowe (tzw. podkłady „typu Y”), jednak w Europie i na świecie stosuje się także podkłady kompozytowe wykonane z różnych materiałów bazowych, dodatków włókna i materiałów wzmacniających, czy coraz częściej różnych materiałów pochodzących z recyklingu. W takich przypadkach wyznaczenie wspólnych kryteriów oceny dla tak różnych grup materiałów (o różnych właściwościach mechanicznych i charakterystykach materiałowych) czy nawet dla samej grupy podkładów kompozytowych jest zagadnieniem trudnym.

Niemniej nawet dla badań podkładów strunobetonowych metoda emisji akustycznej jest dużym wsparciem w badaniach i dodatkową weryfikacją stanu konstrukcji względem obecnie obowiązujących wymagań. Dalszy rozwój prac badawczych w tym obszarze może również być wsparciem w ocenie konstrukcji w warunkach eksploatacyjnych (np. monitoring stanu podkładów w torze w warunkach eksploatacji).

Literatura

1. WTWIO – PLK PLK: Warunki techniczne wykonania i odbioru podkładów i podrozdnic strunobetonowych Id-101.
2. PN-EN 13230: Kolejnictwo – Tor – Podkłady i podrozdnicze betonowe.
3. Regulamin przydzielania tras pociągów i korzystania z przydzielonych tras pociągów przez licencjonowanych przewoźników kolejowych w ramach rozkładu jazdy pociągów 2016/2017.
4. Załącznik do uchwały Nr 442/2019 Zarząd PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. z dnia 9 lipca 2019 r.
5. Ranachowski Z.: *Pomiary i analiza sygnału emisji akustycznej* [praca habilitacyjna], Prace IPPT – IFTR Reports, ISSN: 2299-3657, 1996, nr 6, s. 1–86.
6. Ranachowski Z.: *Emisja akustyczna w diagnostyce obiektów technicznych*, Drogi i mosty, 2012, s. 65–85.
7. Proust A., Marlot D., Lenain J-C.: *Application of acoustic emission to detect damage in concrete structures, illustrated with full scale examples*.
8. PN-EN 13477-1: Badania nieniszczące – emisja akustyczna – charakteryzowanie aparatury – Część 1: opis aparatury.
9. PN-EN 13477-2: Badania nieniszczące – Emisja akustyczna – Charakteryzowanie aparatury – Część 2 – weryfikacja działania.
10. PN-EN 13554:2011: Badania nieniszczące – Emisja akustyczna – Zasady ogólne.
11. AEwin Express 8 AE Users Manual REV 0 February 2014; Mistras Group.
12. PN-EN 1330-9:2017: Badania nieniszczące – Terminologia – Część 9: Terminy stosowane w badaniach emisją akustyczną.

13. ASTM E976-15:2021: Standard Guide for Determining the Reproducibility of Acoustic Emission Sensor Response.
14. Nabil El-Shaib M.: *Predicting acoustic emission attenuation in solids using ray-tracing within a 3D solid model*, School of Engineering and Physical Sciences Heriot-Watt University, November 2012.
15. Rama Seshu D.: *Badania wpływu poziomu naprężeń na zmiany szybkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej w wybranych rodzajach betonu*, Cement, Wapno, Beton, 2016, nr 5.