dr inż. Tomasz Lusa[1)]
dr inż. Jan Płowiec[1)]
dr inż. Maciej Szwed[1)]
dr inż. Łukasz Sarniak[1)]
dr inż. Daria Wotzka[2)]

Identyfikacja uszkodzeń rurociągów kriogenicznych metodą emisji akustycznej

Flaws identification in cryogenic pipelines using acoustic emission method

DOI: 10.15199/33.2015.08.16

Streszczenie. Celem badań realizowanych w ramach programu NCBR LIDER III było opracowanie rozwiązania umożliwiającego identyfikację uszkodzeń rurociągów kriogenicznych, bez konieczności wyłączania ich z eksploatacji, z zastosowaniem jako głównej metody emisji akustycznej (AE). Jej właściwości i duże możliwości aparaturowe pozwalają na wykrywanie i identyfikowanie aktywnych uszkodzeń w całej objętości materiału użytego do budowy rurociągu. W artykule przedstawiono wybrane wyniki badań rurociągu, stanowiące podstawę do opracowania procedur badawczych i kryteriów diagnozowania.
Słowa kluczowe: emisja akustyczna, rurociągi, kriogenika, diagnostyka.

Abstract. The aim of the research carried out under the NCBR LEADER III program, was to create a solution that enables to perform diagnostic tests of cryogenic pipelines in the real operating conditions using an acoustic emission technique (AE), as leading methods. The features of this method and the wide range of equipment that may be used for detecting, localizing and identifying active defects in the entire volume of the material used for the construction of a pipeline. This paper presents selected results of pipelines investigation as the base for development of test procedures and grading criteria.
Keywords: acoustic emission, pipelines, cryogenics, diagnostic.

Obciążenia eksploatacyjne rurociągów do transportu substancji chemicznych o temperaturze poniżej –100 °C powodują uszkodzenia konstrukcji i połączeń spawanych w postaci ubytków powierzchniowych oraz nieciągłości struktury materiału. Po osiągnięciu wartości krytycznej uszkodzenia mogą spowodować niekontrolowane zniszczenie obiektu, co zagraża bezpieczeństwu [1]. W praktyce okresowa inspekcja i dopuszczenie do dalszego użytkowania bazują na nie w pełni obiektywnych badaniach polegających głównie na punktowych pomiarach grubości płaszcza rurociągu. Oznacza to, że dopuszczenie rurociągu do dalszej eksploatacji nie wyklucza pominięcia uszkodzeń zagrażających bezpieczeństwu. Taki stan uzasadnia opracowanie rozwiązania, które po wdrożeniu do praktyki umożliwi ocenę zdolności eksploatacyjnej rurociągu bez konieczności wyłączania z eksploatacji.

Metoda emisji akustycznej

Metoda badań nieniszczących bazująca na zjawisku emisji akustycznej (AE) umożliwia detekcję, lokalizację i analizę uszkodzeń obiektów technicznych. Terminem *emisja akustyczna* określa się chwilowe fale sprężyste wywołane przez gwałtowne wyzwolenie energii zgromadzonej w materiale. Fale są generowane w tzw. źródłach AE w wyniku bodźca zewnętrznego, np. w postaci naprężenia, ciśnienia, gradientu temperatury, pola magnetycznego i rozchodzą się ze źródła do powierzchni materiału, gdzie mogą być rejestrowane przez odpowiednie przetworniki odbiorcze. W metalach podstawowym źródłem AE jest wzrost pęknięć. Pod wpływem np. naprężeń defekty te mogą ulegać propagacji, dzięki czemu stają się aktywnymi źródłami AE, stwarzając możliwość detekcji powstającego zagrożenia [2, 3].

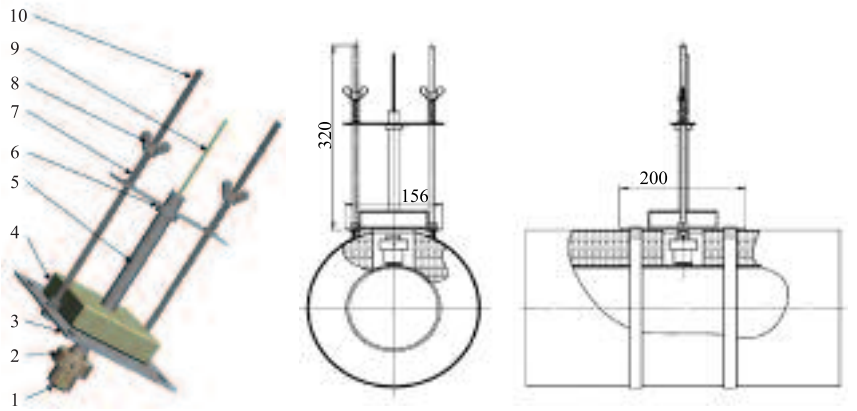
Aparatura badawcza

W pierwszym etapie badań opracowano, w kooperacji z firmą Score Atlanta Inc. – producentem sprzętu do badań emisji akustycznej, czujnik emisji akustycznej, pracujący w sposób stabilny w temperaturze do –160 °C i częstotliwości 150 kHz, który charakteryzuje się doskonałą czułością wykrywania pęknięć (fotografia). Odpowiednie sprzężenie akustyczne pomiędzy czujnikiem pomiarowym a powierzchnią badanego obiektu zapewniły zaproponowane **ośrodki sprzęgające AG-1** i **AG-2**, stanowiące mieszaninę propanolu i gliceryny. Wymagane warunki sprzężenia akustycznego uzyskano w temperaturze –160°C. Wyniki średniego poziomu szumu i średniej amplitudy sygnałów akustycznych przy temperaturze ścianki –186°C wskazują na możliwość zastosowania ośrodków sprzęgających nawet w niższej temperaturze.

Prace badawcze miały na celu opracowanie również uchwytu zapewniającego równomierny docisk czujnika emisji akustycznej do powierzchni badanego obiektu. W konstrukcji uchwytu montażowego (rysunek 1) zastosowano izolację termiczną zapobiegającą tworzeniu się mostków termicznych na skutek różnicy temperatury pomiędzy powierzchnią rurociągu a otoczeniem. Głowica utrzymująca czujnik może poruszać się w dwóch płaszczyznach, niezależnie od pozostałej części uchwytu. Dzięki temu czujnik „dopasowuje się" do krzywizny powierzchni rurociągu, zwiększając precyzję detekcji sygnałów AE. Śro-

Czujnik emisji akustycznej do badań w niskiej temperaturze
Low temperature acoustic emission sensor

[1)] Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Materiałowej
[2)] Politechnika Opolska, Wydział Elektroniki, Automatyki i Informacji
[*)] Autor do korespondencji:
e-mail: tlusa@inmat.pw.edu.pl



Rys. 1. Schemat uchwytu montażowego czujników emisji akustycznej: 1 – czujnik AE; 2 – przegub; 3 – blacha aluminiowa; 4 – izolacja termiczna; 5 – rurka; 6 – pierścień dystansowy; 7 – sprężyna; 8 – śruba dociskowa; 9 – przewód do podawania sprzęgacza; 10 – szpilka z gwintem
Fig. 1. Scheme of acoustic emission sensor holder

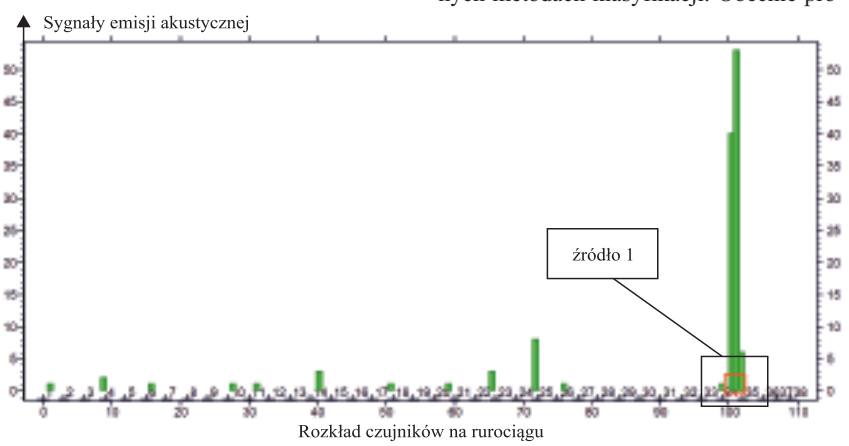
dek sprzęgający jest tłoczony bezpośrednio na powierzchnię styku czujnika ze ścianką rurociągu przez specjalny przewód wbudowany w konstrukcję uchwytu.

Badania rurociągu metodą emisji akustycznej

Do prac badawczych będących przedmiotem realizowanego projektu wytypowano odcinek rurociągu w stanie czynnej eksploatacji, którego parametry przedstawiono w tabeli. Badania rurociągu bez zmiany jego parametrów pracy wykonano metodą emisji akustycznej. Wykorzystano 38 czujników pomiarowych. Liczbę czujników dobierano na podstawie stopnia tłumienia fali akustycznej w materiale rurociągu. Warunkiem prawidłowej lokalizacji źródeł AE było zachowanie odpowiedniej odległości pomiędzy czujnikami. Powinna ona być mniejsza od odległości, na jakiej fala akustyczna ulega wytłumieniu od 100 do 40 dB. Wyniki badań w postaci lokalizacji liniowej sygnałów emisji akustycznej na badanym rurociągu zaprezentowano na rysunku 2.

Parametry rurociągu wytypowanego do badań
Pipeline parameters within selected for the study

Parametr	Wielkość
Rok budowy	1979 r.
Średnica nominalna [mm]	15,24
Grubość ścianki [mm]	7,1
Ciśnienie robocze [MPa]	4,02
Prędkość przepływu medium [kg/h]	2166
Minimalna temperatura pracy [°C]	-163
Materiały	stal nierdzewna 304
Transportowany gaz	mieszanina H_2 + CO + CO_2 + H_2S + CH_4



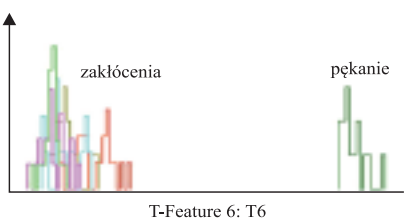
Rys. 2. Wyniki lokalizacji liniowej sygnałów emisji akustycznej na badanym rurociągu
Fig. 2. Linear location of acoustic emission signals on investigated pipeline

Na podstawie analizy danych pomiarowych źródło emisji akustycznej (oznaczone na rysunku 2 jako źródło 1) zlokalizowano pomiędzy czujnikami 34 – 35. Zweryfikowano je za pomocą techniki ultradźwiękowej *phased array* z wykorzystaniem głowicy kątowej 2 MHz i określono jako pęknięcie w spoinie doczołowej. Badanie ultradźwiękowe pozwoliło określić podstawowe cechy geometryczne pęknięcia, natomiast wyniki stanowiły punkt wyjściowy do dalszych badań.

Klasyfikacja sygnałów AE

Klasyfikację sygnałów akustycznych generowanych przez źródła AE przeprowadzono na podstawie aplikacji VisualClass™ bazującej na metodzie wzorców uczących (*pattern recognition*). Wykorzystuje ona statystyczną klasyfikację charakterystycznych cech częstotliwościowo-czasowych sygnałów, przez kojarzenie podobnych typów kształtów fal w tzw. klasy. Pozwala to na uzyskanie maksymalnego podobieństwa sygnałów w danej klasie, z jednoczesnym różnicowaniem klas.

Sygnały akustyczne zarejestrowane podczas pomiarów emisji akustycznej rurociągu poddano filtracji polegającej na wyodrębnieniu przebiegu o podobnym kształcie i widmie amplitudowo-częstotliwościowym. Stanowiły one pierwszy strumień danych wprowadzonych do aplikacji VisualClass™ określony tzw. prototypem procesów pękania. Podobnie postąpiono z grupą sygnałów pochodzących z różnego typu zakłóceń. Uzyskano pięć klas sygnałów akustycznych, których separację pokazano na rysunku 3. Wyniki wskazują, że odseparowanie zakłóceń generowanych w trakcie pracy rurociągu od istotnych sygnałów akustycznych jest możliwe przy zaproponowanych metodach klasyfikacji. Obecnie prowadzone są prace badawcze nad budową klasyfikatora sygnałów AE, pozwalającego separować zakłócenia w sposób automatyczny w trakcie prowadzenia badań rurociągu metodą emisji akustycznej.



Rys. 3. Wizualizacja separacji klas sygnałów emisji akustycznej pochodzących od pękania i zakłóceń
Fig. 3. Visualization of class separation of acoustic emission signals generated by crack process and noises

Metody symulacyjne

W celu określenia wpływu czynników geometrycznych uszkodzenia na jego aktywność i intensywność akustyczną w warunkach eksploatacyjnych wykorzystano

modelowanie matematyczne. Geometrię obiektu badań, zbudowaną w środowisku COMSOL Multiphysics, podzielono na obszary i podobszary. Następnie określono fizykochemiczne parametry poszczególnych obszarów, dobrano strukturę i liczbę elementów siatki dyskretyzacyjnej oraz zdefiniowano źródła fali AE w modelu symulacyjnym dla tego kształtu.

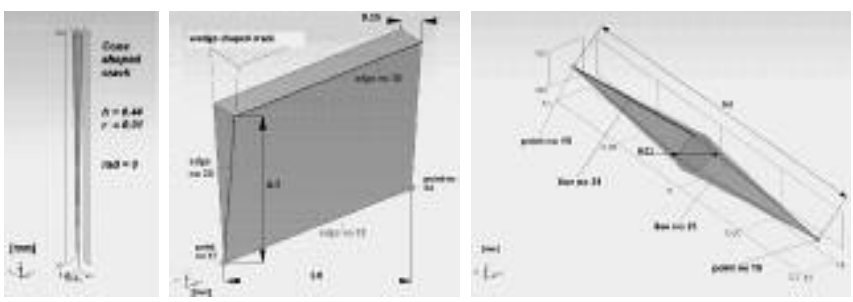
Przebadano, w stanie ustalonym, rozkład naprężeń, przemieszczeń oraz ciśnienia akustycznego wewnątrz szczeliny (pęknięcia) wywołanych działaniem ciśnienia w rurociągu i ujemnej temperatury gazu. Zadania realizowano przez integrację liniowych cząstkowych równań różniczkowych opisujących pole przemieszczeń w ciałach stałych i równań przepływu ciepła w przestrzeni trójwymiarowej. W badaniach zaproponowano trzy modele szczeliny (rysunek 4):

- **model 1** – stożek o podstawie koła, którego wierzchołek skierowany jest do środka rury (radial crack); dla tego kształtu szczeliny przeprowadzono symulację parametryczną, w której zmieniano orientację stożka, tj. kąt nachylenia osi symetrii stożka względem osi symetrii rury;
- **model 2** – klin skierowany do środka rury; dla tego kształtu szczeliny przeprowadzono symulację parametryczną, w której zmieniano orientację klina;
- **model 3** – dwa złączone ze sobą stożki o podstawie koła, które zorientowane są równolegle względem osi symetrii rury.

Wyniki wskazują, że największe wartości poziomów mocy akustycznej wewnątrz szczeliny uzyskano w przypadku modelu ze szczeliną w kształcie klina nachylonego pod kątem rad = –20°, tj. 355,7 dB, natomiast największe wartości naprężeń „von Mises" w przypadku modelu ze szczeliną w kształcie klina nachylonego pod kątem rad = –10°, i dla modelu ze szczeliną w kształcie stożka nachylonego pod kątem rad = +10°, tj. ok. 200 MPa. Zwiększenie nachylenia szczeliny względem osi rurociągu spowoduje zmniejszenie naprężeń wokół wierzchołków, a jednocześnie zmniejszenie intensywności emisji akustycznej generowanej wewnątrz szczeliny. W przypadku szczeliny w kształcie podwójnego stożka największe naprężenie w strukturze rurociągu i intensywność emisji akustycznej występują, gdy jest ona skierowana prostopadle do osi symetrii rury.

Celem badań symulacyjnych **interakcji fali ultradźwiękowej z pęknięciem w spoinie** była optymalizacja procesu diagnostycznego w kontekście skuteczności detekcji uszkodzenia. Oprogramowanie do symulacji umożliwia modelowanie propagacji fali ultradźwiękowej oraz jej interakcji z defektami w przypadku różnych głowic, defektów (rozwarstwień, pęknięć, wtrąceń, pustek), materiałów oraz technik badawczych (technika echa, tandem, TOFD, *phased array*) [4, 5, 6]. Połączenia spawane badano za pomocą defektoskopu ultradźwiękowego z systemem *phased array* i głowicą wieloprzetwornikową. Dla założonego układu pomiarowego opracowano modele numeryczne uwzględniające wymiary badanego obiektu oraz parametry systemu badawczego. Przeprowadzono na nich wiele symulacji numerycznych, na podstawie których dobrano rodzaj głowicy wieloprzetwornikowej, przekładkę kątową (tzw. klin) oraz parametry systemu *phased array*, takie jak: tryb pomiarowy, apertura aktywna głowicy i zakres kątowy głowicy. Ustalono także optymalną lokalizację głowicy ultradźwiękowej względem powierzchni badanego elementu.

Analiza wyników symulacji numerycznej wykazała, że wskazania pochodzące od zaimplementowanych modeli nieciągłości występujących w obrębie połączenia spawanego mają amplitudę umożliwiającą ich skuteczne wykrycie i precyzyjny opis cech geometrycznych. Wiązka fal ultradźwiękowych, padająca na różnie usytuowane i zorientowane wady, odbija się w sposób umożliwiający jej powrót do głowicy ultradźwiękowej. Nie stwierdzono występowania dodatkowych wskazań pozornych lub wskazań pochodzących od geometrii obiektu, mogących zakłócać echa ewentualnych nieciągłości. Zastosowanie opracowanej metodyki badawczej gwarantuje duże prawdopodobieństwo wykrycia wad.



model 1 model 2 model 3

Rys. 4. Modele szczeliny wykorzystane w badaniach symulacyjnych
Fig. 4. Crevice models used in simulations

Podsumowanie

Wyniki przeprowadzonych badań przedstawione w artykule stanowią realizację założeń Projektu, czyli opracowanie metodycznych procedur badawczych emisji akustycznej i ultradźwiękowej techniki *phased array* w diagnostyce eksploatowanych rurociągów kriogenicznych. Obecnie prowadzone badania mają na celu wyznaczenie kryteriów akceptacji uszkodzeń w obu metodach badawczych na podstawie uzyskanych wyników modelowania.

Opracowane rozwiązanie charakteryzowania uszkodzeń eksploatacyjnych rurociągów kriogenicznych bez konieczności wyłączania ich z eksploatacji przyczyni się do optymalizacji czasu trwania planowanych przerw w pracy instalacji, wydłużenia czasu eksploatacji między tymi przerwami oraz eliminacji niekontrolowanych przerw awaryjnych.

Prace badawcze zaprezentowane w artykule zostały w całości sfinansowane przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach Programu LIDER III Nr LIDER/18/44/L--3/NCBR/2012 pod tytułem „Metodyka charakteryzowania, w rzeczywistym stanie degradacji, materiału i połączeń spawanych ciśnieniowych rurociągów do transportu substancji chemicznych o temperaturze poniżej –100 °C z wykorzystaniem emisji akustycznej".

Literatura

[1] Paradowski K., Spychalski W. L., Płowiec J., Lusa T., Zagórski A., Kurzydłowski K. J.: Application of acoustic emissions to technical evaluation of new pressure devices; European Working Group on Acoustic Emission, Kraków 2008.

[2] Miller R. K., McIntire P.: Nondestructive Testing Handbook. Volume 5. Acoustic Emission Testing; ASNT, 12 – 14, 17, 18 (1987).

[3] PN-EN 1330-9:2009: Badania nieniszczące. Terminologia. Część 9: Terminy stosowane w badaniach emisją akustyczną; PKN Warszawa (2009).

[4] Calmon P., Mahaut S., Chatillon S., Raillon R., CIVA: An expertise platform for simulation and processing NDT data, Ultrasonics 44, 2006.

[5] Calmon P., Leberre S., Sollier T., Benoist P., CIVA, An integration software platform for the simulation and processing of NDT data, Review of Progress in QNDE, 2006.

[6] Lonné S. Roumilly, Le Ber L., Experimental validation of CIVA ultrasonic simulations, 5th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, USA, 2006.

Przyjęto do druku: 19.06.2015 r.