

# Prototyp wspinającej się platformy przeznaczony do diagnostyki ścian paleniska kotłów energetycznych dużej mocy

Maciej Cader

Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów, PIAP

**Streszczenie:** Diagnostyka ścian paleniska kotłów energetycznych dużej mocy jest obecnie wykonywana z wózków liniowych lub rusztowań. Operator dokonuje ręcznego pomiaru zużycia w wytypowanych punktach pomiarowych, których może być nawet 20 tys. W odpowiedzi na obecną metodę pomiaru, w Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów trwają prace nad prototypem systemu do automatycznej diagnostyki ścian palenisk. W skład systemu wchodzi robot wspinający się, konsola sterująca oraz oprogramowanie sterujące i realizujące obróbkę danych pozyskanych z robota. Niniejszy artykuł prezentuje wspinającą się platformę mobilną do zastosowania na potrzeby diagnostyki ścian paleniska kotłów.

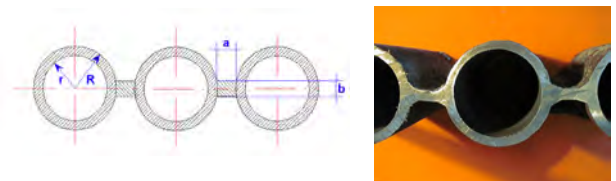
**Słowa kluczowe:** robot wspinający się, diagnostyka ścian paleniska, platforma gąsienicowa

W odpowiedzi na obecną metodę diagnostyki kotłów energetycznych, w Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów w Warszawie podjęto prace mające na celu opracowanie prototypu systemu do diagnostyki ścian paleniska kotłów energetycznych dużej mocy [1], [2], [3]. W skład systemu wchodzi wspinający się robot mobilny oraz specjalnie wzmacniany laptop przemysłowy, będący konsolą sterującą robota. Laptop zawiera oprogramowanie do wykonania diagnostyki rur. Oprogramowanie sterujące i diagnostyczne zostało opracowane w PIAP specjalnie do celów obsługi robota i wykonywania pomiarów. Do tej pory analizowano modele platform mobilnych, bazujących na pneumatycznym układzie napędowy. Zakładano również, że robot będzie poruszał się po metalowych ścianach paleniska dzięki specjalnym chwytakom magnetycznym, w których magnes stały będzie w odpowiedni sposób pozycjonowany dzięki zastosowaniu pneumatycznych chwytaków obrotowych. Doświadczenie zdobyte w wyniku testów laboratoryjnych i prób kolejnych modeli, wykonywanych na obiektach, pozwalało sukcesywnie identyfikować i eliminować problemy związane z konstrukcją, specyfiką prac oraz środowiskiem, do którego została przeznaczona. W następstwie wprowadzonych zmian konstrukcja wspinającej się platformy mobilnej zbliżyła się do ostatecznej wersji. Zdecydowano się na wyeliminowanie pneumatycznego układu napędowego na rzecz elektrycznego układu napędowego opartego na działaniu elektromagnesów współpracujących z gąsienicami.

## 1. Środowisko pracy oraz specyfika wykonywanych pomiarów

Tradycyjnie, w tym przypadku, diagnostyka ścian paleniska kotłów energetycznych polega na dokonaniu serii pomiarów

zużycia wierzchniej powierzchni rur paleniska. Analizowany jest poziom zmniejszenia wartości promienia  $R$  rur tworzących ściany kotłów w stosunku do wartości początkowej (rys.1). W przypadku wykrycia niedopuszczalnej grubości ściany rury w punkcie pomiarowym, wycina się dany fragment rury; jest to z reguły wycięcie powierzchni nawet kilkudziesięciu metrów kwadratowych ściany.



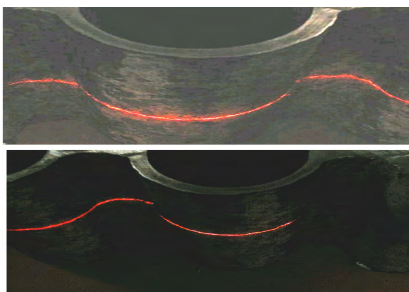
**Rys.1.** Sposób łączenia rur palenisk kotłów energetycznych dużej mocy. Wymiary zależą od typu kotła i wynoszą kolejno:  $a$  – od 5 do 20 mm;  $b$  – 5 mm;  $r$  – od 7,5 do 27,5;  $R$  odpowiednio – od 12,5 do 33,5

**Fig.1.** Way of the connecting pipes in high power boilers. The dimensions depend on the type of boiler and are in turn:  $a$  - from 5 to 20 mm,  $b$  - 5 mm,  $r$  - from 7.5 to 27.5;  $R$ , respectively - from 12.5 to 33.5

Obecnie diagnostyka jest prowadzona z rusztowań lub wózków liniowych za pomocą grubościomierzy ultradźwiękowych. Dokonywane są również oględziny wzrokowe, które mają na celu zgrubną ocenę zużycia i ocenę stanu technicznego ścian. Należy zauważyć, że ze względu na sprawny transport ciepła ze strefy spalania węgla (w palenisku kotła) do wnętrza rur prowadzących wodę i parę, grubość ścianek rur żaroodpornych musi być niewielka – ok. 5 mm. Uwzględniając fakt, że wewnętrzne ciśnienie jest wysokie i może nawet 200 razy przekraczać ciśnienie atmosferyczne, okazuje się, że użyteczny zakres strat grubości ścianki (zmniejszenia promienia  $R$ ) wynosi niewiele ponad 2 mm. Ogólnie przyjęto dopuszczalną precyzję urządzeń pomiarowych na poziomie nie gorszym niż 0,1 mm. Nie bez znaczenia jest fakt, że badanie grubości ścianek rur ekranowych jest oczywiście tylko jedną z wielu ocen, jakim poddaje się konstrukcję kotła podczas badań przed remontem. Inne to np.: badanie spawów (połączeń rur), obserwacje wżerów na powierzchni rur, badania metalograficzne itp.

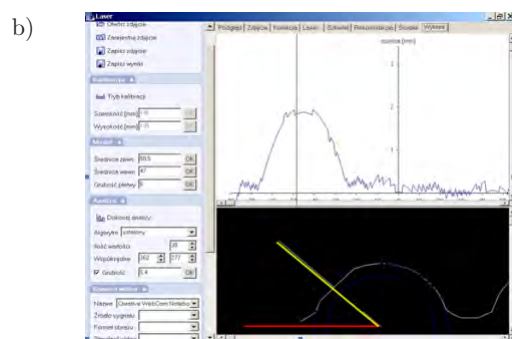
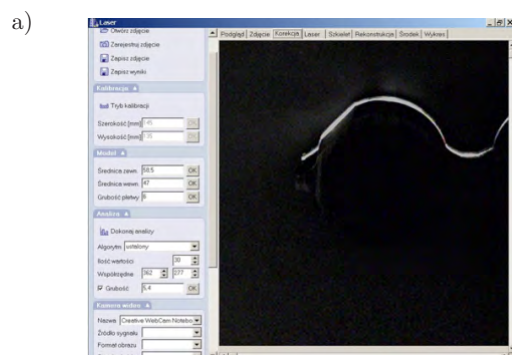
Założeniem jest, aby robot przemieszczający się po ścianach przenosił moduł pomiarowy do badania ubytków wierzchniej warstwy powierzchni rur paleniska. Ze względu na walory funkcjonalne wprowadzono do robota pomiary bezkontaktowe. Badanie całego półprofilu rury, narażonego na wysoką temperaturę oraz oddziaływania erozyjne i korozyjne podczas spalania węgla, daje możliwość bardziej precyzyjnego opisu stanu zużycia rur, co podnosi jakość ekspertyzy.

W trakcie prac nad prototypem systemu przetestowano różnego rodzaju czujniki – skanery laserowe, umożliwiające wykonanie diagnostyki w założony sposób. Głównym założeniem pomiaru jest analiza obrysu powierzchni rur i prognozowanie ich zużycia na bazie porównania z wprowadzonym obrysem wzorcowym. Pomiar jest dokonywany przez naświetlenie rury wiązką laserową (rys. 2), po czym wykonywane są operacje matematyczne obróbki profilu wyznaczonego przez wiązkę i porównanie z wzorcem. Ostatecznie do operatora trafia informacja o ubytku w grubości rury i kącie pomiaru tego ubytku (rys. 3). Operator, oglądając wyniki, sam może sterować kątem pomiaru ubytku, dzięki czemu możliwe jest pozyskanie informacji o zużyciu rury w każdym punkcie pomiaru.



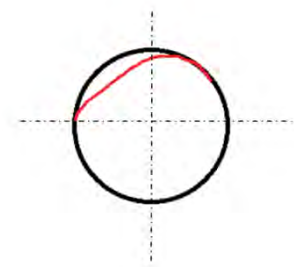
Rys.2. Wiązka skanera laserowego

Fig.2. Laser beam



Rys. 3. Oprogramowanie diagnostyczne współpracujące z modulem pomiarowym znajdującym się w robocie: a) profil przed obróbką, b) profil po obróbkach matematycznych; czerwoną kreską zaznaczono poziom względny, żółta kreska wyznacza kąt lokalizacji

Fig. 3. Diagnostic software cooperating with diagnostics module - a) profile before processing; b) profile after mathematical processing. Red line indicates relative level; yellow line indicates the angle of the expenditure location



Rys.4. Przekrój poprzeczny przez rurę. Kolorem czarnym zaznaczono obrys wzorcowy rury, kolorem czerwonym zaznaczono sposób zużycia zewnętrznej powierzchni rury

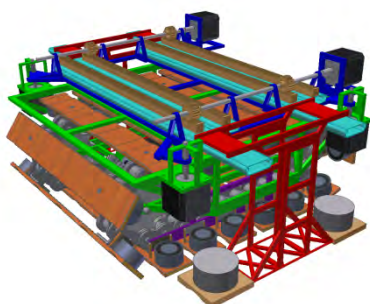
Fig.4. Cross section through the tube. Black color indicated the outline of the standard pipe, red color indicates the outer surface of real tube wear

Robot jest w stanie zmierzyć zużycie rur w kotłach fluidalnych i pyłowych. W kotłach pyłowych, w przeciwieństwie do fluidalnych, rury są omiatane przez spaliny cyrkulujące względem pionowej osi kotła, co sprawia, że ich zużycie nie jest równomierne względem osi (rys. 4), więc pomiar lokalizacji maksymalnego zużycia (tj. kąta) jest bardzo istotny.

## 2. Konstrukcja platformy

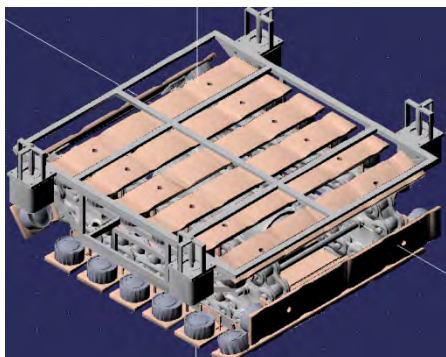
Aktualnie w PIAP, na bazie zdobytego dużego doświadczenia po testach i badaniach dotychczasowych konstrukcji nosnych bazujących na pneumatycznym układzie napędowym, opracowano poprawiony model wersji ostatecznej. Wersja ostateczna platformy nośnej (rys. 5) bazuje na gąsienicowym, elektrycznym układzie napędowym. Konstrukcja platformy jest złożona z dwóch głównych modułów – modułu głównego (rys. 6) i ramy górnej (rys. 7). Całkowita masa robota wraz z czujnikami wynosi ok. 25 kg. Do każdego elementu gąsienicy zostały zamocowane na jej końcach dwa elektromagnesy. Elektromagnesy współpracują z szyną zasilającą zamocowaną na stałe do konstrukcji nośnej (rys. 8). Dzięki takiemu rozwiązaniu mechanicznemu wyeliminowano konieczność sterownia (tj. włączania i wyłączania) elektromagnesami. Zasada działania układu włączania i odłączania elektromagnesów znajdujących się na gąsienicy głównej jest przez to bardzo prosta. Magnesy umieszczone na elementach obracającej się gąsienicy włączają się w momencie zetknięcia z szyną. Szyna jest tak zaprojektowana, aby moment włączenia/wyłączenia elektromagnesu następował tuż przed/po całkowitym zetknięciu/oderwaniu elektromagnesu. Dodatkowo elektromagnesy osadzone są w sposób podatny, co umożliwia poruszanie/przemieszczanie się elektromagnesu w niewielki zakresie, a tym samym lepsze dopasowanie do profilu powierzchni, po której porusza się platforma. Obecnie jeden elektromagnes przenosi siłę 180 N. W trakcie ruchu platformy, do powierzchni ściany przylega jednocześnie 10 elektromagnesów.

Pomiaru zużycia ścian paleniska kotłów energetycznych dokonuje się wertykalnie poprzez analizę zużycia każdej rury/grupy. To oznacza, że platforma wraz z układem pomiarowym rozpoczyna pomiar na dole rury, przechodzi na samą górę rury, a następnie przemieszcza się o zadaną wartość (jedna rura/określona ilość rur) w bok, prostopadle do



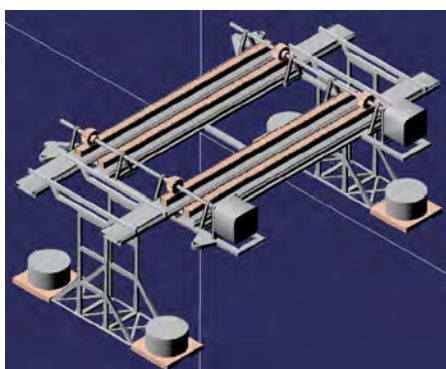
Rys.5. Projekt CAD platformy robota

Fig.5. The CAD project of the robot's platform



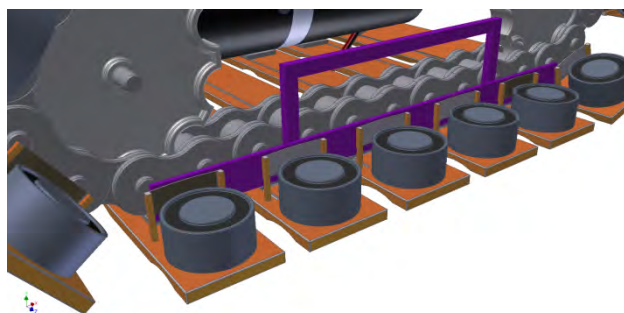
Rys. 6. Moduł główny platformy

Fig. 6. The main module of the platform



Rys. 7. Rama górna platformy

Fig. 7. The upper frame of the platform

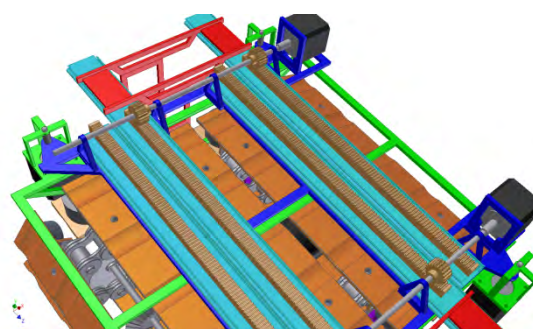


Rys. 8. Połączenie elektromagnesów ze źródłem zasilania

Fig. 8. The connection of electromagnets with the power source

osi rur. Wówczas wykonywany jest pomiar kolejnej rury/grupy rur z góry na dół. Po zjechaniu na dół czynność jest powtarzana dla kolejnej rury/grupy rur. Czasami zdarza się

również, że operator/diagnosta wymaga natychmiastowego pomiaru zużycia sąsiednich rur w stosunku do bieżącej na której wykonywany jest pomiar. Wynika to z wertykalnej charakterystyki zużycia rur w kotle. Ten fakt, jak i sposób wykonywania pomiaru, zdeterminował rozwiązanie konstrukcyjne, które odpowiada za „skręcanie” platformy nośnej. Platforma została zaprojektowana w taki sposób, aby w dowolnym momencie możliwe było wykonanie ruchu poprzecznego, jednokrokowego lub wielokrokowego. Problem ten rozwiązano stosując dedykowane prowadnice kulkowe napędzane dwoma silnikami (rys. 9). Do prowadnic zamocowano konstrukcję nośną ramy poprzecznej, do której po obu końcach zamocowano w podatny sposób po dwa elektromagnesy. Każdy z magnesów jest w stanie przenieść siłę 500 N. Podczas ruchu poprzecznego do powierzchni przylegają wszystkie cztery elektromagnesy.



Rys.9. Prowadnice kulowe napędzane przez dwa silniki

Fig.9. Ball guides powered by two engines

Cechami charakterystycznymi konstrukcji jest umieszczenie silnika głównego, napędzającego gaśienicę, w klatce znajdującej się w obrysie gaśienicy. Silnik o mocy 29 Nm z zabudowaną przekładnią planetarną realizującą 7,7 obrotu na minutę, został umieszczony wzdłużnie, zaś moment napędowy jest przekazywany z wału do kół napędowych przez układ prostopadłych względem siebie kół zębatach. Jedno koło zębata zostało umieszczone na wale silnika, a drugie na osi łączącej dwa koła napędowe gaśienicy. Drugą cechą charakterystyczną platformy jest to, że posiada ona jedną szeroką gaśienicę, której poszczególne elementy będą dedykowane dla konkretnych typów ścian kotłów i będą wykonywane z materiału ULTEM 9085\* z wykorzystaniem technologii FDM (ang. *Fused Deposition Modeling*). Aktualnie wykonywane są testy modyfikacji procesu wytwarzania modelu elementu gaśienicy poprzez wtapienie w jego strukturę ferromagnetyku, co spowoduje zwiększenie powierzchni działania elektromagnesu.

Rama konstrukcji nośnej jest wykonana ze stali kwasowej. Takie podejście pozwoliło na zaprojektowanie filigranowej kratownicy o dużej wytrzymałości.

Obecnie trwają testy modelu konstrukcji wykonywane w komputerowych system analitycznych [4]. W systemie ADAMS wykonano już symulację ruchu robota oraz testy przylegania do powierzchni ściany paleniska dla różnych typów magnesów. Na podstawie symulacji dobrano właściwe elektromagnesy. Równolegle prowadzone są w systemie ANSYS statyczne analizy wytrzymałościowe oraz optymalizacja topologiczna konstrukcji.

## 2.1. Synteza ruchu

Symulacja ruchu robota wykonana w systemie ADAMS polegała na wykonaniu przez robota ruchu podłużnego (rys.10), zatrzymaniu i wykonaniu ruchu porzecznego.



**Rys. 10.** Ruch podłużny

**Fig. 10.** Longitudinal motion



**Rys.11.** Pierwsza faza ruchu poprzecznego – wysunięcie górnej ramy

**Fig.11.** The first phase of the transverse motion – siding the upper frame



**Rys. 12.** Druga faza ruchu poprzecznego – opuszczenie ramy górnej

**Fig. 12.** The second phase of the transverse motion – leave the upper frame

W celu zrealizowania ruchu poprzecznego po zatrzymaniu robota, wysuwana jest ta część ramy górnej, w którą ma zostać przesunięty moduł główny (rys.11). Następnie rama górna jest opuszczana (rys.12), magnesy przylegają do powierzchni ściany, po czym moduł główny jest podnoszony do



**Rys. 13.** Trzecia faza ruchu poprzecznego – przemieszczenie modułu głównego

**Fig. 13.** The third phase of the transverse motion – displacement of the main module



**Rys.14.** Czwarta faza ruchu poprzecznego – opuszczenie modułu głównego i podniesienie ramy górnej

**Fig.14.** Fourth phase of the transverse motion – leasing the main module and raising the Upper frame



**Rys.15.** Piąta faza ruchu poprzecznego – złożenie ramy górnej

**Fig.15.** The fifth phase of the transverse motion – folding the main frame

góry i przemieszczany w skrajne położenie (rys.13). Moduł główny jest opuszczany (rys.14), zaczynają działać magnesy na gaśnicach, po czym zwalniane są magnesy ramy górnej i rama górna jest podnoszona i chowana (rys.15). W trakcie ruchu poprzecznego rama górna nie musi zostać chowana. Istnieje możliwość szybkiego przemieszczenia platformy na sąsiednią rurę/partię rur w celu wykonania ruchu poprzecznego „na zawołanie”.

W pracach nad konstrukcją robota brali czynny udział studenci z wydziału Mechanicznego Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej podczas praktyk w Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów. Jako koordynator prac nad konstrukcją specjalne podziękowania kieruję do panów: Antoniego Tomaszuka, Michała Cieśli, Piotra Trębacza, Jarosława Brodowskiego.

## Bibliografia

1. Z. Borkowicz, J. Będkowski, M. Cader, G. Kowalski, Spider – a mobile robot for industry, in Proceedings of the 5th Workshop on European Scientific and Industrial Collaboration on promoting Advanced Technologies in Manufacturing (WESIC'2007), Warsaw, Poland, 2007.
2. Z. Borkowicz, M. Cader, Zrobotyzowany system do badania zużycia energetycznych kotłów dużej mocy, ENERGETYKA, 2008, nr 10.
3. G. Kowalski, Z. Borkowicz, M. Cader, Evolution of the Industrial Mobile Inspection Robot Spider”, Tehnomus XV, Suceava, Romania, 2009.
4. G.Kowalski, M.Cader, Z.Borkowicz, Wykorzystanie symulacji komputerowych w procesie projektowania mobilnych robotów inspekcyjnych, Pomiary, Automatyka, Robotyka, 2010, nr 2. ■

## The prototype of the climbing platform dedicated for inspection of the power boiler's walls

**Abstract:** Nowadays, diagnostics of high-energy boilers' walls is carried out mainly from scaffoldings. Servicemen carry out manual measurements of the use of the boiler in selected points, which can be up to 20 thousands. In response to the current method of measuring the Industrial Research Institute for Automation and Measurements is working on a prototype system for automated diagnostic of boilers' walls. The system consists of the climbing robot, control console and software for control and processing data obtained by the robot. This article presents the results of work of engineers from the Institute, the results of studies and the first tests of the system.

**Keywords:** climbing robot, power boiler's diagnostic, mobile caterpillar platform

### mgr inż. Maciej Cader

Absolwent Wydziału Mechanicznego Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej. Obecnie pracownik Przemysłowego Instytutu Automatyki i Pomiarów, PIAP. Zajmuje się konstruowaniem, zaawansowanymi symulacjami komputerowymi i technologiami przyrostowymi. Współautor kilkunastu publikacji o tematyce związanej z robotyką mobilną.

e-mail: [mcader@piap.pl](mailto:mcader@piap.pl)

