

---

**PRACE**

**Instytutu Ceramiki  
i Materiałów Budowlanych**

---

***Scientific Works***  
of Institute of Ceramics  
and Building Materials

---

**Nr 9**

ISSN 1899-3230

**Rok V**

**Warszawa–Opole 2012**

---

*SŁAWOMIR ZATOR\**  
*PAWEŁ MICHALSKI\*\**  
*MIROŚLAW LASAR\*\*\**

# Hybrydowe pomiary geometrii i temperatury pieca obrotowego na potrzeby diagnostyki

**Słowa kluczowe:** diagnostyka, termowizja, odkształcenie geometrii, skaning laserowy.

W artykule zaprezentowano implementację dwóch technik: skaningu laserowego do odtworzenia geometrii obiektu i termografii do uzyskania rozkładu temperatury na powierzchni pieca obrotowego w cementowni. Geometrię pieca odtworzono korzystając ze skanera laserowego Trimble FX, wykonując pięć sesji pomiarowych z różnych pozycji, aby uzyskać możliwie pełny obraz powierzchni obiektu. Wynikiem pomiarów jest chmura punktów odwzorowująca powierzchnię płaszcza pieca. Pomiary wykonano podczas postoju pieca, tj. planowego remontu. Odtworzony na podstawie chmury punktów model pieca pozwala zaobserwować odcinki cylindryczne, których osie nie pokrywają się z główną osią pieca. Pomiar rozkładu temperatury pieca wykonano w trakcie jego rozruchu kamerą termowizyjną VarioCAM Head. Ponieważ ograniczenia wynikające z kąta widzenia teleobiektywu kamery termowizyjnej nie pozwoliły na ujęcie pieca w całości na pojedynczym termogramie, dlatego – aby otrzymać termogram pojedynczego segmentu pieca – kamerę umieszczono na obrotnicy i wykonano sekwencje pomiarów. Powtarzając pomiary całej szerokości pieca, otrzymano serię termogramów, które następnie połączono ze sobą, uzyskując termogramy o wysokiej rozdzielczości. Przygotowane obrazy zrzutowano na model 3D uzyskany na podstawie skaningu laserowego, co pozwoliło na stworzenie rozkładu temperatury w środowisku wirtualnym, w którym można zdiagnozować stan wymurówki badanego pieca obrotowego z rozdzielczością kilkukrotnie wyższą niż standardowo wykonywane termogramy, z jednoczesnym dostępem do rzeczywistych współrzędnych obserwowanych detali.

## 1. Wprowadzenie

Bezdotykowe metody diagnostyczne dostępne obecnie na rynku umożliwiają znaczne przyspieszenie procesu diagnostyki maszyn. Geometrię płaszcza pieca

---

\* Dr hab. inż., Instytut Elektrowni i Systemów Pomiarowych, Politechnika Opolska.

\*\* Mgr inż., Instytut Elektrowni i Systemów Pomiarowych, Politechnika Opolska.

\*\*\* Mgr inż. Instytut Elektrowni i Systemów Pomiarowych, Politechnika Opolska.

obrotowego bada się na podstawie serii pomiarów wykonanych w przekroju mających na celu ocenę powłoki. Pomiar można wykonać czujnikiem laserowym odległości bądź też narzędziami mechanicznymi [1]. W rezultacie otrzymuje się siatkę obrazującą wyniki z poszczególnych przekrojów. Metody skaningu laserowego – przy dużo mniejszym nakładzie czasu oraz pracy ekipy remontowej – pozwalają uzyskać zbliżony efekt. Kluczem do uzyskania precyzyjnej diagnostyki jest zebranie maksymalnych ilości informacji o badanym obiekcie [2]. Informacje takie można otrzymać poprzez integrację różnych technik pomiarowych, tworząc nową jakość. Integracja informacji o kształcie powierzchni pieca z informacją o jego aktualnej temperaturze pozwala w bardzo krótkim czasie na zlokalizowanie punktów krytycznych znajdujących się na obiekcie. Punkty te charakteryzują się wyższą temperaturą, co oznacza, że wymurówka wewnątrz płaszcza uległa zniszczeniu. Na podstawie dokładnej analizy otrzymanych pomiarów opracowuje się plan remontu, a efektami są obniżenie kosztów i wydłużenie czasu pracy pieca.

## 2. Aparatura pomiarowa

Pomiar geometrii obiektu wykonano przy użyciu skanera laserowego firmy Trimble. Urządzenie mierzy odległości na bazie przesunięcia fazowego wiązki laserowej. Pole widzenia skanera wynosi  $360^\circ \times 270^\circ$  i można wykonać pełne ( $360^\circ$ ) skanowanie. Ponadto urządzenie ma zasięg do 70 m, wystarczający do wykonania pojedynczego skanowania, oraz 140 m do skanowania podwójnego. Dane z urządzenia przedstawione są w postaci grafiki o wysokiej rozdzielczości. Każdy pixel obrazu odpowiada punktowi w przestrzeni trójwymiarowej. Skaner wykonuje średnio 216 000 pomiarów na sekundę, co przy średnim czasie skanowania wynoszącym 5 min daje ogromną ilość informacji do przetworzenia. Precyzja pomiaru obiektu oddalonego o 11 m wynosi 0,6 mm w pojedynczym skanowaniu oraz 0,45 mm w skanowaniu podwójnym. Urządzenie jest przewidziane do pracy w temperaturze 278K do 318K.

Do pomiaru temperatury zastosowano kamerę termowizyjną VarioCAM Head o matrycy 320 x 240 pikseli, o bardzo dużym zakresie pomiaru: od 233K do 1437K. Kamera pracuje w temperaturze otoczenia od 258K do 323K. Jej rozdzielczość temperaturowa wynosi 0,08K, a niepewność pomiaru temperatury – 2K. Kamera termowizyjna może współpracować z trzema obiektywami: standardowym (ogniskowa  $f=25$  mm, kąt widzenia  $32^\circ \times 25^\circ$ ), szerokokątny (ogniskowa  $f=12,5$  mm, kąt widzenia  $64^\circ \times 25^\circ$ ) oraz teleobiektywem (ogniskowa  $f=100$  mm, kąt widzenia  $8^\circ \times 6^\circ$ ). Kamera ma stosunkowo niską rozdzielczość i wykonując jeden termogram, nie obejmuje całości instalacji. Dlatego kamerę zamontowano w układzie Pan&Tilt, pozwalającym na jej obrót w dwóch ortogonalnych osiach. Jest on napędzany dwoma precyzyjnymi silnikami krokowymi zainstalowanymi w modułach NR360SP9/M firmy THORLabs, które są

sterowane poprzez moduł CompactRIO Real-Time Controller firmy National Instruments oraz oprogramowanie napisane w środowisku LabVIEW [3].

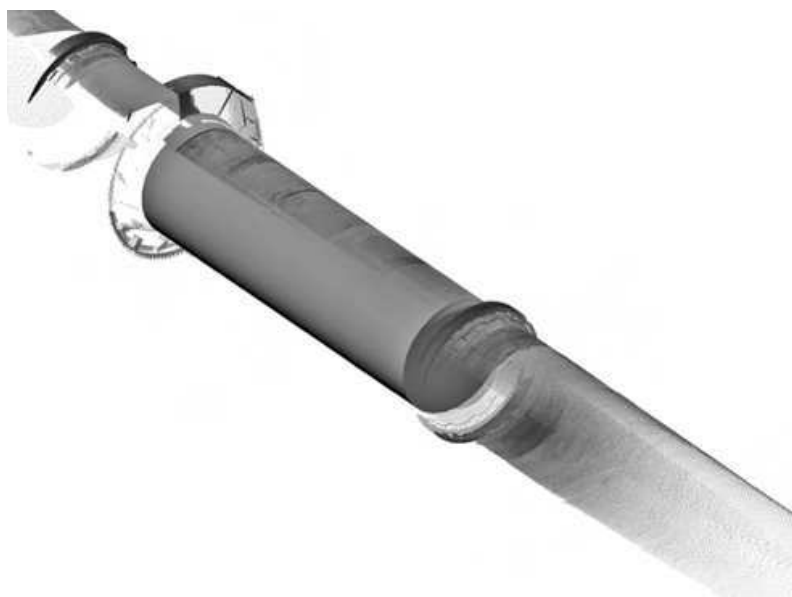
### 3. Metodologia pomiaru

Obiektem pomiarowanym był piec obrotowy służący do wyrobu klinkieru cementowego. Odtworzenie geometrii pieca, ze względu na jego gabaryty, wymagało skanowania z pięciu różnych pozycji. Pomiar istotnie ułatwiło zatrzymanie ruchu obrotowego pieca w czasie okresowego remontu. Ruch badanego obiektu ma znaczny wpływ na jakość danych pochodzących z urządzenia skanującego. Do ruchomych obiektów walcowych można przystosować urządzenie służące do wykonywania skanu liniowego oraz obiektu wzdłuż. W wyniku pomiaru uzyskano pięć niezależnych skanów, które następnie zintegrowano przy użyciu specjalnych markerów, wcześniej rozmieszczonych na instalacji. Markerami były kule o znanej średnicy, ale istnieje możliwość zastosowania również płaskich wzorców. W procesie postprocessingu markery takie wyszukiwane zostają przez oprogramowanie, a każdemu z nich jest nadawana etykieta identyfikacyjna. Na podstawie obliczonych odległości pomiędzy środkami markerów, w tym przypadku kuli, oprogramowanie lokalizuje położenie osi skanera na poszczególnych skanach, co z kolei pozwala zarejestrować je ze sobą (połączyć).

Do założenia skanów co najmniej wymagane są trzy markery. Jednak im więcej wspólnych markerów zostanie zlokalizowanych na składanych skanach, tym lepszy uzyskuje się efekt dopasowania. Proces ten odbywa się półautomatycznie. Efektem końcowym pomiaru jest chmura punktów, która dla badanego obiektu wyniosła około 7,2 mln punktów.

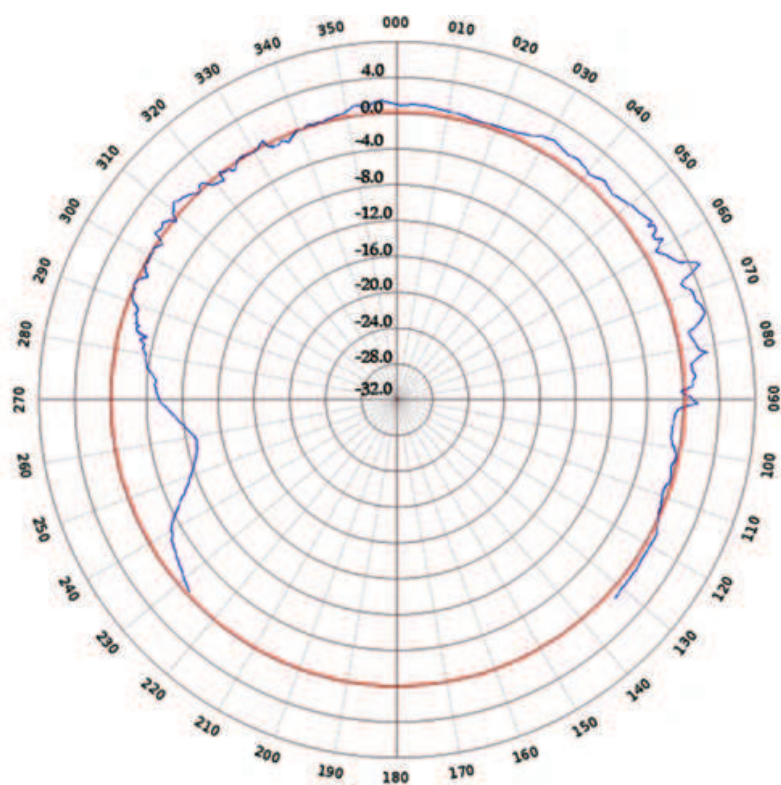
W przypadku tak dużych obiektów, jak badany

piec obrotowy, niezmiernie trudno jest uzyskać punkty pomiarowe z całej jego powierzchni. W celu uzyskania modelu o pełnym kształcie do wyselekcjonowanej grupy punktów dopasowuje się bryły proste, tzw. prymitywy. Przykład prymitywu dopasowanego do chmury punktów przedstawiono na rycinie 1.



Źródło: Opracowanie własne.

Ryc. 1. Dopasowanie prymitywu do chmury punktów

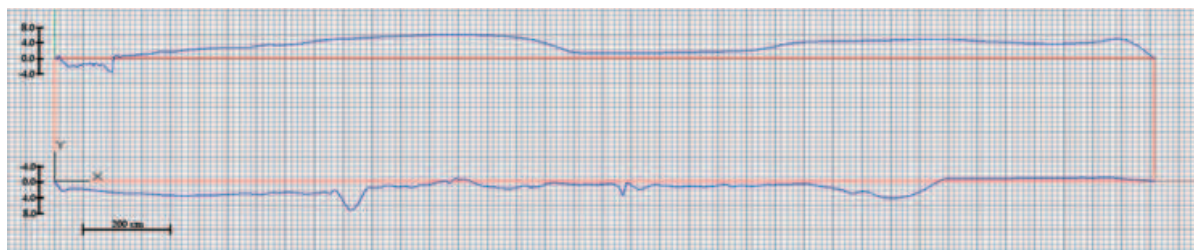


Źródło: Opracowanie własne.

Ryc. 2. Przekrój poprzeczny płaszcza pieca, czerwony okrąg symbolizuje warunki idealne

Na podstawie chmury punktów odtworzono segmenty płaszcza pieca obrotowego poprzez dopasowanie walców do poszczególnych jego segmentów. W ten sposób uzyskano znacznie prostszy model bryłowy pieca, który następnie mógł być wyeksportowany i przetwarzany w środowiskach inżynierskich typu AutoCAD.

Na rycinie 2 przedstawiono przekrój prostopadły do osi badanego pieca, uzyskany na podstawie chmury punktów z pomiarów. Czerwony okrąg widoczny na rycinie przedstawia stan pro-

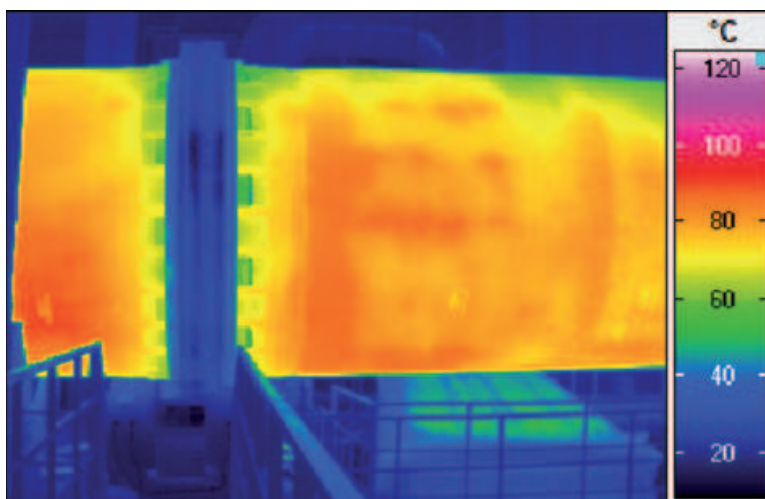


Źródło: Opracowanie własne.

Ryc. 3. Przekrój wzdłużny fragmentu płaszcza pieca

jektowy płaszcza pieca obrotowego, a kolorem niebieskim oznaczono odchyłkę, na podstawie której można ocenić skalę zniekształceń. Na wykresie biegunowym odkształcenie, wzdłuż promienia, zostało przeskalowane 50:1. Niestety, podczas badań nie otrzymano pełnego skanu ( $360^\circ$ ) ze względu na trudności z zainstalowaniem skanera pod piecem. Na podstawie pomiarów można wygenerować dowolną liczbę przekrojów z zadaniem interwałem oraz szerokością płata tnącego, co pozwala na dokładną lokalizację powstałych odkształceń na powierzchni pieca. Na rycinie 3 przedstawiono przekrój wzdłużny fragmentu płaszcza pieca zlokalizowanego pomiędzy podporami. Aby powstałe odkształcenia były lepiej widoczne, zostały również przeskalowane.

Wykorzystując rzutowanie chromatyki zdjęć na chmurę punktów, w tym także termograficznych, uzyskuje się dane o rozkładzie trójwymiarowym, np. rozkładzie temperatury. Biorąc jednak pod uwagę bardzo niską rozdzielczość termowizyjnych zdjęć standardowych w stosunku do gęstości punktów, opracowano sposób, który poprawia otrzymane wyniki.



Źródło: Opracowanie własne.

Ryc. 4. Pojedynczy termogram pieca podczas wygrzewania

Ze względu na duże gabaryty obiektu pomiary kamerą termowizyjną również musiały być wykonane kilka razy przy różnej pozycji kamery, ponieważ nie było technicznych możliwości ujęcia całego pieca na pojedynczym termogramie (ryc. 4).

Zadanie to zrealizowano dzięki układowi naprowadzającemu (obrotnicy), sterowanemu dwoma silnikami krokowymi w dwóch osiach – poziomej i pionowej. Przy użyciu dalmierza laserowego DISTO D8 zmierzono odległości kamery od punktów odniesienia badanego obiektu. Na podstawie kątów widzenia układu optycznego kamery obliczono wymagane liczby kroków, jaką muszą wykonać silniki. Po wykonaniu serii pojedynczych pomiarów w poziomie połączono je w jeden termogram, jak na rycinie 5, a następnie powtórzono serie pomiarów dla kolejnych pozycji płaszcza pieca. Po kilku seriach zdjęć połączono je w jedną całość tworzącą rozwinięcie walca na płaszczyźnie. Oprogramowanie zostało zaprojektowane i wykonane w środowisku LabVIEW. Panel sterujący umożliwił sterowanie silnikami krokowymi oraz wykonywanie zdjęć termowizyjnych. Proces łączenia zdjęć polegał na przekonwertowaniu pliku do postaci jawnej (temperatury), a następnie do pliku graficznego w skali odcieni szarości. Kolejnym etapem było wykorzystanie oprogramowania przeznaczonego do tworzenia panoram. Na etapie końcowym powrócono z postaci graficznej do postaci



Źródło: Opracowanie własne.

Ryc. 5. Połączony termogram po wykonaniu poziomej serii pomiarów

tekstowej, tak aby każdy piksel termogramu posiadał swoją wartość temperaturową. Dzięki takiej konwersji możliwy był przegląd otrzymanego termogramu w aplikacji dostarczonej wraz z kamerą, oraz integracja termogramu z modelem ze skanera.



Ź r ó d ł o: Opracowanie własne.

Ryc. 6. Przykład termogramu nałożonego na chmurę punktów uzyskaną ze skaningu laserowego. Proces integracji skanu z termogramem polega na przypisaniu punktów termogramu odpowiadającym im punktom w przestrzeni (chmury punktów) uzyskanych ze skanera metodą rzutowania wstecznego. Końcowy efekt pokazano na rycinie 6.

## Podsumowanie

W specyficę procesów bazujących na mechanice wpisane jest stałe zużywanie się poszczególnych elementów pieca oraz ich deformacja prowadząca do awarii. Dlatego też celowy jest monitoring najbardziej obciążonych punktów obiektu, czyli krytycznych. Takie punkty można częściowo zlokalizować, wykorzystując techniki pracujące w pasmie średniej podczerwieni, czyli termowizyjne. Synergia termowizji ze skanowaniem laserowym pozwala nie tylko na diagnozę odkształceń już powstałych w wyniku działania procesu, ale głównie daje możliwość wyszukania w obiekcie punktów newralgicznych, w których takie deformacje mogą dopiero wystąpić. Na przykładzie badanego obiektu przedstawiono możliwe zastosowanie tak zintegrowanych technik pomiarowych.

## Literatura

- [1] Ś w i t a l s k i M., *Ocena stanu płaszcza walczaka obrotowego poprzez pomiar dynamicznych ugięć wałów rolek nośnych*, „Diagnostyka” 2005, nr 35, s. 17–26.
- [2] C h a p m a n R.O., *Recommended procedures for mechanical analysis of rotary kilns*, Bethlehem, Pa USA, 1981.
- [3] Z a t o r S., L a s a r M., *Uzyskiwanie termogramów wysokiej rozdzielczości*, „PAK” 2011, nr 12, s. 1480–1482.

SŁAWOMIR ZATOR  
PAWEŁ MICHALSKI  
MIROSLAW LASAR

### ROTARY KILN GEOMETRY AND TEMPERATURE HYBRID MEASUREMENTS FOR DIAGNOSTIC PURPOSES

**Keywords:** diagnostics, thermo vision, deformation geometry, laser scanning.

This paper presents an implementation of two techniques, laser scanning for the object geometry reconstruction and thermography to obtain the temperature distribution on the surface of the rotary kiln located in the cement plant. Rotary kiln geometry was reconstructed using the FX laser scanner Trimble by taking 5 measurement sessions from various locations to get the full picture of the object surface. The measurement result is a cloud of points mapping the surfaces of the kiln. Measurements were made during a planned renovation, of the kiln. Model reconstructed on the basis of the point cloud allows to observe cylindrical segments, whose axes do not coincide with the major axis of the rotary kiln. Measurement of the temperature distribution on the kiln surface was performed using a thermal imaging camera VarioCam Head. Infrared camera telephoto angle limitations did not allow to capture the whole kiln on a single thermogram, the problem was solved by mounting the camera on the turntable and performed the sequence of measurements to obtain thermograms of the kiln single segment. Repeating the measurements for the entire width of the kiln achieved a series of thermograms, which were then combined together to yield high-resolution thermograms. Such prepared images were cast to the 3D model, which allows to watch the temperature distribution in a virtual environment. It allows to diagnose the state of the rotary kiln lining with a resolution several times higher than the standard thermograms performed with simultaneous access to the actual coordinates of the observed details.