

Charakterystyki sygnałów akustycznych podczas obciążania wybranych stali konstrukcyjnych wykorzystywanych do budowy urządzeń ciśnieniowych

Characteristics of acoustic emission signals generated during the loading of selected structural steels used in the construction of pressure equipment

Streszczenie

Badania w statycznej próbie rozciągania z równoczesną rejestracją sygnałów akustycznych w materiałach wykorzystywanych do budowy urządzeń ciśnieniowych, pozwalają istotnie poszerzyć wiedzę o mechanizmach zniszczenia. Badania prezentowane w artykule obejmowały zarówno materiały w stanie dostawy, jak i po długim okresie ich eksploatacji. Celem pracy było poznanie charakterystyk sygnałów emisji akustycznej generowanych w zakresie sprężystym i plastycznym.

Do badań wykorzystano płaskie próbki z karbem i bez karbu. Poddawano je próbom według różnych schematów obciążenia. Pozwoliło to stwierdzić wpływ degradacji na charakterystyki akustyczne stali 15HM. W przypadku stali K18 ujawnił się wpływ wielkości ziarna na otrzymane charakterystyki akustyczne.

Abstract

Static tensile tests with simultaneous recording of acoustic signals generated in the material significantly extend knowledge about the mechanisms of failure. Research conducted in this paper concerned with both the as supplied material, and after a long period of exposure to service conditions. The aim of this study was to identify the characteristics of acoustic emission signals generated in plastic and elastic range of deformations.

Flat notched and un-notched samples were used in this study. The samples were subjected to different loadings representative of in-service conditions. The signals indicating degradation of steel 15HM were determined. In the case of steel K18 the influence of grain size was revealed.

Wstęp

Na przestrzeni ostatnich dziesięcioleci, powstało duże zapotrzebowanie na metody umożliwiające monitorowanie procesów zachodzących w materiałach

pracujących pod długotrwałym działaniem obciążeń, szczególnie w agresywnych warunkach środowiskowych. Szerokie możliwości w tym zakresie dają badania NDT [1]. Badania te szybko znalazły zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu, a ich rozwój obserwowany jest do dziś.

Jedną z technik badawczych do oceny konstrukcji inżynierskich jest metoda Emisji Akustycznej (AT) [2]. Podstawową jej zaletą jest możliwość zbadania całego urządzenia bez przerywania jego pracy. Wynikiem badania jest wskazanie miejsc, w których znajdują

się potencjalne nieciągłości materiału oraz opis ich aktywności [3]. Zastosowanie odpowiednich procedur pozwala również, na podstawie analizy otrzymanych wyników, dokonać klasyfikacji ujawnionych źródeł akustycznych pod względem zagrożenia, jakie stanowią dla badanej konstrukcji.

Prawidłowy pomiar sygnałów emisji akustycznej (AE) wymaga opracowania procedur pomiarowych, indywidualnych dla każdego badanego urządzenia. Procedury te uwzględniają charakter pracy urządzenia – specyfikę stanu obciążenia, jego budowę, i warunki pracy. Dodatkowo, charakterystyka akustyczna materiału ma istotny wpływ na prawidłowość pomiaru oraz interpretację uzyskiwanych wyników. Zależna jest ona m.in. od gatunku materiału, stopnia jego degradacji, wielkości i ułożenia wady, a także od sposobu obciążania w trakcie badania. Charakterystyki akustyczne materiałów wyznaczane są na podstawie badań laboratoryjnych i stanowią wzorzec do interpretacji wyników pomiarów rzeczywistych obiektów przemysłowych.

Metodyka badań

Materiały do badań

Do badań wytypowano następujące gatunki stali: 15HM (13CrMo4-5 wg EN 10028-2 lub A387 (12) wg ASTM) oraz K18 (A105 Gr. B / A106 Gr.B-95 wg ASTM), które są stosowane do budowy urządzeń ciśnieniowych.

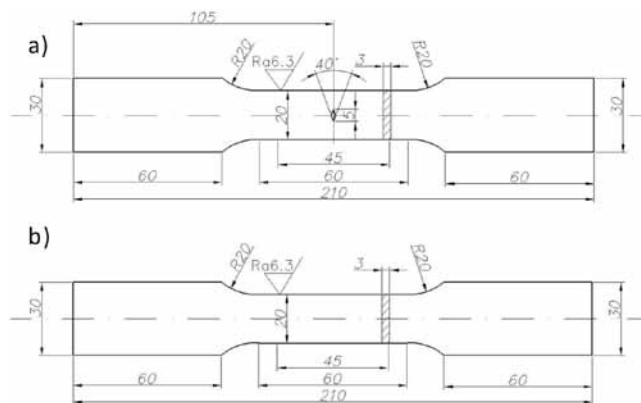
Materiał do badań stanowiły wycinki nieeksploatowane oraz eksploatowane. w rurociągach pracujących w agresywnym środowisku wodoru lub w wysokiej temperaturze. Rurociągi te zostały wyłączone z dalszej eksploatacji ze względu na wykrycie w nich nieciągłości materiałowych w postaci rozwarstwień lub pęcherzy wodorowych oraz postępującej degradacji powierzchniowej, jak i wewnętrznej materiału. Warunki pracy rurociągów zebrano w tablicy I.

Próbki wytrzymałościowe z wycinków zostały wycięte w kierunku równoległym do osi rurociągu wg PN-EN 10002-1:2004 (rys. 1). Dodatkowo wykonano w nich nacięcie (karb) w kształcie podwójnej litery „V” – w środkowej części pomiarowej próbki. W miejscu karbu zostało wytworzone przepięknięcie.

Obecność karbu powoduje lokalny wzrost naprężeń, szczególnie w pobliżu wierzchołków, co ma wpływ na wzrost maksymalnej energii sygnałów AE, przy jednoczesnym wzroście ich czasu trwania.

Tablica I. Warunki pracy badanych materiałów
Table I. Work conditions of tested materials

Stal	Ciśnienie	Temperatura, °C	Środowisko	Czas pracy h
K18	13,2 MPa	54	węglowodory, wódór, siarkowódór, woda, sole amonowe	50 000
15HM	35 bar	530	węglowodory	160 000



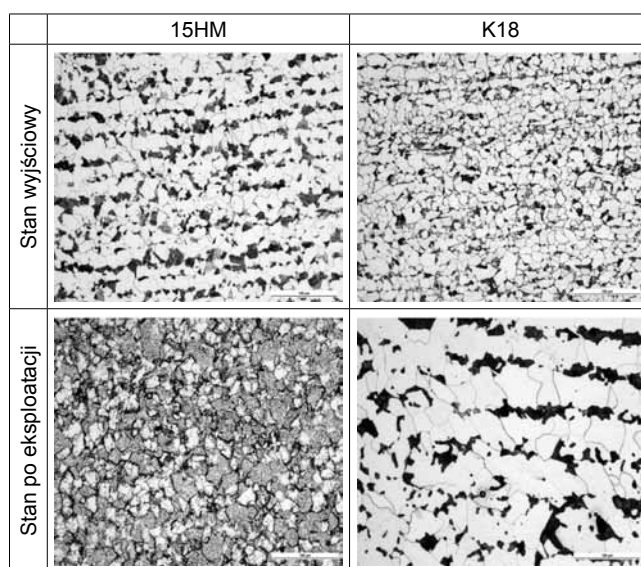
Rys. 1. Kształt i wymiary próbek do badania metodą AT: a) z karbem, b) bez karbu; wymiary w mm

Fig. 1. Shape and dimensions of samples for AT test: a) with notch, b) without notch; dimensions in mm

Rurociąg, z którego pobierano wycinki do badań na skutek warunków pracy uległ degradacji. W stanie wyjściowym wybrane stale te charakteryzują się strukturą ferrytyczno-perlityczną. Badania z wykorzystaniem mikroskopii świetlnej pozwoliły na zobrazowanie mikrostruktury materiałów użytych do badań. Otrzymane obrazy mikrostruktury stali pokazano na rysunku 2.

Próbka ze stali 15HM w stanie po eksploatacji wykazuje cechy degradacji mikrostruktury. Widoczna jest mikrostruktura ferrytyczna z węglkami powstałymi na skutek rozpadu perlitu oraz wydzielania węglków na granicach ziaren. Przemiany te zaszły ze względu na wysoką temperaturę pracy rurociągu.

Mikrostruktura stali K18 w stanie po eksploatacji nie wykazuje śladów degradacji. Biorąc pod uwagę niską temperaturę pracy rurociągu, należy uznać, że obserwowana gruboziarnista struktura powstała podczas wytwarzania elementów rurociągu i jest typowa dla materiału w stanie dostawy.



Rys. 2. Mikrostruktury badanych materiałów, pow. 200x
Fig. 2. Microstructures of tested materials, magn. 200x

Zastosowane techniki badawcze

W celu zbadania charakterystyk sygnałów AE, przeprowadzone zostały badania wytrzymałościowe materiałów z równoczesną rejestracją sygnałów akustycznych. Badania AT w trakcie statycznej próby rozciągania, zostały przeprowadzone na stanowisku badawczym składającym się z aparatury pomiarowej AE oraz maszyny wytrzymałościowej. W skład aparatury pomiarowej wykorzystywanej w badaniach wchodził: system pomiarowy AMSY-5: M6-2 firmy Vallen z sześcioma kartami pomiarowymi ASIP-2 do rejestracji i przetwarzania sygnału AE; czujniki: VS150-RIC, VS160-NS, VS375-M.

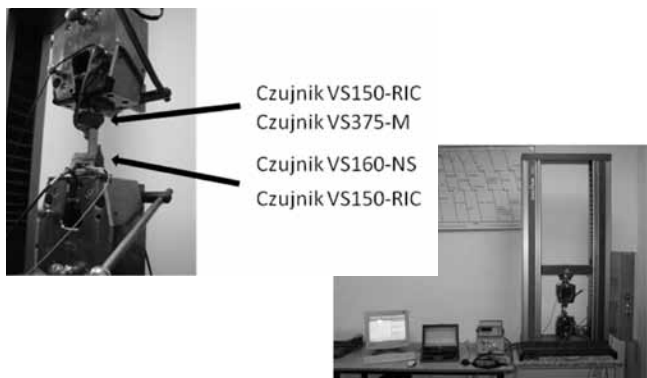
Pomiar AT przeprowadzono przez statyczne rozciąganie próbek bez karbu i z karbem do zerwania.

Dodatkowo porównano wykresy rozciągania stali pod kątem wpływu przebiegu krzywych, na wyniki pomiaru AE.

W pomiarach została użyta statyczna maszyna wytrzymałościowa Zwick/Roell Z050 pracująca w zakresie siły do 50 kN, z klinowymi uchwytami mechanicznymi do próbek płaskich. Schemat stanowiska badawczego został pokazany na rysunku 3.

Badania AT polegały na scharakteryzowaniu sygnałów akustycznych podczas odkształcania materiału. W tym celu analizie i porównaniu poddano szereg parametrów, takich jak: amplituda, częstotliwość sygnałów, liczba zliczeń, energia skumulowana, RMS, czas trwania sygnałów, tempo zliczeń. Parametry te odnoszono zarówno do przyłożonych naprężeń jak i czasu od momentu ich przyłożenia. Stworzono w tym celu wykresy, obrazujące zmiany wartości wybranych parametrów. Obszerność wykonanej analizy, spowodowała, że w artykule umieszczono tylko reprezentatywne wykresy.

Z wytypowanych parametrów w trakcie badania szczególny nacisk skupiono na interpretacji liczby zliczeń przekroczenia poziomu dyskryminacji sygnałów AE, średniej wartości skutecznej sygnału elektrycznego RMS oraz energii sygnałów AE. Parametry te, wg autorów, najlepiej pozwoliły zróżnicować materiał pod względem wpływu postępującej degradacji na charakterystyki akustyczne.



Rys. 3. Stanowisko badawcze do pomiarów AE podczas statycznej próby rozciągania

Fig. 3. Station for AE measurement during static tensile test

Wyniki badań

Pomiar AE zarejestrowany podczas rozciągania próbek ze stali 15HM

Wizualizacja wyników badań AT przy użyciu aplikacji Visual AE™ przedstawiona na rysunku 4, ujawniła zwiększoną aktywność i intensywność sygnałów AE dla materiału po eksploatacji, w porównaniu ze stanem wyjściowym. Podczas rozciągania próbek ze stali 15HM w stanie eksploatacyjnym występują sygnały AE o wyższej amplitudzie. Ponadto, odnotowano większą aktywność AE w tym stanie manifestowaną przez zwiększoną liczbę zarejestrowanych zliczeń sygnałów AE.

Charakterystyczne jest również w materiale po eksploatacji, że dla obu typów próbek, większa liczba sygnałów AE występuje po przekroczeniu granicy plastyczności. Próbki wycięte z materiału w stanie wyjściowym wykazują wyższą intensywność oraz aktywność, występuje w stanie sprężystym. W zakresie wyraźnej granicy plastyczności oraz odkształceń plastycznych, materiał w stanie wyjściowym cechuje się niewielką intensywnością i aktywnością akustyczną.

Statyczne rozciąganie próbek z karbem stali w stanie po eksploatacji ujawnia zwiększoną liczbę zdarzeń w zakresie sprężystym. Intensywność ta maleje po przekroczeniu granicy plastyczności. Do osiągnięcia granicznej wytrzymałości na rozciąganie liczba rejestrowanych sygnałów rośnie nieznacznie. Tuż przed zerwaniem próbki zarejestrowano nagły skok rejestrowanych sygnałów, którą należy tłumaczyć nagłym rozwojem pęknięcia w próbce.

Próbka bez karbu w próbie rozciągania wykazuje znacznie większą aktywność i intensywność AE w stanie sprężystym w porównaniu do próbki bez karbu w tym samym stanie wyjściowym, co może być efektem poddawania próbki z karbem cyklicznym obciążeniom w czasie wytwarzania przedpęknięcia.

Wzrost aktywności akustycznej dla próbki z karbem jest prawdopodobnie związany z obecnością w materiale w stanie po eksploatacji mikro-uszkodzeń w postaci mikropustek, które poddane naprężeniom, generują znaczną liczbę sygnałów akustycznych.

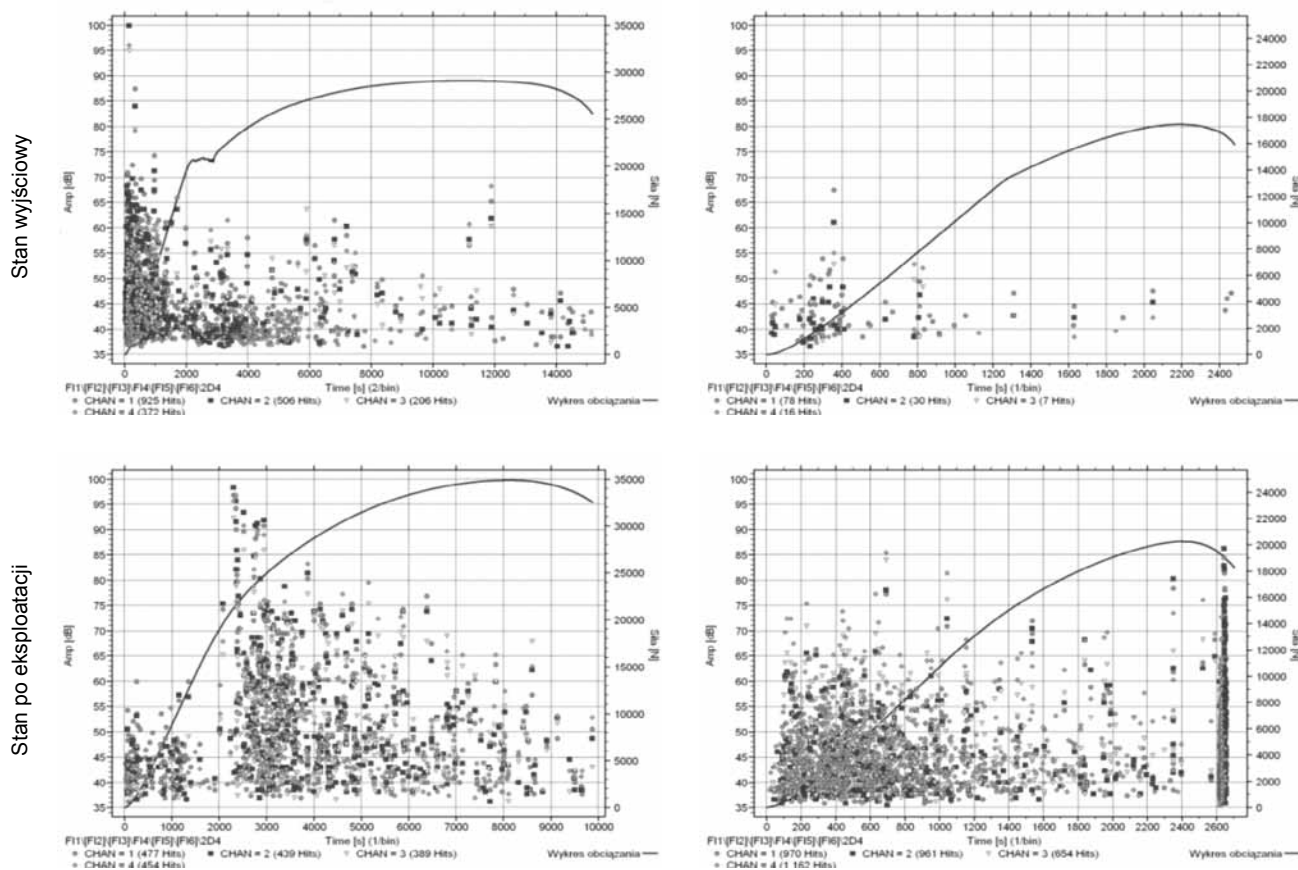
Tablica II. Wartości średnie wybranych parametrów AE zmierzone dla próbek ze stali 15HM

Table II. The average value of selected AE parameters measured for 15HM steel

	Próbki bez karbu		Próbki z karbem	
	Liczba zliczeń powyżej progu dyskryminacji	Energia Eu	Liczba zliczeń powyżej progu dyskryminacji	Energia Eu
Stan wyjściowy	11	27	9	9
Stan po eksploatacji	48	88	30	38

Próbki bez karbu

Próbki z karbem



Rys. 4. Amplituda sygnałów AE oraz obciążenie próbki w funkcji czasu podczas statycznej próby rozciągania próbek ze stali 15HM
Fig. 4. AE signals amplitude and load as the time function in the static tensile test of 15HM steel

Na przedstawiony powyżej charakter intensywności i aktywności akustycznej przekładają się wartości parametrów: zliczeń powyżej progu dyskryminacji oraz energii sygnałów AE. Dla próbek w stanie po eksploatacji wartości tych parametrów są dużo wyższe niż dla materiału w stanie wyjściowym, co pokazuje tablica II.

Pomiar AE zarejestrowany podczas rozciągania próbek ze stali K18

Wyniki dla próbek wykonanych ze stali K18 przedstawiono na rysunku 5 w postaci wykresów amplitudy sygnałów AE w funkcji czasu rejestracji dla próbek w stanie po eksploatacji oraz w stanie wyjściowym. Jako miarę intensywności procesów akustycznych zastosowano zatem wielkość amplitudy [4]. Z kolei o aktywności procesu świadczy liczba zarejestrowanych zdarzeń.

Porównując uzyskane wykresy amplitudy w funkcji pomiaru dla stali K18, możemy zaobserwować, że sygnały dla próbki eksploatowanej charakteryzują się niższą intensywnością, co po eksploatacji można wytłumaczyć gruboziarnistą strukturą badanego materiału.

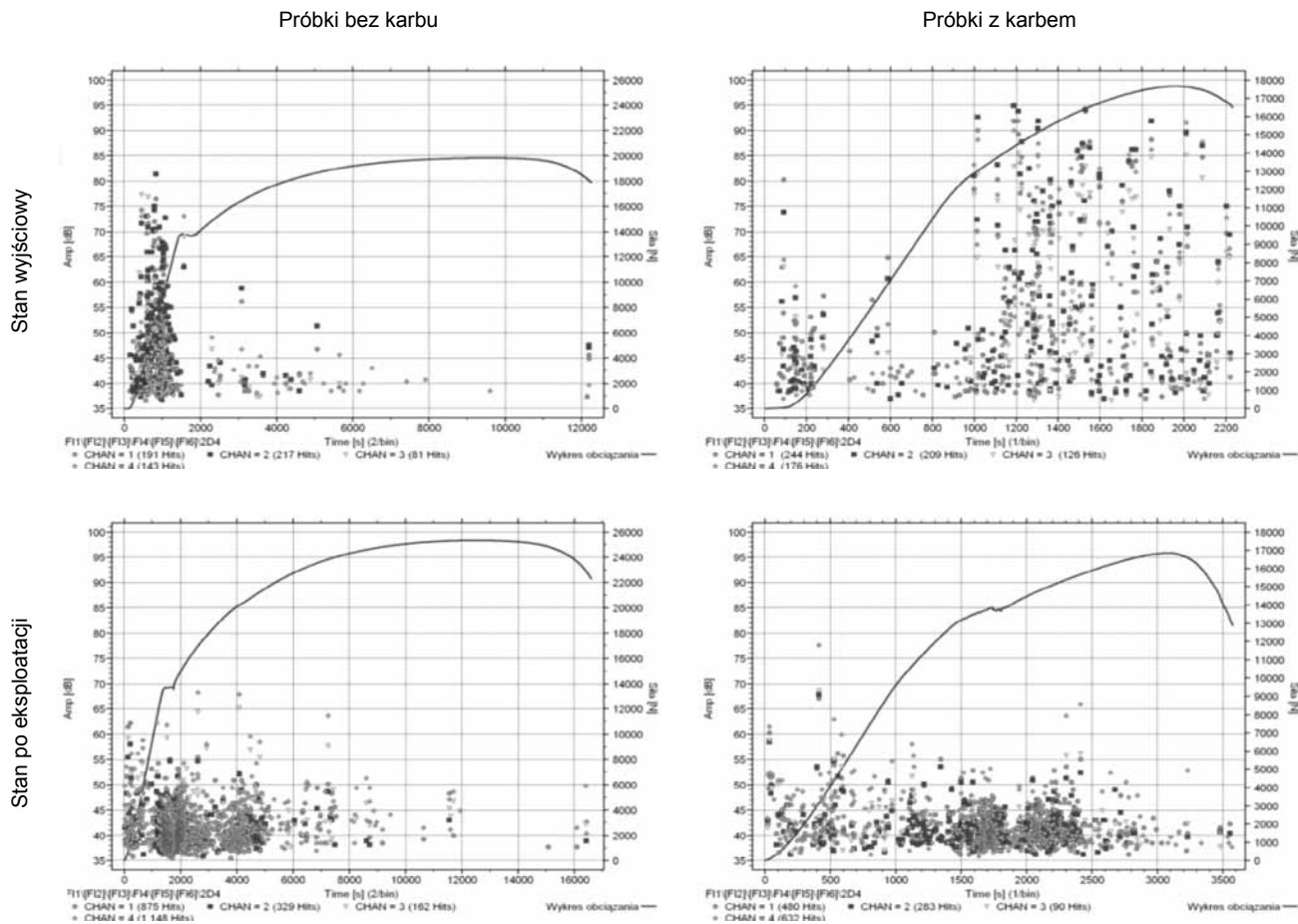
Jednocześnie sygnały zarejestrowane dla próbek w stanie po eksploatacji cechują się większą aktywnością, co przejawia się ich większą liczbą.

Podobnie jak dla stali 15HM, opisana intensywność i aktywność parametrów AE również odwzorowuje się w przytoczonych parametrach sygnałów AE. Na niską intensywność sygnałów AE zarejestrowanych podczas rozciągania stali K18 materiału w stanie po eksploatacji przekłada się adekwatnie niska energia oraz mała liczba zliczeń powyżej progu dyskryminacji, co przedstawia tablica III.

Tablica III. Wartości średnie wybranych parametrów AE zmierzone dla próbek ze stali K18

Table III. The average value of selected AE parameters measured for K18 steel

	Próbki bez karbu		Próbki z karbem	
	Liczba zliczeń powyżej progu dyskryminacji	Energia E_u	Liczba zliczeń powyżej progu dyskryminacji	Energia E_u
Stan wyjściowy	16	20	61	192
Stan po eksploatacji	5	5	5	5



Rys. 5. Amplituda zarejestrowanych sygnałów AE oraz obciążenie próbki w funkcji czasu podczas statycznej próby rozciągania próbek ze stali K18

Fig. 5. AE signals amplitude and load as the time function in the static tensile test of K18 steel

Wnioski

Uzyskane w trakcie badań wyniki świadczą, że degradacja materiałów w toku ich wieloletniej eksploatacji, skutkuje charakterystycznymi sygnałami AE podczas obciążania.

Interpretacja sygnałów AE, zbieranych podczas badań w terenie urządzeń ciśnieniowych po różnym okresie pracy (stopniu degradacji), może zostać w znacznym stopniu poszerzona poprzez analizę sygnałów zarejestrowanych w próbkach materiałów o porównywalnej historii pracy poddanych obciążeniu w warunkach laboratoryjnych. Ważne jest przy tym zastosowanie odpowiednich warunków obciążenia adekwatnych do warunków pracy urządzenia. Ponadto należy rozpatrzyć stan naprężeń, w jakich pracował dany materiał w celu uwzględnienia wpływu efektu Kaisera [5, 6].

Skuteczna analiza wymaga rozpatrzenia wielu parametrów sygnałów AE oraz ich wzajemnej zależności. Przedstawione w pracy charakterystyki sygnałów AE umożliwiły uwypuklenie różnic, w zależności od typu materiału, jego stanu oraz charakteru zniszczenia.

Literatura

- [1] PN-EN 473:2008: Badania nieniszczące. Kwalifikacja i certyfikacja personelu badań nieniszczące. Zasady ogólne.
- [2] PN-EN 1330-9:2009: Badania nieniszczące. Terminologia. Część 9. Terminy stosowane w badaniach emisją akustyczną.
- [3] Zagórski A., Spychalski W. L., Schmidt J., Kurzydłowski K. J.: Nowoczesne metody badania zbiorników i rurociągów.
- [4] Baranov V., Kudryavtsev E., Sarychev G., Schavelin V.: Acoustic emission in friction, tribology and interface engineering series no. 53 series editor: B. J. Briscope Elsevier.
- [5] Malecki I., Ranachowski J.: Emisja akustyczna, źródła, metody, zastosowania; Biuro Pascal, Warszawa, 1994.
- [6] Materiały szkoleniowe Physical Acoustic Corporation, Level II NDT Encyklopedia.
- [7] Karczewski R.: Wyznaczanie charakterystyk sygnałów akustycznych generowanych podczas obciążania wybranych stali konstrukcyjnych wykorzystywanych do budowy urządzeń ciśnieniowych; praca magisterska, Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Materiałowej, 2009.