

Igor Lyasota¹, Łukasz Sarniak^{2*}, Piotr Kustra³¹Politechnika Krakowska²Politechnika Warszawska³Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

Emisja akustyczna w zastosowaniu do oceny stanu materiału urządzeń ciśnieniowych poddanych długotrwałej eksploatacji w instalacjach przemysłu rafineryjnego

The material condition evaluation of pressure vessels after long term operation in the refinery industry with using acoustic emission method

ABSTRACT

The paper presents results obtained from the complex destructive tests with acoustic emission recording on real pressure vessel after long-term operation in the refinery industry. The vessel has been operated in the refinery industry for 45 years. A lot of corrosion damages were present on the inner surface of the vessel shell as a result of long-term operation. The material's microstructure of some shell plates was coarse-grained, which arose from improper heat treatment during plates manufacturing. The investigations, presented in this paper, were realized within the project of LIDER VII Program financed by the National Centre for Research and Development of Poland.

Keywords: *acoustic emission; pressure equipment, material degradation, carbon steel*

STRESZCZENIE

W ramach artykułu zostały wykonane kompleksowe badania stanowiskowe rzeczywistego zbiornika ciśnieniowego polegające na próbie hydraulicznej z rejestracją sygnałów emisji akustycznej. Badane urządzenie było eksploatowane od ponad 40 lat jako część instalacji destylacji ropy naftowej. Materiał płaszcz zbiornika zawierał liczne uszkodzenia korozyjne, które zostały zidentyfikowane oraz odwzorowane za pomocą szczegółowych badań metodą ultradźwiękową z wykorzystaniem techniki Phased Array. Dodatkowo materiał niektórych blach płaszczu charakteryzował się gruboziarnistą ferrytyczno-perlityczną mikrostrukturą, wynikającą z nieprawidłowej obróbki cieplnej na etapie wytwarzania urządzenia. W celu określenia pola naprężeń w płaszczu zbiornika wykonano szczegółowy model numeryczny uwzględniający ww. uszkodzenia. Wyniki wykonanych badań stanowią bazę do opracowania złożonej metodyki oceny stanu technicznego urządzeń ciśnieniowych przemysłu rafineryjnego – głównego celu projektu badawczego Programu LIDER VII sfinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

Słowa kluczowe: *emisja akustyczna; urządzenia ciśnieniowe, degradacja materiału, stal węglowa*

1. Wstęp

Urządzenia ciśnieniowe, eksploatowane w instalacjach przemysłu rafineryjnego, pracują głównie w warunkach wyjątkowo ekstremalnych, polegających na jednoczesnym oddziaływaniu agresywnych mediów roboczych oraz zmiennych ciśnieniach. Większość urządzeń z lat 60-70-tych zawiera w materiale płaszczu ukryte wady technologiczne, powstałe przykładowo na skutek odstępstw od technologii wytwarzania. Długotrwała eksploatacja takich obiektów oraz ukryte wady technologiczne powodują występowanie uszkodzeń materiału konstrukcyjnego i połączeń spawanych w postaci nieciągłości, ubytków powierzchniowych oraz zmian strukturalnych w objętości materiału. Rozwój wymienionych wyżej ukrytych defektów, w warunkach obciążeń roboczych, może doprowadzić do ich niestabilnego stanu, a w konsekwencji awarii obiektu lub nawet całej instalacji.

*Autor korespondencyjny. E-mail: lukasz.sarniak@pw.edu.pl

W związku z powyższym, w celu podniesienia bezpieczeństwa oraz niezawodności urządzeń ciśnieniowych, eksploatowanych przez wiele lat w przemyśle petrochemicznym i rafineryjnym, jest coraz większe zapotrzebowanie na nowe metodyki diagnostyczne, pozwalające na dokładną ocenę stanu technicznego ww. urządzeń ze szczególnym uwzględnieniem degradacji materiału.

Badania zrealizowane w ramach niniejszego artykułu miały na celu opracowanie podstaw nowej metodyki diagnostycznej ukierunkowanej na ocenę stanu technicznego urządzeń ciśnieniowych po ich długotrwałej eksploatacji. Stwierdzono, iż jedynie kompleksowe zastosowanie metod i technik badawczych, w celu oceny stanu technicznego urządzenia, umożliwi pełną i dokładną analizę zmian zachodzących w materiale. W tym kontekście zaproponowano metodykę diagnostyczną bazującą głównie na kompleksowych badaniach metodą emisji akustycznej (AE) oraz badaniach materiałowych z wykorzystaniem technik przenośnych, jak również analizach numerycznych MES rozkładu

poła naprężeń, które wskażą „wrażliwe” strefy koncentracji naprężeń. Interpretacja wyników tych badań i analiz, a także znalezienie wzajemnych korelacji pozwoli na skuteczne rozwiązywanie aktualnych problemów diagnostyki instalacji petrochemicznych i rafineryjnych związanych z oceną ich stanu technicznego i określeniem warunków dalszej eksploatacji, w szczególności tych urządzeń, w których na skutek długotrwałej pracy występują niekrytyczne uszkodzenia.

Pierwsze próby stosowania metody AE do badań przemysłowych urządzeń ciśnieniowych podjęto w latach 70-tych ubiegłego wieku [1-4], podczas których pokazano skuteczność danej metody badawczej. W miarę rozwoju aparatury pomiarowej oraz metod obróbki sygnału, rosły możliwości stosowania AE do rozwiązywania problemów przemysłowych, jak również diagnostyki urządzeń ciśnieniowych, tak w Polsce, jak i zagranicą [5-7]. Aktualnie opracowano szereg norm i procedur [8-10] określających zasady badania tego typu konstrukcji metodą AE. Są one skoncentrowane głównie na charakteryzowaniu aktywności oraz lokalizowaniu źródeł AE, jednak nie opisują procesów zachodzących w materiale, które wywołują emisję fal sprężystych.

W Stanach Zjednoczonych opracowano technologię MONPAC [11], która za pomocą parametrów Severity oraz Historic Index pozwala na ocenę stanu urządzeń przemysłowych. Kryteria te są oparte na licznej bazie analizowanych przypadków i są powszechnie stosowane w praktyce przemysłowej.

W literaturze znane są nieliczne próby [12-14] stosowania do oceny degradacji materiału obiektów przemysłowych jednocześnie kilku technik badań nieniszczących, takich jak: badania metodą AE w połączeniu z szczegółową analizą stanu materiału poprzez realizację badań z wykorzystaniem technik przenośnych (przykładowo badań metalograficznych z użyciem przenośnej mikroskopii świetlnej (PMS).)

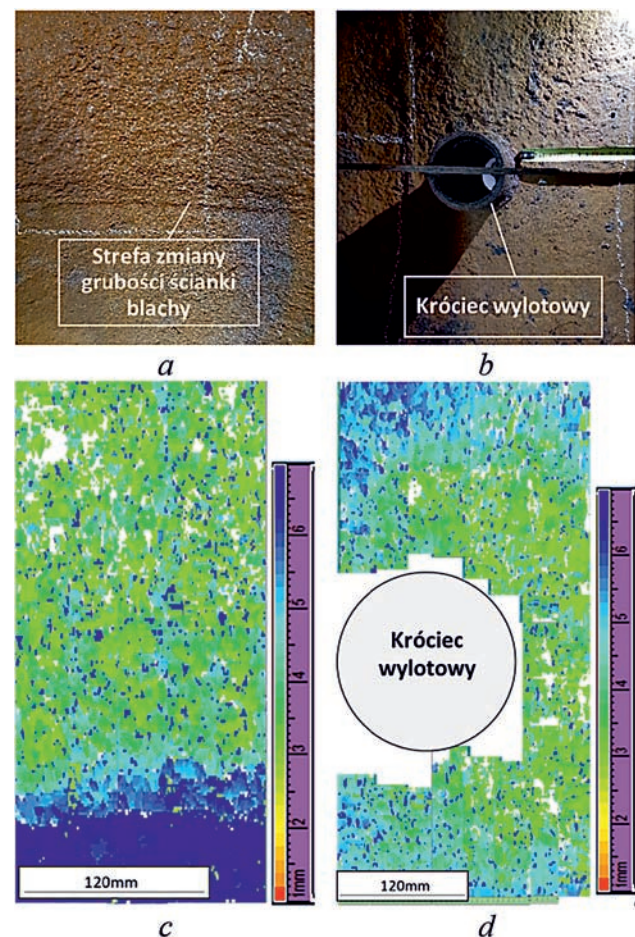
Wszystkie badania, wyniki których przedstawiono w niniejszej publikacji, zostały zrealizowane w ramach projektu badawczego zatytułowanego „Nowy kompleksowy sposób oceny stanu technicznego urządzeń ciśnieniowych instalacji eksploatowanych w przemyśle chemicznym i petrochemicznym, wykorzystujący analizy sygnałów emisji akustycznej, pola naprężeń konstrukcji i stanu degradacji materiału” sfinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach Programu LIDER VII.

2. Obiekt badawczy

Jako obiekt do badań wykorzystano zbiornik ciśnieniowy o konstrukcji walcowej (pojemność 2,6 m³, grubość ścianki 8 mm), który został wyłączony z eksploatacji po ponad 40 letnim okresie pracy na instalacji destylacji ropy naftowej jednego z zakładów rafineryjnych. Materiał płaszczka to stal węglowa gatunku St 41K, która charakteryzuje się granicą plastyczności wynoszącą ok. 400 MPa oraz wytrzymałością na rozciąganie na poziomie ok. 500 MPa. Zbiornik służył do odseparowywania wody oraz drobnych zanieczyszczeń od surowej ropy naftowej. Zgodnie z dokumentacją techniczną ciśnienie robocze zbiornika wynosiło 0,25 MPa, a ciśnienie projektowe – 0,5 MPa.

Badania wizualne wykazały, że materiał płaszczka zbiornika

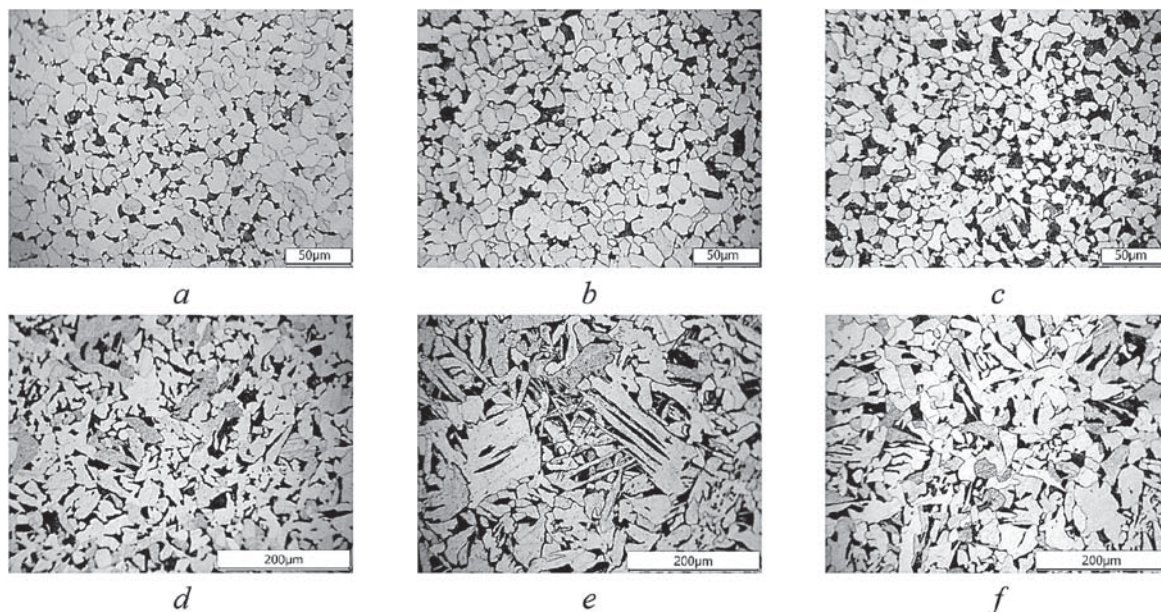
zawiera liczne uszkodzenia w postaci wżerów korozyjnych o różnej głębokości. Krytyczne uszkodzenia, zlokalizowane w górnej części płaszczka, na skutek zaawansowanej degradacji korozyjnej, spowodowały powstanie wżerów o średnicach ok. 2 ÷ 5 mm. Szczegółowe pomiary grubości ścianki płaszczka metodą ultradźwiękową (UT) wykazały średnią grubość ok. 5,5 mm, co jest wartością o ok. 31% mniejszą od grubości nominalnej, podanej w dokumentacji technicznej. Warto zaznaczyć, że w niektórych strefach płaszczka, a mianowicie w górnej jego części i w strefie króćca wylotowego, grubość blach wahała się w zakresie 2 ÷ 3 mm. Wymienione wyżej strefy płaszczka zostały poddane szczegółowym badaniom UT z wykorzystaniem techniki Phased Array. Wykryte uszkodzenia zidentyfikowano oraz oznaczono, a niektóre z nich wraz z mapami rozkładu grubości ścianki blach przedstawiono na rysunku 1. Szczegółowa analiza dokumentacji technicznej oraz wyników badań UT wykazała, że istotne pocienienie ścianki płaszczka oraz dennicy (nawet do 2,5 mm) ma miejsce powyżej wewnętrznej grodzi technologicznej oraz w strefie króćca wylotowego.



Rys. 1. Widok uszkodzeń korozyjnych (a, b) oraz mapy rozkładu grubości blachy (c, d) dla dennicy (a, c) oraz blachy płaszczka zbiornika w strefie króćca wylotowego (b, d).

Fig. 1. The views (a, b) and wall thickness maps (c, d) of areas with corrosion damages located on cylinder head (a, c) and cylinder part of vessel (b, d).

Materiał płaszczka, zawierający krytyczne uszkodzenia korozyjne, został wycięty, a w jego miejsce doczołowo wspawano odpowiednio wyprofilowany arkusz blachy o grubości



Rys. 2. Mikrostruktury materiału blach zbiornika oznaczonych: I (a), II (b), III (c), IV (d), V (e) i VI (f): a, b, c, – 400×; d, e, f – 200×.
Fig. 2. Microstructures of the shell's plates designated: I (a), II (b), III (c), IV (d), V (e) and VI (f): a, b, c – magnification 400×; d, e, f – magnification 200×.

3 mm, wykonany z materiału o składzie chemicznym zbliżonym do materiału blach płaszczu. Wszystkie spoiny zostały obrabione termicznie w celu wyeliminowania spawalniczych naprężeń resztkowych.

2.1 Badania materiałowe

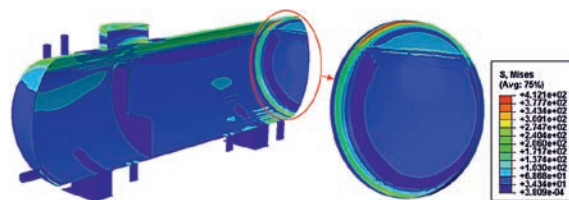
W celu oceny stanu materiału elementów konstrukcji zbiornika przeprowadzono szereg badań materiałowych z wykorzystaniem technik przenośnych. Obserwacje mikroskopowe zglądów metalograficznych wykonanych na każdej blasce płaszczu z wykorzystaniem PMS (6 zglądów oznaczonych I ÷ VII), wykazały ferrytyczno-perlityczną strukturę bez wyraźnych cech struktury wtórnej (rys. 2). Zgodnie z dokumentacją techniczną, wszystkie blachy użyte w konstrukcji zbiornika zostały poddane obróbce cieplnej w postaci wyżarzania normalizacyjnego. Natomiast badania metalograficzne wykazały, że materiały dennic oraz jednej z blach płaszczu (oznaczonej IV zgodnie z rys. 6) charakteryzują się mikrostrukturą o wyraźnych cechach przegrzania: gruboziarnistość oraz ukierunkowany kształt kolonii perlitu. Materiał jednej z dennic cechuje się strukturą Widmanstattena. Te zmiany morfologii mikrostruktury powstały na skutek jej przegrzania w zakresie temperatur Ar3 i Ar1s i nie mogły być spowodowane eksploatacją urządzenia. Na tej podstawie można wnioskować, iż zmiany w strukturze materiału prawdopodobnie pochodzą z okresu produkcji i są skutkiem braku odpowiedniej obróbki cieplnej (normalizacji) po walcowaniu na gorąco. Stal o takiej strukturze ma tendencję do kruchego pęknięcia, obniżoną udurowość i obniżone własności mechaniczne przy rozciąganiu.

2.2 Analiza MES pola naprężeń

W celu określenia pola naprężeń, występującego w elementach konstrukcji badanego zbiornika pod wpływem ciśnienia wewnętrznego, opracowano trójwymiarowy

model obliczeniowy uwzględniający pocienienia ścianek blach płaszczu oraz dennic. Warunki brzegowe dotyczące konstrukcji oraz parametrów pracy urządzenia przyjęto zgodnie z dokumentacją techniczną. Lokalne pocienienia ścianek płaszczu i dennic, zlokalizowane w górnej części urządzenia, a także uszkodzenie w strefie króćca wylotowego zamodelowano według danych otrzymanych podczas badań UT. Obliczenia przeprowadzono z wykorzystaniem oprogramowania ABAQUS. Praca została wykonana z wykorzystaniem Infrastruktury PLGrid. Przykładowe wyniki obliczeń MES przedstawiono na rys. 3.

W wyniku przeprowadzonych analiz MES stwierdzono, iż największa koncentracja naprężeń zredukowanych powstaje w strefie uszkodzenia korozyjnego w miejscach łączenia dennic z częścią walcową zbiornika. Do lokalnego uplastycznienia materiału dochodzi po przekroczeniu ciśnienia ok. 0,9 MPa.



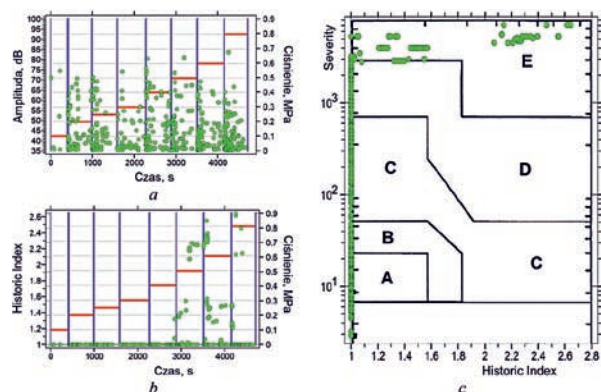
Rys. 3. Rozkład naprężeń zredukowanych wg. Hubera-Misesa w płaszczu zbiornika, powstałych na skutek oddziaływania ciśnienia wewnętrznego na poziomie 0,9 MPa.
Fig. 3. Huber-Mises stress distribution in the shell under 0,9 MPa pressure.

3. Próby ciśnieniowe z rejestracją AE

W celu opracowania podstaw metodyki diagnostycznej, skierowanej na detekcję i ocenę rozwoju procesów destrukcyjnych z uwzględnieniem stanu mikrostruktury materiału urządzeń ciśnieniowych, zrealizowano na zbiorniku szereg

badan z rejestracją sygnałów AE. Początkowo, po napełnieniu zbiornika wodą, przeprowadzono testy propagacji fal AE generowanych sztucznymi źródłami AE, m.in. źródłem Hsu-Nielsen zgodnie z normą PN-EN 13554:2011 [15]. Testy te miały na celu określenie prędkości propagacji fal AE, optymalizację rozmieszczenia czujników AE, jak również sprawdzenie dokładności lokalizacji źródeł. Następnie wykonano próby hydrauliczne z rejestracją sygnałów AE, podczas których stopniowo podnoszono ciśnienie z wytrzymaaniem ok. 10 min na poszczególnych etapach obciążenia. Do rejestracji sygnałów AE wykorzystano czujniki o częstotliwości rezonansowej 150 kHz z przedwzmacniaczami (wzmocnienie 34 dB) oraz system pomiarowy AMSY-6 firmy Vallent.

Na rysunku 4 pokazano rozkład w czasie maksymalnych amplitud sygnałów AE oraz parametru Historic Index (HI), jak również strefowy wykres zależności parametrów Severity – Historic Index (kryteria MONPAC [11]). Pierwsze sygnały generowane przez krytyczne źródła AE (strefa E na wykresie Severity – Historic Index zgodnie z klasyfikacją MONPAC) zostały zarejestrowane po przekroczeniu ciśnienia 0,5 MPa. W tym momencie odnotowano gwałtowny wzrost parametru HI. Ze zwiększeniem obciążenia wzrastała ilość zarejestrowanych sygnałów AE, aż do momentu, kiedy po przekroczeniu ciśnienia ok. 0,9 MPa zlokalizowano dużą ilość krytycznych źródeł AE, a system pomiarowy zaczął rejestrować emisję ciągłą. Po przekroczeniu danej wartości ciśnienia doszło do plastycznego odkształcenia dużych objętości materiału, zwłaszcza w strefach połączenia dennic z częścią walcową zbiornika na co wskazują również wyniki analiz MES (rys. 3).



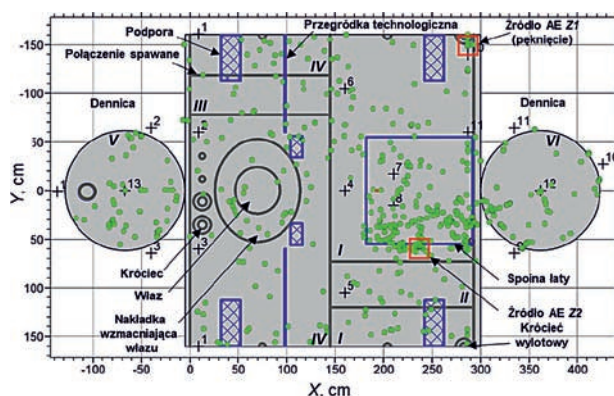
Rys. 4. Rozkład w czasie maksymalnych amplitud (a), parametru Historic Index (b) oraz wykres Severity – Historic Index (c) sygnałów AE, zlokalizowanych w trakcie prób obciążeniowych.

Fig. 4. Signals' amplitude (a) and Historic Index parameter (b) distributions as well as zonal intensity plot Severity – Historic Index (c).

Do rozszczelnienia zbiornika doszło w strefie uszkodzenia zlokalizowanego w pobliżu króćca wylotowego. Do momentu przekroczenia ciśnienia ok. 0,8 MPa na płaszczu zbiornika zostały zlokalizowane dwa krytyczne źródła AE oznaczone Z1 i Z2 (patrz rys. 5). Źródło Z1 zlokalizowano w miejscu połączenia króćca wylotowego z blachą płaszczu zbiornika, natomiast źródło Z2 pochodzi ze strefy podłużnego złącza spawanego, łączącego blachę płaszczu ze wspawaną łatą.

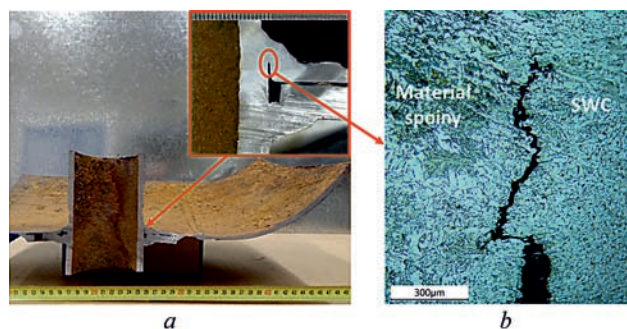
Większość sygnałów AE, generowanych przez źródło Z1, zgodnie z kryteriami MONPAC, sklasyfikowano do grupy E – krytyczne uszkodzenie wymagające natychmiastowego zatrzymania eksploatacji urządzenia oraz przeprowadzenia szczegółowych badań innymi metodami NDT.

Po zakończeniu prób ciśnieniowych z rejestracją AE przeprowadzono rewizję wewnętrzną zbiornika oraz wycięto fragmenty blach płaszczu, w których zlokalizowano źródła AE oznaczone Z1 i Z2. Na rysunku 6 a pokazano wycinek pobrany w strefie króćca wylotowego, który został przecięty wzdłuż osi zbiornika dokładnie w miejscu zlokalizowania źródła Z1. Obserwacje makroskopowe oraz mikroskopowe zglądu, wykonanej techniką przenośną, wykazały pęknięcie o długości ok. 0,8 mm. Wykryte uszkodzenie propagowało w strefie wpływu ciepła złącza spawanego, łączącego rurę króćca wylotowego z blachą płaszczu. Z morfologii pęknięcia, pokazanej na rysunku 6 b, wynika, że propagowało ono w trzech etapach, zaczynając od obciążenia 0,5 MPa.



Rys. 5. Lokalizacja sygnałów AE (pokazana na płaszczu w rozwinięciu) zarejestrowanych w trakcie stopniowego obciążenia zbiornika ciśnieniem w zakresie 0,1 ÷ 0,8 MPa (1 ÷ 11 – czujniki AE, I ÷ VI – oznaczenie blach płaszczu zbiornika).

Fig. 5. The location of AE signals generated under pressure 0,1 ÷ 0,8 MPa (1 ÷ 11 – sensors, I ÷ VI – number of shell's plates).



Rys. 6. Widok wycinka płaszczu zbiornika (a) oraz mikrofotografia pęknięcia zlokalizowanego metodą AE (b).

Fig. 6. View of the tank's shell section (a) and the microphotograph of the crack (b) which was located by the AE method.

4. Wnioski

Urządzenia ciśnieniowe z lat 60-70-tych, eksploatowane w przemyśle petrochemicznym i rafineryjnym, często zawierają w materiale płaszczu ukryte wady technologiczne oraz zmiany mikrostruktury, powstałe na skutek odstępstw od technologii wytwarzania. Potwierdziły ten fakt również

badania materiałowe przeprowadzone na zbiorniku ciśnieniowym, będącym obiektem prac objętych niniejszym artykułem. Materiały niektórych blach płaszczu urządzenia charakteryzowały się gruboziarnistą mikrostrukturą o różnych cechach przegrzania. Stal o takiej strukturze ma tendencję do kruchej pęknięcia, obniżoną udarność i własności mechaniczne przy rozciąganiu.

Ważnym aspektem w praktykach diagnostycznych obiektów przemysłowych, poddanych długotrwałej eksploatacji, jest uzupełnienie badań NDT o dane analiz numerycznych MES w celu określenia pola naprężeń i odkształceń powstających w elementach konstrukcji na skutek oddziaływania obciążeń roboczych. Obliczenia MES, wykonane w ramach niniejszych prac wykazały, że zmiany geometrii konstrukcji urządzenia, wejścia i wyjścia instalacji, a także lokalne uszkodzenia korozyjne materiału powodują pojawienie się w płaszczu urządzenia ciśnieniowego znacznych koncentracji naprężeń. W strefach tych często dochodzi do uplastycznienia oraz rozwoju uszkodzeń już pod wpływem obciążeń roboczych.

Próby hydrauliczne z rejestracją AE zbiornika ciśnieniowego, zawierającego liczne uszkodzenia korozyjne, powstałe na skutek ponad 40-letniej eksploatacji w instalacji destylacji ropy naftowej, umożliwiły weryfikację skuteczności oraz czułości metody AE, jak również pozwoliły na rozwój znanych technik badania tego typu konstrukcji z wykorzystaniem metody AE. W wyniku przeprowadzonych prób wykryto oraz zlokalizowano proces zarodkowania oraz rozwoju krytycznego źródła AE. W wyniku późniejszych badań niszczących ujawniono w strefie zlokalizowanego źródła AE pęknięcie o długości ok. 0,8 mm.

Przedstawione wyniki badań pozwoliły na opracowanie oraz weryfikację podstaw nowej metodyki badań niszczących obiektów po wieloletniej eksploatacji opartej na połączeniu stosowanych w rzeczywistym stanie eksploatacji symulacji numerycznych pola naprężeń konstrukcji urządzenia, oceny stanu materiału oraz szczegółowej analizy parametrów sygnałów emisji akustycznej, generowanych w wyniku rozwoju procesów degradacyjnych. Optymalne połączenie tych analiz oraz znalezienie wzajemnych korelacji pozwoli na skuteczne rozwiązywanie aktualnych problemów diagnostyki instalacji chemicznych związanych z oceną ich stanu technicznego i określeniem warunków dalszej eksploatacji, w szczególności tych urządzeń, gdzie na skutek długotrwałej pracy występują niekrytyczne uszkodzenia.

5. Literatura

- [1] Kelly M. P., Harris D. O., Pollock A. A. "Detection and location of flaw growth in metallic and composite structures" Monitoring Structural Integrity by Acoustic Emission, Special Technical Publication 571, American Society for Testing and Materials, 1975.
- [2] Harris D. O., Dunegan H. L. Acoustic Emission – 5 Application of Acoustic Emission to Industrial Problems, NDT, June 1974.
- [3] Dunegan H. L. "Acoustic Emission Testing of 12-nickel managing steel pressure vessels" Second International Conference on Pressure Vessel Technology, Part 11, Materials Fabrication and Inspection, American Society of Mechanical Engineers.
- [4] Fowler T. J. "Experience with acoustic emission monitoring of chemical process industry vessels" Progress in Acoustic Emission III, The Japanese Society of NDT, 1986.
- [5] Rauscher F. Defekt "Detection by Acoustic Emission Examination of Metallic Pressure Vessels" Journal of Acoustic Emission, vol. 22, 2004.
- [6] Anastasopoulos A. A., Kourousis D. A., Cole P. T. "Acoustic Emission Inspection of Spherical Metallic Pressure Vessels" The 2nd International Conference on Technical Inspection and NDT (TINDT2008) – Tehran, Iran – October 2008.
- [7] Nowak M., Baran I., Wierzchowski M., Kisielewski S. wykorzystanie emisji akustycznej przy ocenie uszkodzeń urządzeń ciśnieniowych ujawnianych innymi metodami NDT, 35 KKBN Szczyrk 2006.
- [8] PN-EN 14584:2013-07 „Badania nieniszczące – Emisja akustyczna – Sprawdzanie metalowych urządzeń ciśnieniowych podczas próby odbiorczej – Planarna lokalizacja źródeł AE”.
- [9] Article 12 ASME:2010 „Acoustic emission examination of metallic vessels during pressure testing”.
- [10] ASTM E1139 / E1139M - 12 „Standard practice for Continuous Monitoring of Acoustic Emission from Metal Pressure Boundaries”.
- [11] Fowler T. J., Blessing J. A., Conlisk P. J., Swanson T.L. "The MONPAC System" Journal of Acoustic Emission, vol. 8, pp 1-7, 1989.
- [12] Płowiec J., Szlagowska J., Lusa T., Paradowski K., Wojas G., Zagórski A., Spsychalski W. L., Kurzydłowski K. J. „Wykorzystanie badań nieniszczących do wykrywania rozwarstwień powstających w instalacjach rafinerijno-petrochemicznych” Corrosion Today, Sobieszewo, 2008.
- [13] Paradowski K., Lusa T., Manaj W., Płowiec J., Spsychalski W. L., Zagórski A., Ciesielski M., Kurzydłowski K. J. „Badania nieniszczące w ocenie degradacji stali 13CrMo4-5 pracującej w warunkach agresywnego środowiska wodorowego” XIII Seminarium Szkoleniowe nt. Nieniszczące Badania Materiałów, Zakopane 2007.
- [14] Nowak M., Lyasota I., Gawlik j., Hebda M. „Wykorzystanie metody emisji akustycznej w badaniach węzła stalowego mostu kolejowego, Nowoczesne technologie i systemy zarządzania w transporcie szynowym”, no. 3, pp 357–363, 2015.
- [15] PN-EN 13554:2011 Badania nieniszczące – Emisja akustyczna – Zasady ogólne.