

# Ocena stanu trójnika rurociągu pary świeżej ze stali 13HMF metodą emisji magnetoakustycznej

Assessment of state of steam pipe T-joint made of 13HMF grade steel using magnetoacoustic emission effect

## Streszczenie

Zbadano trójnik w rurociągu pary świeżej ze stali 13HM o czasie eksploatacji ok. 66 000 h. Mierzono: natężenie emisji magnetoakustycznej (EMA), twardość HV, współczynnik tłumienia fal ultradźwiękowych (dB/mm). W przypadku badania EMA do magnesowania użyto grubościenny elektromagnes jarzmowy o adaptowanych ramionach a sygnał napięciowy z szerokopasmowej sondy był filtrowany w celu eliminacji zakłóceń przemysłowych. Porównawcza analiza tych trzech wielkości fizycznych umożliwiła identyfikację obszarów o mniejszym lub większym stopniu zdegradowania mikrostruktury. Wykazano, że odcinki łączników w trójnikach o mniejszej grubości ścianki mogą być bardziej zdegradowane od odcinków o większej grubości ścianki. Te wyniki świadczą o dużym potencjale diagnostycznym opracowywanej metody badania zmian w mikrostrukturze rurociągów pary świeżej wykonanej ze stali 13HMF.

## Abstract

The study focused on a part of the steam pipe (T-joint) in a power plant boiler made of 13HMF grade steel (in service over 66 000 hours) with magneto-acoustic emission (MAE). Two complementary techniques - the hardness measurement (HV) and ultrasound attenuation coefficient analysis (dB/mm) have also been applied. The MAE signal was detected by large band sensor when thick pole electromagnet (adapted to pipe curvature) and appropriate filtering of acoustic had been applied. Comparative analysis of those three quantities allowed detection of the areas with different level of microstructural damage. It was revealed that parts of the joint made of lower thickness wall pipe are more creep-damaged than parts with higher thickness of the wall. These results demonstrate the high potential of the proposed technique of assessment of creep damage of power plant steam tubes made of 13HMF grade steel.

## Wstęp

Proces degradacji, jakiego ulegają elementy konstrukcji w warunkach zmiennych naprężeń i wysokiej temperatury pogarsza znacząco właściwości mechaniczne tych stali, aż do wystąpienia makroskopowych uszkodzeń [1]. Złożoność problemów technicznych występujących w sferze diagnostyki urządzeń energetycznych, a jednocześnie dążenie do podwyższenia dokładności prognozowania trwałości resztkowej są powodem ciągłego rozwoju nowych metod diagnozowania stanu materiału [2, 3]. Nieniszcząca

ocena stopnia utraty właściwości wytrzymałościowych stali w przemyśle energetycznym jest zadaniem ogromnie ważnym i nadal nierozwiązanym w skali gospodarki światowej. W energetyce krajowej występuje problem diagnozowania i wymiany elementów instalacji energetycznych wykonanych głównie ze stali ferromagnetycznych (10H2M, 15HM i 13HMF) a eksploatowanych dłużej niż 100 000 h. Wynika stąd zasadność podejmowania intensywnych wysiłków na rzecz rozwoju metod badań nieniszczących służących do diagnozowania właśnie takich gatunków stali. Zasadne jest zastosowanie dla nieniszczącego diagnozowania zmian mikrostruktury eksploatowanych stali przynajmniej dwóch komplementarnych technik: techniki magnetycznej wykorzystującej właściwości ferromagnetyczne tej stali (a w szczególności zjawisko emisji magnetoakustycznej) oraz technikę ultradźwiękową.

W Politechnice Gdańskiej prowadzone są od szeregu lat badania nad wykorzystaniem efektów magnetoelastycznych, a w szczególności emisji magnetoakustycznej, do diagnozowania stanu mikrostruktury eksploatowanych stali ferromagnetycznych. Dotychczasowe wyniki tych badań dla stali ferrytyczno-perlitycznych i perlityczno-bainicznych (typu 15HM i 10H2M) wskazują jednoznacznie na to, że metoda bazująca na efekcie emisji magnetoakustycznej (EMA) charakteryzuje się bardzo dobrymi właściwościami użytkowymi dla potrzeb badań nieniszczących [4]. Szczególnie korzystny jest fakt, że natężenie EMA okazuje się być dla tych stali monotoniczną i znacząco malejącą funkcją stopnia degradacji już na wczesnym etapie procesu degradacji (przed wystąpieniem uszkodzeń mikrostruktury). Badania testowe wykonane na cienkościennych elementach konstrukcyjnych (przegrzewacze pary), dawały relatywnie silne sygnały EMA [5÷8]. Elementy grubościennne (takie jak np. elementy rurociągu pary świeżej) stanowią dużo większe wyzwanie z metrologicznego punktu widzenia. Składają się na to trzy podstawowe problemy 'techniczne': konieczność dostatecznie silnego magnesowania tego typu elementów, osłabienie sygnału EMA w grubościennych i długich elementach oraz hałasy akustyczne o naturze mechanicznej generowane się w rurociągu w trakcie remontów bloków energetycznych.

W niniejszym artykule przedstawione są wyniki badań za pomocą techniki EMA trójnika rurociągu pary świeżej wykonanej ze stali 13HMF. Wykonano także badania komplementarne polegające na pomiarze w wybranych obszarach trójnika współczynnika tłumienia ultradźwięków, twardości i mikrostruktury mikroskopem świetlnym.

## Układy pomiarowe

### Pomiar EMA

Układy do magnesowania i detekcji właściwości magnetoakustycznych zostały wykonane na Wydziale Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej PG. Rysunek 1 przedstawia układ do magnesowania oraz detekcji sygnału EMA w trakcie pomiarów. Składa się on z elektromagnesu (E), szerokopasmowego przetwornika ultradźwiękowego (s), przedwzmacniacza (pw) oraz (niewidocznego na zdjęciu) analogowego układu wzmacniającego (wykorzystano układy z filtrem górnoprzepustowym oraz bez filtra). Szczególnie istotne okazało się zastosowanie elektromagnesu o dużej powierzchni przekroju rdzenia zapewniającego względnie silne namagnesowanie dużego obszaru rury. Zastosowano przetwornik ultradźwiękowy szerokopasmowy typu WD firmy Physical Acoustic Corporation. Wzmocniony sygnał napięciowy  $U$  z przetwornika ultradźwiękowego podawany był na przetwornik analogowo-cyfrowy (12 bitów) i rejestrowany z dużą rozdzielczością dla jednego półokresu magnesowania z wykorzystaniem



**Rys. 1.** Układ pomiarowy podczas pracy na rurociągu pary świeżej

**Fig. 1.** Working meter circuit on the fresh steam pipeline



**Rys. 2.** Komputer stosowany w trakcie pomiarów

**Fig. 2.** Komputer used in the measurements

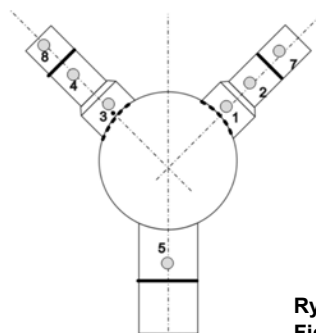
przenośnego komputera przystosowanego do badań w warunkach przemysłowych (rys. 2). Analizę zarejestrowanego sygnału napięciowego przeprowadzono „on-line” korzystając z oprogramowania stworzonego przy wykorzystaniu pakietu LabVIEW 8.0. Analiza polegała na cyfrowej filtracji z wykorzystaniem techniki FFT (szybka transformata Fouriera) oraz wyznaczeniu chwilowego napięcia skutecznego  $U_a$  (sygnał rms). Wyniki tej analizy są także rejestrowane.

## Badania ultradźwiękowe i twardości oraz mikrostruktury

Badania komplementarne wobec metody EMA wykonane zostały przez Laboratorium Badań Materiałowych ME Groupe z Warszawy. Badania te polegały głównie na pomiarze współczynnika tłumienia fal ultradźwiękowych (dla częstotliwości 2, 4 i 15 MHz). Mierzono także twardości (za pomocą twardościomierza Krautkramer MIC-10) i wykonywano analizę mikrostruktur mikroskopem przenośnym (Instrukcja badawcza Nr 02 do procedury Nr P05 „Mikroskopia Świetlna Metoda przenośna – PMS” – IB02).

## Informacja o badanym trójniku

Na rysunku 3 pokazano schemat trójnika w rurociągu pary świeżej. Czas eksploatacji tego trójnika to ok. 66 000 h. Zaznaczono na nim obszary badań EMA i UT (punkty 1÷8) oraz pięć spoin. Linie przerywane to spoiny konstrukcyjne trójnika a linia ciągła oznaczają spoiny montażowe trójnika z resztą rurociągu.



**Rys. 3.** Schemat trójnika pary świeżej

**Fig. 3.** Fresh steam three-way pipe

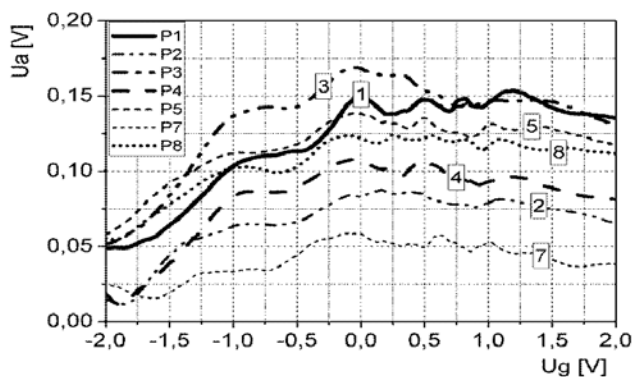
Należy zaznaczyć, że punkty 1 i 2 oraz 3 i 4 dotyczą dwóch łączników. Przed przyspawaniem do korpusu trójnika zostały one przetoczone na wymagane wymiary. Charakterystyczna dla nich jest zmiana zewnętrznej średnicy. Okrągła kula trójnika wraz z szyją jest monoblokiem i ten element został wykonany metodą kucia. Punkt 5 leży na szyi korpusu. Punkty 7 i 8 leżą na fragmentach rurociągu dospawanych do trójnika.

## Wyniki badań

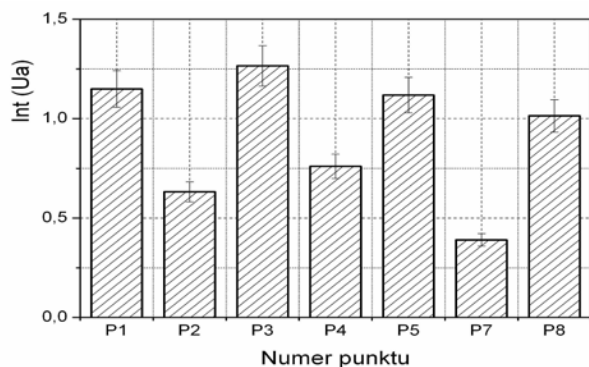
Podstawą dla uzyskania zadowalających wyników pomiaru EMA w przypadku elementów grubościennych było wyeliminowanie zakłóceń w sygnale EMA.

Opracowując technikę badania EMA elementów grubościennych stwierdzono, że rejestrowane przez głowicę szerokopasmową zakłócenia akustyczne występujące w rurociągu grubościennym w kotle charakteryzują się wystarczająco różnym widmem częstotliwości od widma sygnału EMA. Dzięki temu mogą być wyeliminowane poprzez stosowanie filtrów analogowych lub też przez obróbkę cyfrową zarejestrowanego pełnego sygnału napięciowego. Należy podkreślić, że opracowane z wykorzystaniem pakietu LabVIEW procedury filtracji i analizy sygnału umożliwiły skuteczną detekcję sygnału EMA oraz szybką ocenę stanu rurociągu w trakcie wykonywania badania EMA.

Przedstawione wyniki pomiaru EMA uzyskano stosując odpowiednią filtrację. Wykresy zmierzonego chwilowego poziomu napięcia EMA są pokazane na



Rys. 4. Natężenie emisji EMA w obszarach zaznaczonych na trójniku  
Fig. 4. MAE signal intensity in marked areas on the three-way pipe



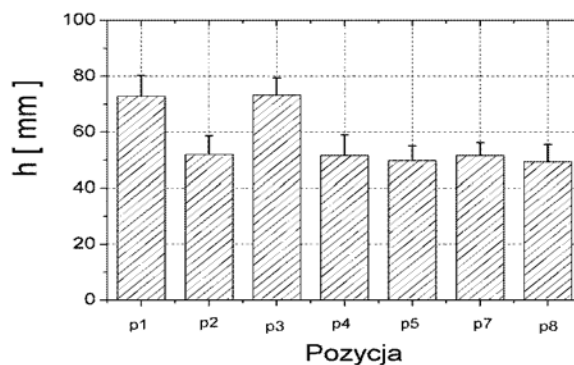
Rys. 5. Całki z natężenia EMA w obszarach zaznaczonych na trójniku  
Fig. 5. MAE signal integral intensity in marked areas on the three-way pipe

rysunku 4. Są to fragmenty pętli histerezy zarejestrowane dla wzrastających wartości prądu zasilającego elektromagnes jarzomy. Szerokie maksimum w natężeniu EMA jest skutkiem złożonego rozkładu czasowo-przestrzennego indukcji magnetycznej wewnątrz grubościennego elementu na skutek generacji prądów wirowych. Rejestrowany sygnał jest efektem sumowania fal akustycznych EMA emitowanych z obszarów o różnym stanie magnesowania [9, 10]. Analizę porównawczą natężenia EMA ułatwia zestawienie całek z wykresów wartości chwilowych natężenia EMA (rys. 4). Całki te pokazane są na rysunku 5. Jak widać, poziomy sygnał EMA różni się dość znacznie. Największe natężenie EMA stwierdzono dla punktów 1, 3 i 5, a najmniejsze dla punktu 7. Natężenie EMA jest relatywnie niskie także dla punktów 5 i 8.

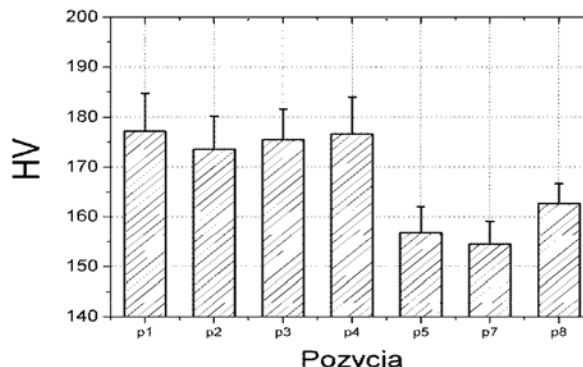
Wyniki ultradźwiękowego pomiaru grubości przedstawiono na rysunku 6. Widać, że grubość ścianki wstawek zmienia się od ok. 72 mm (punkty 1 i 3) do 52 mm (punkty 2 i 4). Dla pozostałych badanych obszarów grubość ścianki jest też bliska wartości 50 mm.

Wyniki pomiaru twardości przedstawiono na rysunku 7. Widać znaczące różnice wartości twardości pomiędzy wstawkami trójnika (poziom ok. 175 HV) a szyją (punkt 5) i zewnętrznymi elementami dospawanymi do trójnika (punkty 7 i 8).

Tłumienie ultradźwięków okazało się być także różne dla poszczególnych fragmentów trójnika. Z wyników pokazanych na rysunku 7 wynika, że tłumienie dla punktów 1 oraz 3 (grubsza ścianka) jest systematycznie mniejsze od tłumienia dla punktów 2 i 4



Rys. 6. Grubość elementu wyznaczona za pomocą UT  
Fig. 6. Wall of pipe thickness measured using ultrasounds



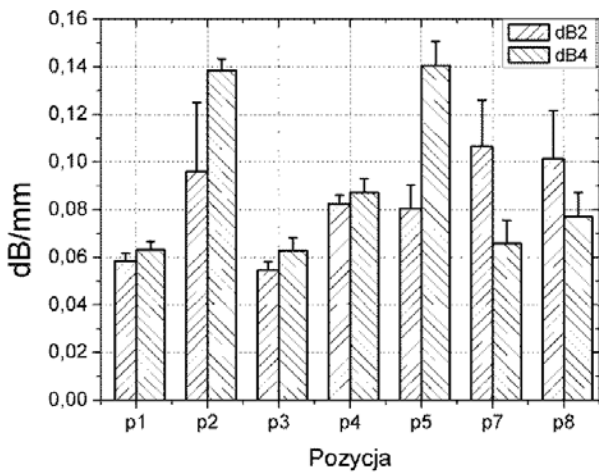
Rys. 7. Twardość HV w obszarach zaznaczonych na trójniku  
Fig. 7. HV hardness in the marked areas on the three-way pipe



(cieńsza ścianka). W punkcie 5 tłumienie jest relatywnie wysokie.

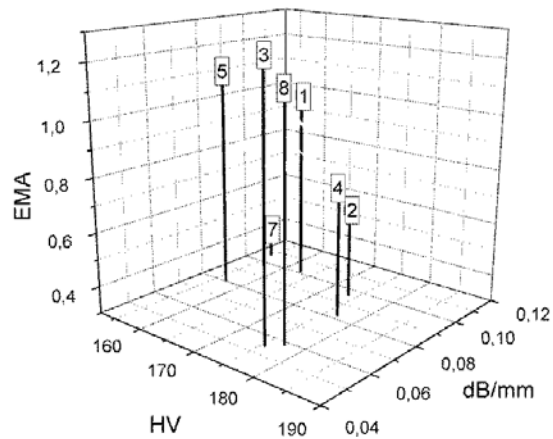
Ważnym w analizie danych momentem jest zestawienie wyników pomiaru EMA (całki) z wartościami twardości HV i współczynnikiem tłumienia. Takie zestawienie przedstawiono w postaci wykresu trójwymiarowego na rysunku 9. Wyróżnić należy najpierw punkty 3 i 1 – o dużym poziomie EMA i względnie wysokiej twardości HV. Zgodnie z przyjętą koncepcją o charakterze zmian natężenia EMA w procesie degradacji należy przypuszczać, że te fragmenty łącznika nie uległy jeszcze degradacji. Punkty 4 i 2 – leżące w strefie cieńszej ścianki łącznika cechują się dużo niższym poziomem EMA w porównaniu z obszarami 1 i 3, a więc należy cieńsze fragmenty łącznika ocenić jako relatywnie bardziej zdegradowane niż te należące do strefy o grubszej ściance. Obszar dla punktu 5 (szyja trójnika) charakteryzuje się wysokim poziomem EMA ale relatywnie niską twardością. Współczynniki tłumienia dla wszystkich punktów położonych na trójniku mają podobną wartość. Stwierdzona dla punktu 5 różnica w poziomie twardości przy tym samym poziomie EMA i tłumienia może wynikać z mikrostruktury materiału łączników i korpusu trójnika. To zostało potwierdzone badaniami metalograficznymi. Za pomocą mikroskopu

światelnego zbadano obrazy mikrostruktury w punkcie 1 i punkcie 5. W przypadku łącznika stwierdzono strukturę ferrytyczno-bainityczną (ziarno o średnicy  $D = 40 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}$ ). W punkcie 5 występowały bardzo duże ziarna ferrytu ( $D = 150 \pm 10 \text{ mm}$ ) z udziałem fazy zapewne perlitycznej. Duże ziarno ferrytu sprawia, że zwiększa się poziom emisji EMA a faza perlityczna jest przyczyną mniejszej twardości tej części trójnika. Punkty 7 i 8 należą do obszaru 'odrębnego' w sensie struktury rurociągu a zapewne i mikrostruktury. W przypadku punktu 7, widoczne na rysunku 9 cechy – niski poziom EMA, niski poziom HV oraz wysoki poziom tłumienia, sugerują zakwalifikowanie tego fragmentu do grupy materiałów relatywnie najbardziej zdegradowanych. Punkt 8 – charakteryzuje się wysokim poziomem EMA, dużą twardością i małym tłumieniem fal ultradźwiękowych. Na tej podstawie można i należy ten obszar zaliczyć do materiału mniej zdegradowanego niż materiał w obszarze punktu 7. Należy dodać, że odcinki rur dospawane do obu łączników mają tę samą grubość ścianki. Tym samym różnice w poziomie twardości jak i współczynnika tłumienia muszą wynikać z różnic w mikrostrukturze obu dospawanych rur. Należy też przypuszczać, że te zmiany są rezultatem eksploatacji, a nie wynikają z różnic w mikrostrukturze w stanie dostawy.



**Rys. 8.** Tłumienie UT w obszarach na trójniku zmierzone dla częstotści 2 i 4 MHz

**Fig. 8.** Ultrasound attenuation in the marked areas on the three-way pipe for 2 i 4 MHz frequency



**Rys. 9.** Wartości EMA w funkcji twardości (HV) i tłumienia (dB/mm)

**Fig. 9.** MAE values in the function of hardness (HV) and attenuation (dB/mm)

## Podsumowanie

Zbadano trójnik w rurociągu pary świeżej. Mierzono: natężenie emisji magneto akustycznej, twardość, współczynnik tłumienia fal ultradźwiękowych. Porównawcza analiza tych trzech wielkości fizycznych umożliwiła identyfikację obszarów o mniejszym lub większym stopniu zdegradowania mikrostruktury. Wykazano, że odcinki łączników w trójnikach o mniejszej

grubości ścianki mogą być bardziej zdegradowane od odcinków o większej grubości ścianki. Te wyniki świadczą o dużym potencjale diagnostycznym opracowywanej metody badania zmian w mikrostrukturze rurociągow pary świeżej wykonanej ze stali 13HMF.

*Niniejsze badania były finansowane z programu badawczego KBN Nr 1133/T08/2005/29*

## Literatura

- [1] Hernas A., Dobrzański J.: Trwałość i niszczenie elementów kotłów i turbin parowych, Wyd. Politechnika Śląska, Mon. 2, Gliwice 2003.
- [2] Dobosiewicz J.: Badania diagnostyczne urządzeń ciepłno-mechanicznych w energetyce – cz. II, kotły i rurociągi. Diagnostyka Techniczna, Warszawa: Biuro-Gamma, 1999.
- [3] Deputat J.: Nieniszczące metody badania materiałów; Warszawa, Biuro Gamma, 1997.
- [4] Augustyniak B.: Zjawiska magnetoelastyczne i ich wykorzystanie w nieniszczących badaniach materiałów, Wyd. Politechnika Gdańska, Gdańsk, Monografia 38, 2003. s. 1-192.
- [5] Augustyniak B., Chmielewski M., Piotrowski L., Głowacka M.: Assessment of 15HM steel quality with three methods based on Barkhausen effect; Proc. of 9th International Scientific Conference AMME2000, Sopot 11.10.-14.10.2000, Ed. L. A. Dobrzański, 2000, s. 27-30.
- [6] Augustyniak B., Piotrowski L., Chmielewski M., and Sablik M.: Nondestructive Characterization of 2Cr-1Mo Steel Quality using Magnetoacoustic Emission, IEEE Trans. Magn., vol. 38, 5/2002, s. 3207-3209.
- [7] Sablik M.J., Augustyniak B., Piotrowski L.: Modeling incipient creep damage effects on Barkhausen noise and magnetoacoustic emission; J. Magn. Magn. Mater. vol. 272-276 (2004) s. e523-e525.
- [8] Augustyniak B., Piotrowski L., Chmielewski M., Sablik M.: Creep damage zone detection in exploited power plant tubes with magnetoacoustic emission; Przegląd Elektrotechniczny, nr 4/2007, s. 93-98.
- [9] Augustyniak B., Piotrowski L., Augustyniak M., Chmielewski M., Sablik M.J.: Impact of eddy currents on Barkhausen and magnetoacoustic emission intensity in a steel plate magnetized by a C-core electromagnet; J. of Magnetism and Magnetic Materials. v. 272-276, (2004), s. e543-e545.
- [10] Augustyniak M., Augustyniak B., Chmielewski M., Sadowski W.: Impact of plate dimensions on time and space distribution of magnetic field induction inside the plate magnetized with C-core at various frequencies, Przegląd Elektrotechniczny. R 83, nr 6/2007, pp. 48-50

# przegląd SPAWALNICTWA

Welding Technology Review

Redakcja Przegląd Spawalnictwa, ul. Świętokrzyska 14a, 00-050 Warszawa,  
tel.: 22 827 25 42, fax: 22 336 14 79; e-mail: pspaw@ps.pl, www.pspaw.ps.pl