

**Sławomir ZATOR, Mirosław LASAR**  
POLITECHNIKA OPOLSKA, KATEDRA ELEKTROWNI I SYSTEMÓW POMIAROWYCH

## Stanowisko do diagnostyki stanu technicznego rur kotłowych z wykorzystaniem termografii aktywnej

Dr hab. inż. Sławomir ZATOR

Aktualnie prodziekan ds. nauki na Wydziale Inżynierii Produkcji i Logistyki Politechniki Opolskiej. Podstawowy obszar działalności naukowej obejmuje metrologię, w obszarze pomiaru wielkości nieelektrycznych oraz diagnostykę eksploatacyjną urządzeń i instalacji energetycznych. Autor dwóch monografii w obszarze pomiaru strumienia płynów. Członek Komisji Metrologii i Komisji Elektroniki Oddziału PAN w Katowicach.



e-mail: s.zator@po.opole.pl

Mgr inż. Mirosław LASAR

Jest absolwentem kierunku Informatyka o specjalności Komputerowe Wspomaganie Projektowania. Obecnie jest doktorantem IV roku Automatyki i Robotyki na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej. Od roku 2009 blisko współpracuje z Instytutem Elektrowni i Systemów Pomiarowych uczestnicząc w pracach naukowo-badawczych.



e-mail: mirek.lasar@gmail.com

### Streszczenie

W artykule przedstawiono stanowisko, które zostało zbudowane w celu opracowania metody diagnostycznej pomiaru grubości ścianek rur kotłowych, z wykorzystaniem termografii aktywnej. Przedstawione zostały aktualne metody weryfikacji grubości. Zostały wykonane eksperymenty, których serie pomiarowe zostały zaprezentowane a także możliwości wykorzystania opracowanej metody.

**Słowa kluczowe:** diagnostyka rur, termografia aktywna, termowizja.

### Measurement station for technical condition diagnostic of boiler tubes

#### Abstract

This paper presents the measurement station that has been built in order to develop a diagnostic method wall thickness of boiler tubes, using active thermography. Authors show the current state of the verification of thickness measurement methods. The first series of test and their results is presented and analyzed, and the possibility of this method usage is discussed.

**Keywords:** thermographs, pipes diagnostics, active thermography, thermal imaging.

## 1. Wprowadzenie

Termografia aktywna tym różni się od termografii pasywnej (klasycznego termogramu), że badany materiał jest poddawany celowemu oddziaływaniu zewnętrznemu, najczęściej w postaci promieniowania długofalowego a rejestrowana jest sekwencja termogramów. Energia dostarczana przez zewnętrzne źródło powoduje lokalne dynamiczne zmiany rozkładu temperatury, które pozwalają wykryć miejsca o odmiennej strukturze geometrycznej lub właściwościach cieplnych. Najczęściej wykorzystywanym źródłem wzbudzenia są lampy błyskowa lub halogenowa oraz ultradźwięki [1].

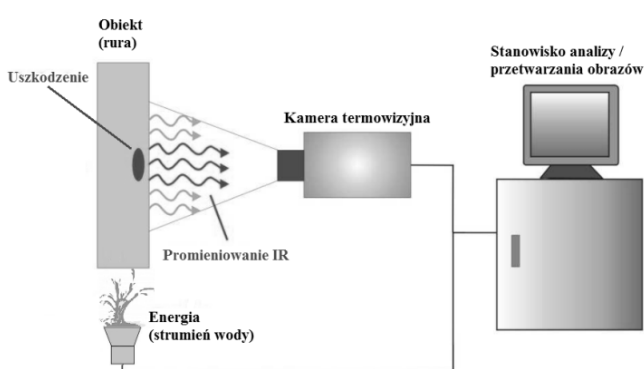
Prezentowane stanowisko oraz proponowana metoda jest dedykowana identyfikacji grubości ścianek rur kotłowych. Do badań wykorzystywana jest termografia aktywna, przy czym źródłem inicjującym zmianę temperatury w ścianie rury jest strumień wody. Opracowywana metoda ma docelowo być wykorzystana m.in. do pomiarów grubości ścianek rur kotłowych oraz powierzchni ogrzewanych kotłów energetycznych. Na rys.1 został przedstawiony ekran cieplny kotła wraz z wymienionymi jego fragmentami.

Obecnie pomiar grubości ścianek realizowany jest poprzez pomiar bezpośredni, z użyciem grubościomierza ultradźwiękowego na wybranych fragmentach instalacji, np. co piątej lub co dziesiątej rurze w odstępach co 2-3 metry w pionie. Proces ten jest czasochłonny, a wyniki pomiarów są interpolowane w taki sposób,

aby uzyskać rozkład grubości ścianek całej powierzchni ogrzewanej. Proponowane rozwiązanie (rys. 2) może pozwolić wykonać wstępną diagnostykę całego zespołu rur, a dopiero wyznaczone elementy o granicznych parametrach grubości mogą być badane inną metodą.



Rys. 1. Ekran kotła  
Fig. 1. The boiler tubes



Rys. 2. Schemat działania termografii aktywnej  
Fig. 2. Functional diagram of the active thermography

## 2. Stanowisko pomiarowe

W pomiarach została wykorzystana kamera termowizyjna VarioCAM Head ze standardowym obiektywem o ogniskowej  $f=25$  mm i kącie widzenia  $32^\circ \times 25^\circ$ .

Na obiekcie rzeczywistym ze względu na znaczne rozmiary został wykorzystany teleobiektyw o ogniskowej  $f=100$  mm i kącie widzenia  $8^\circ \times 6^\circ$ . Dzięki niemu można uzyskać 16-krotne zwiększenie rozdzielczości niewielkiego pola widzenia. Została opracowana metoda korekty zniekształceń w obiektywach kamery oraz realizacji sekwencji zdjęć i uzyskiwania termogramów wysokiej rozdzielczości [2]. Korektę zniekształceń wykonuje się w oparciu o pomiar obiektu wzorcowego, w postaci gorącego drutu, w płaszczyźnie pionowej i poziomej z użyciem dwuosowej obrotnicy, a następnie wykorzystuje się algorytm do korekty dystorsji bezkorygowanych.

Część przepływowa stanowiska badawczego (rys. 3) składa się ze zbiornika magazynowego z wodą, zainstalowaną grzałką elektryczną i termostatycznym układem kontroli temperatury, z którego za pomocą pompy woda jest tłoczona do dwóch rur stalowych kotłowych o średnicach nominalnych DN50 i DN25 mm (o grubości ścianek 4 mm), z których następnie powraca do zbiornika.



Rys. 3. Stanowisko pomiarowe  
Fig. 3. Measurement station

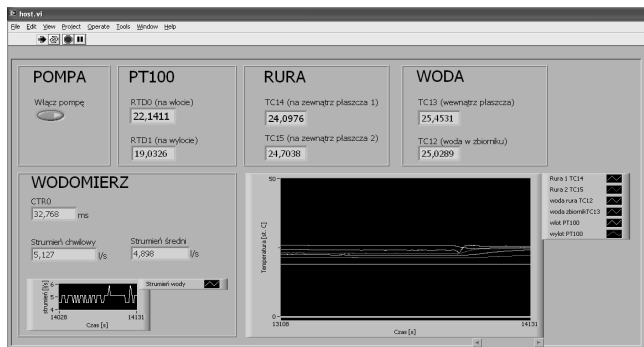
Obecnie głównym odcinkiem pomiarowym jest rura DN50, przed którą zainstalowany został wodomierz z wyjściem impulsowym. Na początku i na końcu zainstalowano króćce na czujniki temperatury Pt100.

Dodatkowo zostały zainstalowane cztery termopary:

- w zbiorniku z wodą,
  - wewnątrz rury,
  - na zewnątrz rury (na początku i końcu odcinka pomiarowego).
- Termopary przed zainstalowaniem w stanowisku pomiarowym zostały wykalibrowane w laboratorium z użyciem termostatu typu UB 30 JL firmy Lauda.

Od strony sprzętowej do akwizycji danych wykorzystywany jest zestaw kontrolno-pomiarowy NI cRIO-9024 (działający w czasie rzeczywistym) wraz z modułami NI9481, NI9217, NI9213, NI9421. Moduły pozwalają na sterowanie pompą oraz pomiary przepływu z wodomierza metodą impulsową, (przepływ 1 litra wody generuje 168 impulsów) oraz temperatury z użyciem czujników RTD (Pt100) i termopar typu T.

Programowa realizacja pomiarów odbywa się w środowisku LabVIEW (rys. 4).



Rys. 4. Aplikacja do akwizycji danych - LabVIEW  
Fig. 4. The application for data acquisition - LabVIEW

Do pomiaru referencyjnego grubości ścianek rury wykorzystany został cyfrowy grubościomierz ultradźwiękowy Olympus 37 DL Plus. Jest to urządzenie, którego jednym z głównych zastosowań są pomiary grubości ścianek: rur, zbiorników, urządzeń ciśnieniowych, kadłubów i innych struktur, także powierzchniowo skorodowanych. Urządzenie wykorzystuje głowice pojedyncze lub podwójne pozwalające standardowo zmierzyć grubość metali z rozdzielczością 0,01 mm. Urządzenie posiada następujące parametry:

- zakres grubości: 0,08 - 635 mm, w zależności od materiału, stanu powierzchni przetwornika, temperatury,
- zakres prędkości dźwięku w materiale: 508 m/s do 14000 m/s,
- temperatura pracy:  $-10^\circ\text{C}$  do  $+50^\circ\text{C}$ .

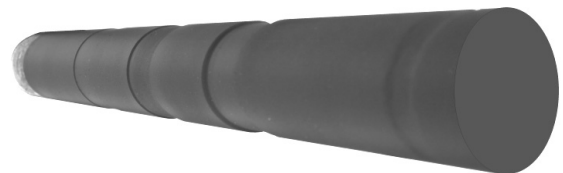
Za względu na ograniczony zakres temperatur pracy grubościomierza, weryfikacja wyników odbywać może się jedynie podczas prac remontowych kotła.

### 3. Wyniki pomiarów

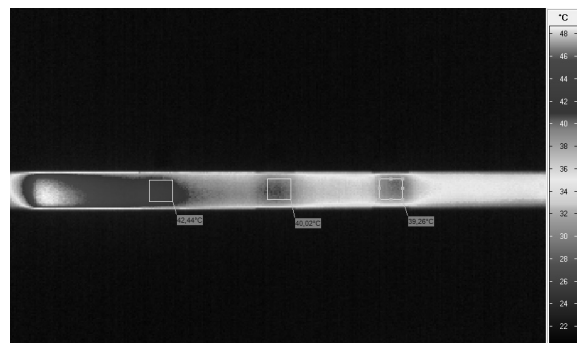
W odcinku pomiarowym średnia grubość ścianki wynosi nominalnie 4 mm. Dla potrzeb badania dokonano zmniejszenia grubości ścianki na długościach 6 cm w trzech miejscach (rys 5a). Grubość ścianki została zmniejszona o 0,5 mm, 1 mm i 1,5 mm.

W pierwszym etapie pomiarów podgrzano wodę w zbiorniku do temperatury około  $40^\circ\text{C}$  oraz wymuszono przepływ pompą przez układ rur. Następnie przepompowana została chłodna woda wodociągowa o temperaturze  $20^\circ\text{C}$ , którą schłodzono rurę. Proces ten został zarejestrowany przez kamerę termowizyjną (rys.5b) jako sekwencja z przedziałem czasowym wynoszącym 0,25 sekundy.

a)



b)

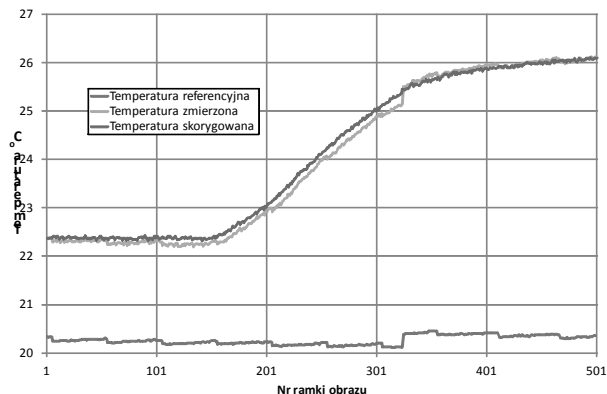


Rys. 5. a) Rura ze szlifem b) termogram rury  
Fig. 5. a) Sanded pipe b) Thermogram

Podczas rejestracji zaobserwowano niekorzystne zjawisko automatycznej korekty termogramów związanej z autokalibracją kamery. Zastosowano korektę pomiarów w oparciu o znaną a priori temperaturę w znanym obszarze. Z zarejestrowanych termogramów wyznaczono przebiegi czasowe temperatur w dwóch obszarach (mierzonym na rurze i referencyjnym). Algorytm korygujący opierał się na założeniu, że zarówno w obszarze mierzonym jak i referencyjnym występują przebiegi o charakterze ciągłym. Wyniki pomiarów przed i po korekcie pokazano na rys. 6.

Do analizy wykorzystano pomiary z trzech obszarów oznaczonych punktami od 1 do 3. Punkty 1 i 2 znajdowały się przed obszarem o mniejszej grubości, a punkt 3 w jego środku. Zauważalna jest różnica temperatur (około 1 K) w stanie ustalonym pomiędzy porównywalnymi punktami pomiarowymi (punkt 1 i punkt 2 a punkt 3). Może ona także posłużyć do wyznaczenia zmian grubości ścianki rury [3]. Jednakże pomiar temperatury kamerą ter-

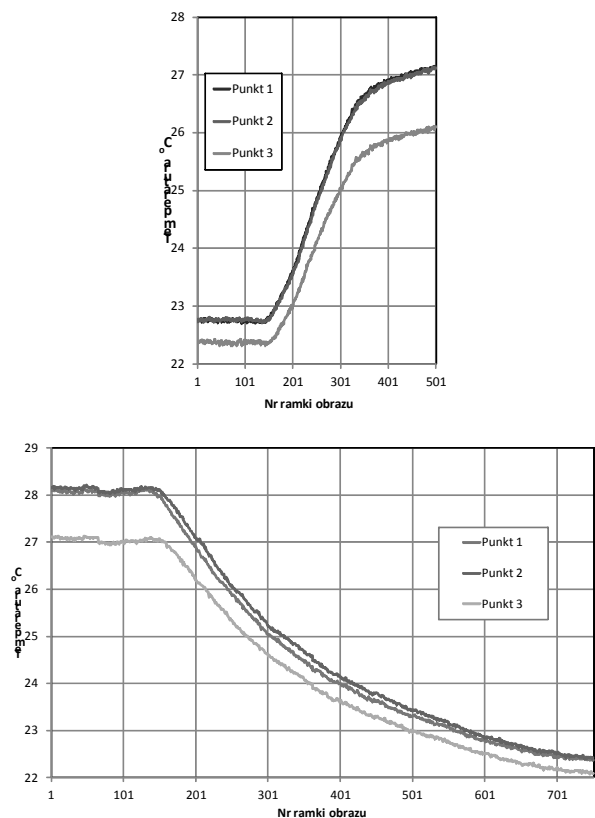
mowizyjną mimo, że możliwy jest z rozdzielczością na poziomie 0,1 K, to jednak uzyskana niepewność pomiaru temperatury nie mniejsza niż 2 K (pod warunkiem znajomości współczynnika emisyjności powierzchni rury oraz temperatury otaczających obiektów) nie pozwala na poprawne identyfikowanie zmian dla małych zmian rozkładów temperatury [5].



Rys. 6. Zarejestrowane i skorygowane przebiegi temperatur  
Fig. 6. Registered and corrected temperature curves

Dodatkowo dla kąta obserwacji większego od  $60^\circ$  występuje zmiana zmierzonej temperatury wywołana niezachowaniem założeń prawa Lamberta [4]. Zjawisko to jest zauważalne na stanowisku laboratoryjnym i będzie również występować na docelowym obiekcie badań, na którym należy go uwzględnić.

Na podstawie przebiegów temperatury (rys. 7) wyznaczone zostały stałe czasowe podczas nagrzewania i chłodzenia, które w obszarze o mniejszej grubości różnią się o około 5%, w stosunku do pozostałej części rury. Taki wynik pozwala na postawienie tezy, że możliwa będzie nie tylko diagnostyka jakościowa, ale i ilościowa. Podobne rezultaty, przy wykorzystaniu termografii aktywnej uzyskano w pracy [6].



Rys. 7. Skorygowane zmiany temperatury podczas nagrzewania i chłodzenia rury  
Fig. 7. The corrected changes of temperature during heating and cooling the pipe

## 4. Podsumowanie

Wyznaczony w warunkach statycznych powierzchniowy rozkład temperatury (rys.5b), może w pewnych warunkach zostać wykorzystany do diagnostyki grubości materiału [6]. Jednakże lepszym rozwiązaniem jest analiza stanu dynamicznego, wykorzystująca np. analogie cieplno-elektryczne [7]. Znacznie częściej stosowane są metody dynamiczne częstotliwościowe lub fazowe [1], lecz w rozpatrywanym przypadku nie mogą być one bezpośrednio wykorzystane.

Wstępne rezultaty, uzyskane dla pomiarów przeprowadzonych w warunkach laboratoryjnych obiektu modelowego, wskazują na możliwość oszacowania zmiany grubości ścianki rury z niepewnością 0,5 mm. Uzyskanie takiego rezultatu na rzeczywistym ekranie pozwoliłoby na badanie typu przesiewowego, które wskazywałoby na obszary o zbliżonej do krytycznej grubości ścianek (3 mm), w których już na znacznie ograniczonym obszarze prowadzone byłyby pomiary w dotychczas prowadzony sposób.

Obecnie szansa na przeprowadzenie pomiarów w kotle energetycznym występuje pod koniec remontu kotła, gdy następuje kontrola szczelności wykonanych prac oraz kontrola drożności rur ekranów cieplnych także wykonywana przy użyciu termowizji. Występuje dwukrotnie stan, podczas którego następuje zmiana temperatury powierzchni ogrzewalnej. Raz podczas napełniania kotła zimną wodą, gdy jej temperatura różni się o kilka stopni od temperatury ekranu oraz podczas badania szczelności i drożności rur, gdy temperatura wody jest zwiększana do około  $50^\circ\text{C}$ .

Obecnie stanowisko jest rozbudowywane o fragment rzeczywistego ekranu kotła, na którym będą także prowadzone dalsze badania w warunkach zbliżonych do rzeczywistości występujących.

Praca współfinansowana ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego.



KAPITAŁ LUDZKI  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



## 5. Literatura

- [1] Więcek W., De Mey G.: Termowizja w podczerwienu. Podstawy i zastosowania. Wydawnictwo PAK, Warszawa 2011.
- [2] Zator S., Lasar M.: Rekonstrukcja termogramów wysokiej rozdzielczości na podstawie standardowych obrazów termowizyjnych, Pomiar Automatyka Kontrola, nr 11/2012, s. 965-967.
- [3] Laaidi N., Belattar S., Elbaloutti A.: Pipeline Corrosion, Modeling and Analysis, Journal of Nondestructive Evaluation, 01.2011.
- [4] Kruczek T.: Particular applications of infrared thermography temperature measurements for diagnostics of overhead heat pipelines, QIRT 2008, Kraków, July 2008.
- [5] Zator S., Ryszczuk M.: Korekta pomiaru termowizyjnego w oparciu o trójwymiarowy model obiektu. Przegląd Elektrotechniczny, nr 12/2008, s. 323-325.
- [6] Benzerrouk S., Reinhold L., Apelian D.: Active thermography for the Detection of Defects in Powder Metallurgy Compacts, Worcester Polytechnic Institute, Worcester, MA 01609, 06.2007.
- [7] Wyczółkowski R., Piechowicz Ł., Benduch A.: Zastosowanie analogii cieplno-elektrycznej do wyznaczenia własności cieplnych kręgu blachy. „Modelowanie Inżynierskie” 2013, nr 46, t. 15, s. 121 – 126.

otrzymano / received: 06.02.2014

przyjęto do druku / accepted: 02.09.2014

artykuł recenzowany / revised paper