

Tadeusz PIĄTKOWSKI
Henryk MADURA
Krzysztof CHMIELEWSKI

PRECYZYJNE POMIARY TEMPERATURY POWIERZCHNI METALI PIROMETREM TRZYPASMOWYM

STRESZCZENIE *Pirometryczne pomiary temperatury powierzchni metali obarczone są znacznymi błędami ze względu na zależność emisyjności od długości fali. Emisyjność ta może być aproksymowana funkcją potęgową. Do precyzyjnych pomiarów temperatury powierzchni metali wykorzystano pirometr trzypasmowy. Zaimplementowana metoda wyznaczenia temperatury kompensuje wpływ emisyjności. Przeprowadzono symulacje określające wpływ promieniowania tła w powiązaniu z emisyjnością obiektu na wynik pomiaru oraz określono minimalne wartości stosunku sygnału do szumu przy założonym błędzie pomiarowym. W warunkach laboratoryjnych wyznaczono błędy pomiarowe w zakresie temperatur od 200 °C do 600 °C dla płytki testowej wykonanej ze stopu aluminium. Uzyskano zgodność temperatury wyznaczonej pirometrem i metodą stykową z błędem poniżej 1% dla temperatur próbki powyżej 400 °C.*

Słowa kluczowe: *pirometry, emisyjność, pomiary temperatury*

dr inż. Tadeusz Piątkowski
e-mail: tpiatkowski@wat.edu.pl,

dr hab. inż. Henryk Madura prof. WAT
e-mail: hmadura@wat.edu.pl,

dr inż. Krzysztof Chmielewski
e-mail: chmielewski@wat.edu.pl.

Wojskowa Akademia Techniczna
Instytut Optoelektroniki

1. WSTĘP

Podstawowym źródłem błędów przy zdalnych pomiarach temperatury jest błąd związany z emisyjnością powierzchni obiektu. W większości przypadków wartość emisyjności jest nieznaną lub też jest określona ze stosunkowo dużym błędem. W pomiarach o typowej dokładności dopuszcza się błąd określenia emisyjności rzędu 20% [3]. Dodatkowe źródło błędów wynika z zależności emisyjności od temperatury. Dotyczy to pomiarów w szerokim zakresie zmian temperatury lub też szybkozmiennych zjawisk termicznych. Kompensacja wpływu emisyjności jest możliwa przy pomiarach pirometrami dwupasmowymi [9], jeśli obiekt mierzony jest ciałem szarym, czyli jego emisyjność jest stała. Dla tych przyrządów wzór obliczeniowy na temperaturę zależy od ilorazu sygnałów z dwóch kanałów pomiarowych, co przy stałej emisyjności prowadzi do jej wyeliminowania. Metale jako klasa obiektów rzeczywistych nie spełniają warunków ciał szarych. Są to ciała kolorowe, których emisyjność jest funkcją długości fali promieniowania termicznego. Kompensacja wpływu emisyjności dla metali jest możliwa pod warunkiem zwiększenia liczby pasm pomiarowych. Przyrządami realizującymi tę ideę są pirometry wielopasmowe [2]. Urządzenia takie wykorzystywane są głównie w laboratoriach metrologicznych i w badaniach kosmicznych. Wysokie ceny tych przyrządów wynikają ze skomplikowanej konstrukcji oraz rozbudowanego oprogramowania akwizycji i przetwarzania danych. Rozwiązaniem pośrednim jest pirometr trzypasmowy ze wstępnie przyjętymi funkcjami aproksymującymi emisyjność spektralną obiektu [5] i z algorytmicznym wyborem jednej z tych funkcji w trakcie pomiaru [6].

2. TRÓJPASMOWA METODA POMIARU TEMPERATURY

Sygnał wywołany promieniowaniem cieplnym od obiektu jest w danym kanale pomiarowym pirometru opisany równaniem

$$S_i = \varepsilon(\lambda_i) \cdot \frac{C_1}{\lambda_i^5 \cdot e^{\frac{C_2}{\lambda_i \cdot T}}} \quad (1)$$

gdzie:

- $\varepsilon(\lambda)$ – emisyjność spektralna,
- C_1, C_2 – stałe promieniowania,
- λ_i – długość fali w i -tym kanale pomiarowym,
- T – temperatura obiektu.

Pierwszy człon wyrażenia opisuje właściwości emisyjne obiektu, natomiast drugi wynika z prawa promieniowania Plancka. W pirometrze trzypasmowym są przetwarzane trzy różne sygnały odpowiadające trzem kanałom spektralnym przyrządu. Na ich podstawie, z układu trzech równań można wyznaczyć trzy niewiadome. Jedyną z niewiadomych jest wielkość mierzona, tj. temperatura T . Pozostałe dwie zmienne opisują emisyjność spektralną obiektu. W literaturze przyjmowanych jest wiele różnych postaci funkcji z tym, że najczęściej wykorzystywana jest postać wielomianowa albo wykładnicza z wielomianem w wykładniku [1]. Analiza, dostępnych literaturowo [7], wyników pomiarów emisyjności spektralnych materiałów wykazała, że takie postaci funkcji wymagają wyższych stopni wielomianu, a tym samym większej liczby zmiennych niż 2. Ze względu na przeznaczenie pirometru do pomiarów temperatury powierzchni metali jako podstawową funkcję aproksymującą emisyjność spektralną obiektu zaproponowano funkcję potęgową o postaci

$$\varepsilon(\lambda) = a \cdot \lambda^b \quad (2)$$

gdzie:

a, b - stałe współczynniki.

Jest to podzbiór funkcji aproksymujących emisyjność realizowanych przez opracowany w IOE pirometr trzypasmowy [5, 6]. Pozostałymi funkcjami są:

- funkcja wykładnicza o postaci

$$\varepsilon(\lambda) = ae^{b\lambda} \quad (3)$$

- funkcja wykładnicza o postaci

$$\varepsilon(\lambda) = e^{a+b\lambda^2} \quad (4)$$

Dla pirometru trzypasmowego z aproksymacją emisyjności funkcją potęgową wyznaczono analitycznie zależność na temperaturę

$$T = \frac{A}{\ln\left(\frac{S_2}{S_3}\right) - B \cdot \ln\left(\frac{S_1}{S_2}\right)} \quad (5)$$

gdzie stałe A i B dane są wzorami:

$$A = C_2 \cdot \left[\frac{\ln(\lambda_2) - \ln(\lambda_3)}{\ln(\lambda_1) - \ln(\lambda_2)} \cdot \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) - \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_3} \right) \right] \quad B = \frac{\ln(\lambda_2) - \ln(\lambda_3)}{\ln(\lambda_1) - \ln(\lambda_2)} .$$

W metodzie zaimplementowanej w pirometrze możliwe jest zastosowanie różnych sposobów przetwarzania danych pomiarowych. Każdy ze sposobów jest określony przez przyjęty sposób aproksymacji nieznanej emisyjności spektralnej mierzonego obiektu. Zaproponowano takie sposoby aproksymacji charakterystyki spektralnej emisyjności obiektu, aby obliczenie temperatury nie wymagało ingerencji operatora. W szczególności nie jest wymagane wprowadzenie do przyrządu wartości emisyjności obiektu.

3. PIROMETR TRZYPASMOWY

Wykonano pirometr trzypasmowy pracujący w oparciu o ilorazowy algorytm wyznaczenia temperatury (5) uwzględniającym a priori emisyjność obiektu w postaci funkcji potęgowej (2). W tabeli 1 zestawiono podstawowe parametry techniczne pirometru.

TABELA 1

Pirometr trzypasmowy - podstawowe dane techniczne.

	Kanał I	Kanał II	Kanał III	Uwagi
Środkowa długość fali	1,35	2,0	2,5	[μm]
Typ filtru optycznego	Pasmowo-zaporowy 750 nm	Pasmowo-zaporowy 1,6 μm	brak	
Szerokość połówkowa filtru	350	450	1000	[nm]
Typ detektora	DSD2	XSNG-λ2.5	P8079-01	

Dokładność oszacowania emisyjności obiektu jest głównym źródłem błędów pomiarowych. Ważnym źródłem błędów, który ogranicza dokładność pomiarów temperatury są szумы i zakłócenia elektryczne występujące w torze elektronicznym pirometru.

Analizę błędów pomiaru temperatury, związaną z ilorazowymi metodami obliczeń, należy przeprowadzić dla najmniej korzystnego przypadku pomiarowego. Ma on miejsce, gdy obiekt mierzony ma temperaturę równą dolnej temperaturze zakresowej danego pirometru.

3.1. Błąd związany z promieniowaniem tła

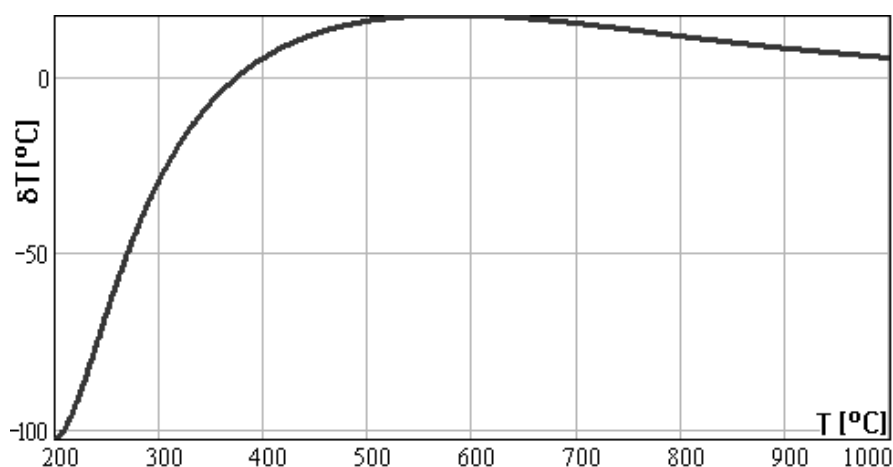
Emisyjność wpływa na wynik pomiaru temperatury na dwa sposoby. Po pierwsze jest czynnikiem skalującym występującym w podstawowej zależności (1), na podstawie której wyznaczana jest temperatura. Po drugie ze względu na współczynnik odbicia (dla materiałów nieprzezroczystych)

$$\rho = 1 - \varepsilon, \quad (6)$$

ponieważ do detektorów dociera dodatkowo odbite promieniowanie tła. Wpływ tego promieniowania jest trudny do uwzględnienia w obliczeniach [4]. Jego wpływ jest znaczący, gdy mierzone są objekty o małej emisyjności, czyli dużym współczynniku odbicia. Takimi właśnie są przedmioty wykonane z metali. Dużą trudność nastręcza też określenie ekwiwalentnej temperatury otoczenia. W ogólności nie jest to temperatura powietrza w pomieszczeniu, w którym odbywa się pomiar. Jest ona wypadkową promieniowania obiektów o temperaturach wyższych w porównaniu z temperaturą pomieszczenia. W celu określenia błędu pomiaru metody trzypasmowej, wynikającej z promieniowania tła, przeprowadzono symulacje pomiaru temperatury przy następujących założeniach:

- przedmiot wykonany jest ze stali,
- obiekt ma dolną temperaturę zakresową tj. 200°C,
- ekwiwalentna temperatura otoczenia wynosi ok. 50% dolnej temperatury zakresowej.

Wykres błędu zamieszczono na rysunku 1.

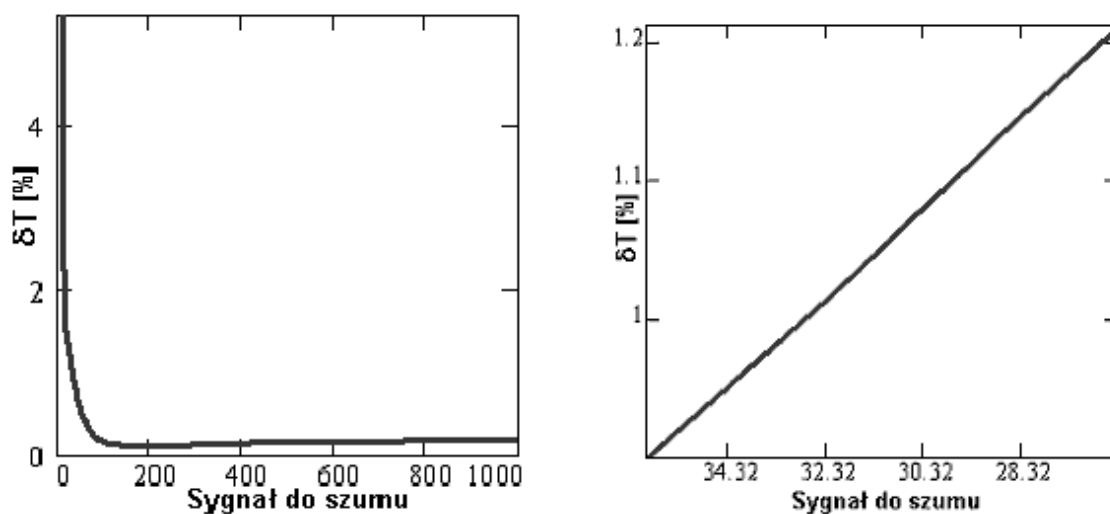


Rys. 1. Błąd pomiaru w obecności promieniowania tła dla pirometru trzypasmowego

Metoda trzypasmowa jest czuła na dodatkowe, zakłócające promieniowania pochodzące od tła. Błędy pomiaru dla dolnej temperatury zakresowej są rzędu 50%. Oznacza to, że pirometry z zaimplementowaniem tej metody nie mogą służyć do pomiarów temperatury przedmiotów o niskiej emisyjności, jeśli w otoczeniu znajdują się obiekty o znacznej temperaturze w porównaniu z dolną temperaturą zakresową przyrządu.

3.2. Stosunek sygnału do szumu

We wszystkich układach elektronicznych występuje szum i zakłócenia. Poziom tych sygnałów decyduje o dokładności pomiaru temperatury dla dolnej temperatury zakresowej. W praktyce jest trudno zrealizować dla wybranej temperatury układ o zmiennej zawartości szumów w sygnale. Możliwość taką stwarza symulacja komputerowa. Za pomocą symulacji możliwe jest określenie minimalnej wartości stosunku sygnału do szumu zapewniającej określony poziom błędu.



Rys. 2. Błąd pomiaru w funkcji stosunku sygnału do szumu

W celu analizy wpływu sygnału w stosunku do szumu na błędy pomiaru dodano składową szumową do sygnałów z poszczególnych kanałów pomiarowych. Założono przy tym, że źródło szumów ma rozkład normalny o wartości średniej równej zero oraz wartości skutecznej proporcjonalnej do wartości sygnału odpowiadającej dolnej temperaturze zakresowej przyrządu. Założono zgodnie z rzeczywistością, że szумы w poszczególnych kanałach nie są skorelowane. W poprawnie skonstruowanym przyrządzie składowe takie nie powinny

występować. W celu oceny wpływu szumów dla kolejnych wartości stosunku sygnału do szumu 100 razy losowano, dla każdego kanału oddzielnie wektor szumów. Następnie wyznaczano wartość końcową błędu. Była to wartość średnia błędu ze 100 pomiarów. Wyniki tak przeprowadzonej symulacji zamieszczono na rysunku 2.

Z rysunku 2 widać, że jeśli założymy wkład składnika pochodzącego od szumów do całości błędu pomiarowego na poziomie 1% to stosunek sygnał do szumu w każdym kanale powinien być lepszy niż $\text{SNR} \geq 33$.

4. EMISYJNOŚĆ SPEKTRALNA METALI

Emisyjność obiektu jest jego indywidualną właściwością. Zależy ona od geometrii i stanu fizycznego powierzchni oraz składu chemicznego. Na gruncie teorii ciała stałego można wyprowadzić zależności teoretyczne dla pewnych materiałów. Dla czystych metali w zakresie długofalowym obowiązuje zależność Hagena–Rubensa

$$\varepsilon(\lambda) = 2\sqrt{\nu \cdot r_0}, \quad (7)$$

gdzie:

r_0 - rezystywność [$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$],

ν - częstotliwość promieniowania elektromagnetycznego.

Wyrażenie to w funkcji długości fali promieniowania ma postać

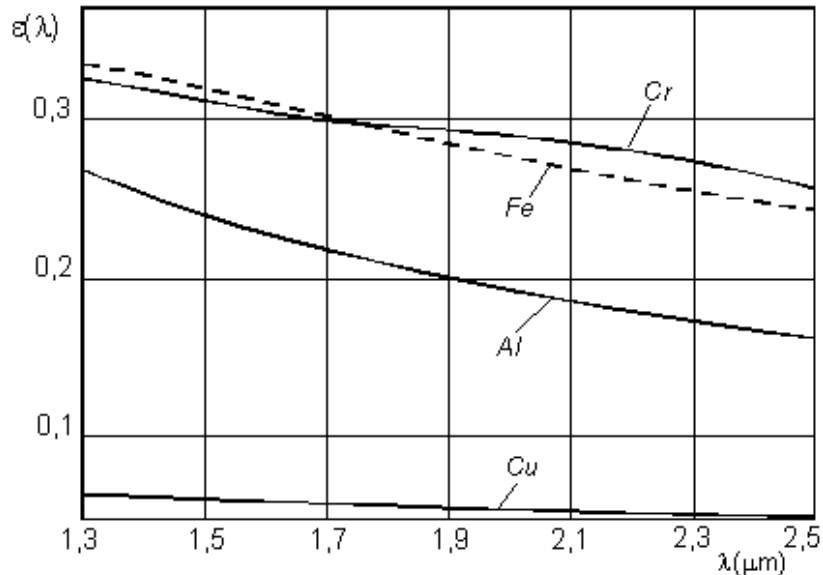
$$\varepsilon(\lambda) = 0,365\sqrt{\frac{r_0}{\lambda}}. \quad (8)$$

W zakresie fal $\lambda < 10\mu\text{m}$ zależność ta analogicznie do prawa Hagena–Rubensa ma postać ogólną

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{a_0}{\sqrt{\lambda}}. \quad (9)$$

O ile stałe w wyrażeniach (7) i (8) wynikają z teorii to stała a_0 jest wyznaczana eksperymentalnie dla wybranego zakresu spektralnego. Emisyjność spek-

tralną wybranych metali w zakresie odpowiadającym zakresowi robocznemu pirometru zamieszczono na rysunku 3.



Rys. 3. Emisyjność spektralna wybranych metali w zakresie $1,3 \mu\text{m} < \lambda < 2,5 \mu\text{m}$

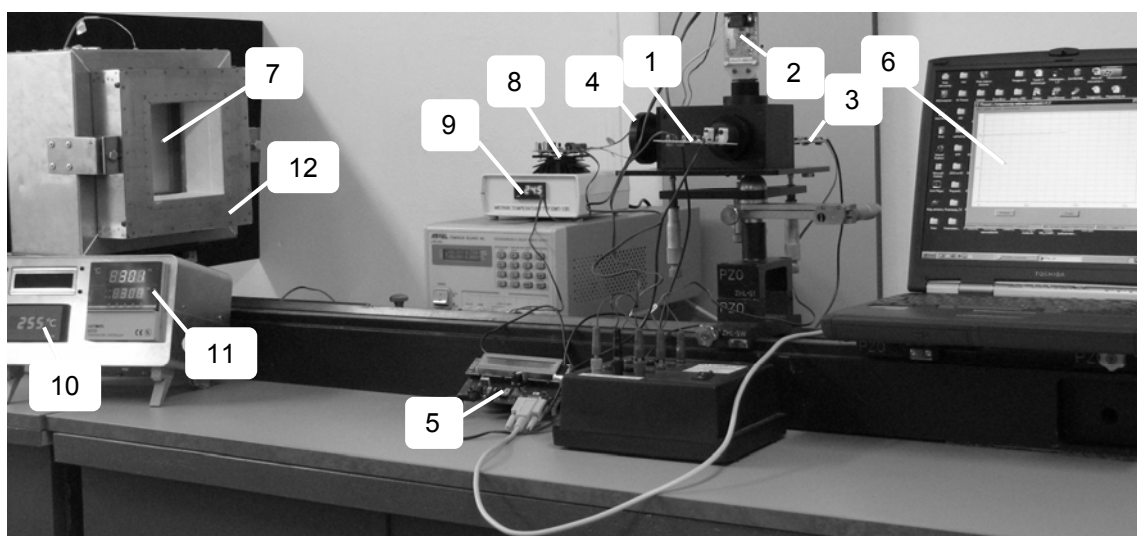
Dla wszystkich metali, za wyjątkiem chromu emisyjność spektralna może być przybliżona zależnością (9) z odpowiednio różnymi stałymi. Jest to szczególnie przypadki aproksymacji emisyjności spektralnej funkcją potęgową (2). Stałe do tego równania przyjmują wartości:

$$a = a_0, \quad b = -\frac{1}{2}, \quad (10)$$

5. STANOWISKO POMIAROWE

Opracowanie metody pomiaru temperatury z kompensacją wpływu emisyjności wynikała z zapotrzebowania na dokładne pomiary temperatury powierzchni metali. Z analizy symulacji wynika, że pirometr wnosi znaczne błędy pomiarowe, gdy mierzone są obiekty o małej wartości emisyjności i temperaturze porównywalnej z ekwiwalentną temperaturą otoczenia. Mając to na względzie zakres mierzonych temperatur ograniczono od dołu do 200°C .

Do podgrzewania próbek z możliwością szybkiej ich wymiany opracowano piec pozwalający na wykonanie badań próbek testowych o wymiarach nie przekraczających $200 \times 200 \text{ mm}^2$ oraz grubości do 30 mm. Maksymalna temperatura powierzchni grzejnej pieca wynosi 800°C . Fotografie stanowiska pomiarowego z zamocowaną próbką ze stopu aluminium (PA3) zamieszczono na rys. 4.



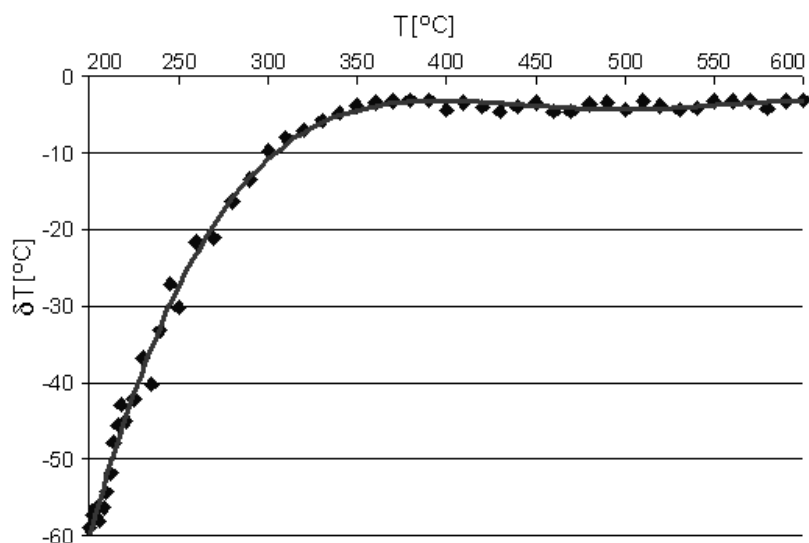
Rys. 4. Stanowisko pomiarowe

Na fotografii liczbami od 1 do 3 oznaczono przedwzmacniacze detektorów podczerwieni. Ich numery są analogiczne jak numery kanałów w tab. 1. Każdy z przedwzmacniaczy jest zintegrowany z detektorem tworząc razem zespół detekcji. Uzupełnieniem tej części pirometru jest sterownik chłodziarki termoelektrycznej TEC 8. Jest to układ analogowego sterownika PID, który stabilizuje temperaturę detektora w drugim kanale pomiarowym. Wszystkie trzy zespoły detekcji i obiektyw 4 tworzą część analogową pirometru. Sygnały wyjściowe z tej części pirometru podawane są na mikroprocesorowy układ akwizycji danych 5. W układzie tym następuje przetworzenie sygnałów analogowych na postać cyfrową. Tak uzyskane dane przesyłane są interfejsem szeregowym do komputera PC 6. Za obsługę komunikacji, przetwarzanie i magazynowanie danych odpowiada dedykowany program uruchamiany na komputerze PC. Mierzona próbka 7 umieszczona jest w piecu podgrzewającym 12. Temperatura płyty grzejnej tego pieca jest stabilizowana za pomocą cyfrowego sterownika PID 11. Na dolnym wyświetlaczu tego sterownika widoczna jest zadana temperatura płyty grzejnej. Na górnym natomiast jest widoczna bieżąca temperatura tej płyty. Rzeczywista temperatura płytki testowej mierzona jest za pomocą termo-

metru 10 z termoparą typu K. W czasie pomiarów monitorowana była również temperatura powietrza w laboratorium. Do tego celu służył termometr 9. Do zasilania zespołów detektorów użyto zespołu akumulatorów widocznych w czarnej obudowie obok systemu mikroprocesorowego. Zasilanie akumulatorowe pozwoliło zminimalizować zakłócenia wnikające w tor elektroniczny pochodzące od sieci energetycznej 230 VAC. Pozostałe elementy w tym i sterownik termochłodziarki zasilane są z zasilaczy sieciowych.

6. WYNIKI POMIARÓW

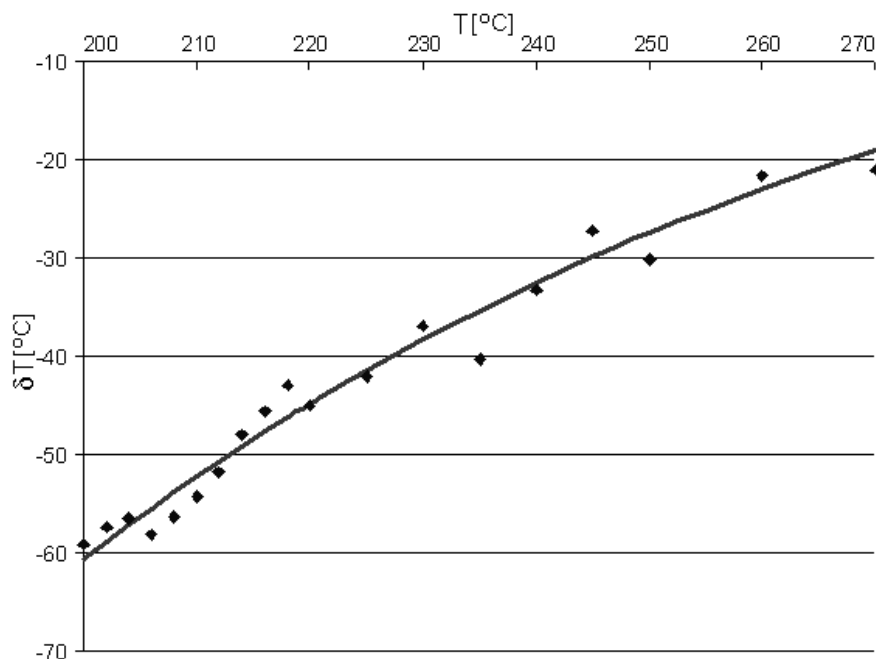
Dokonano pomiarów temperatury oraz wyznaczono błędy bezwzględne tych pomiarów. Jako obiekt testowy wybrano próbkę wykonaną ze stopu aluminium PA3. Próbka ta miała wymiary 150×150×1,5 mm. Wykres błędów dla tej płytki zamieszczono na rysunku 5.



Rys. 5. Błędy wyznaczenia temperatury dla testowej płytki z PA3

Wykres błędów pomiaru temperatury próbki można podzielić na dwa obszary. W pierwszym dla temperatury płytki do ok. 340°C występują błędy o dużych wartościach bezwzględnych. W zakresie temperatur powyżej 340°C błędy są mniejsze i mają charakter błędu systematycznego. Dla dolnych mierzonych temperatur znaczne wartości błędów wynikają z dwóch źródeł. Pierwsze jest związane z warunkami pomiaru drugie z przyrządem. Stanowisko wnosi błędy

związane z promieniowaniem tła. Promieniowanie to odbite od próbki o niskiej emisyjności a więc wysokim współczynniku odbicia odbierane jest przez układy detekcji. Ten dodatkowy sygnał jest źródłem błędnego wyliczenia temperatury. Mierzona w trakcie pomiarów temperatura otoczenia wynosiła około 24°C, co nie uzasadnia takiej dużej wartości błędu pomiarowego. Oznacza to, że ekwiwalentna temperatura otoczenia była wyższa. Jako porównanie może służyć dokonana symulacja wpływu temperatury otoczenia na błędy pomiarowe (rys. 5). Błędy pomiaru temperatury są wyższe, lecz w symulacji tej założono, że ekwiwalentna temperatura otoczenia $T_{amb} = 100^{\circ}\text{C}$ (373 K). Najgorętszym źródłem występującym w laboratorium była górna część obudowy pieca. Jej temperatura wynosiła ok. 70°C (343 K). Oznacza to, że ekwiwalentna temperatura otoczenia nie przekraczała tej temperatury. Tak, więc przyrząd w warunkach laboratoryjnych okazał się czulszy na zakłócające promieniowanie tła niż tego oczekiwano. W tym zakresie temperatur uwidoczniły się również błędy związane z poziomem szumów w torze elektronicznym. Na rysunku 6 zamieszczono wykres błędów pomiaru temperatury w zakresie do 270°C.



Rys. 6. Błędy wyznaczenia temperatury dla testowej płytki z PA3 w zakresie do 270°C

Linia ciągła jest wykresem funkcji aproksymującej w pełnym zakresie mierzonych temperatur. Dla temperatur poniżej 270°C jest duży rozrzut danych eksperymentalnych względem wartości aproksymujących. Jest to wynikiem szumów w układach detekcyjnych.

Drugi obszar mierzonych temperatur powyżej 340°C charakteryzuje się prawie stałą wartością błędu. Jest to błąd systematyczny. Podobnie jak w zakresie niskotemperaturowym są dwa źródła błędów. Pierwszym z nich jest stykowy pomiar temperatury płytki testowej. Wartość tej temperatury została przyjęta za rzeczywistą temperaturę obiektu. Jednak jest ona obciążona błędami, wynikającymi z kalibracji termopary, dokładności miernika oraz umieszczeniem czujnika pomiarowego. Czujnik w układzie pomiarowym umieszczony był za płytką. Przed pomiarami właściwymi za pomocą powierzchniowego, platynowego rezystora wzorcowego określono temperaturę powierzchni próbki. W tym układzie pomiarowym błąd pomiaru za pomocą termopary nie przekraczał 1°C. Pomiar wykonano tylko dla jednej temperatury $T = 200^{\circ}\text{C}$, nie określano natomiast przebiegu tego błędu w funkcji temperatury.

Po uwzględnieniu przyczyn występujących błędów pomiarowych otrzymane wyniki są zgodne z oczekiwaniami, czyli metoda poprawnie eliminuje wpływ emisyjności spektralnej na wynik pomiaru temperatury poprawiając dokładność pomiaru. Dla temperatur próbki powyżej 400°C temperatura mierzona stykowo i pirometrem po uwzględnieniu błędu systematycznego różni się nie więcej niż o 1%.

7. WNIOSKI

Emisyjność metali w szerokim zakresie długości fal można przybliżyć funkcją potęgową z potęgą -0,5. Zwiększenie dokładności pomiaru temperatury takich obiektów wymaga więc kompensacji wpływu emisyjności na wynik pomiaru. Przyrządem zapewniającym taką kompensację jest opracowany pirometr trzypasmowy. Dla testowej próbki w zakresie temperatur powyżej 400°C otrzymano błędy pomiarowe poniżej 1% (po uwzględnieniu błędu systematycznego). Można uznać, że dla mierzonych temperatur powyżej 400°C przyrząd ten umożliwia pomiary o zwiększonej dokładności. Dla niższych temperatur błąd pomiaru wzrasta w związku z większą czułością takiego typu pirometrów na promieniowanie tła, poziom szumów i zakłóceń elektrycznych.

LITERATURA

1. Coates P. B., Multi-wavelength pyrometry, *Metrologia*, vol. 17, no. 2, 103-109, 1981.
2. Duvaut Th., Georgeault D., Beaudoin J. L., Multiwavelength infrared pyrometry: optimization and computer simulations, *Infrared Physics & Technology*, vol. 36, 1995.

3. Katalogi firm: Calex Electronics Ltd., Impac Infrared GmbH, Ircon Inc., Mikron Infrared Inc, Omega Inc., Raytek Inc. (Fluke company),
4. Madura H., Kołodziejczyk M.: Influence of sun radiation on results of non-contact temperature measurements in far infrared range, Opto-Electronics Review 13 (3), 2005.
5. Piątkowski T., Metoda bezkontaktowego pomiaru temperatury obiektów o dużej dynamice procesów termicznych, Rozprawa Doktorska, WAT, 2003.
6. Piątkowski T., Madura H., Sposób bezkontaktowego pomiaru temperatury, Urząd Patentowy RP, Zgłoszenie patentowe P 360065, 2003.
7. Sala A., Radiant properties of materials, PWN, 1986.
8. Tank V., Infrared temperature measurement with automatic correction of the influence of emissivity, Infrared Physics, vol. 29, no. 2-4, 211-212, 1989
9. Tsai B. K., Shoemaker R. L., DeWitt D. P., Cowans B. A., Dardas Z., Delgass W. N. , Dail G. J., Dual wavelength radiation thermometry: emissivity compensation algorithms, International Journal of Thermophysics, vol. 11, No 1, Jan., 1990.

Rękopis dostarczono, dnia 10.04.2008 r.

Opiniował: prof. dr hab. inż. Władysław Dybczyński

PRECISION TEMPERATURE
MEASUREMENTS OF METALLIC SURFACE
BY THREE-BAND PYROMETER

Tadeusz PIĄTKOWSKI, Henryk MADURA,
Krzysztof CHMIELEWSKI

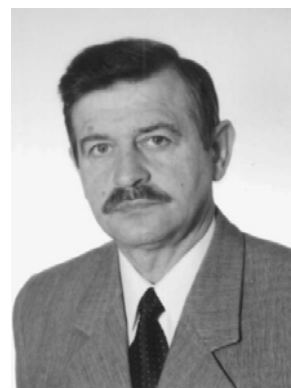
ABSTRACT

The main source of errors in pyrometric measurements is a value of emissivity of the investigated object. The metals have spectral emissivity dependent on wavelength of the emitted radiation. For these cases manufacturers suggest application of double-band pyrometers. For grey bodies, these pyrometers do not introduce an error resulting from physical phenomena but metals are not grey, their spectral emissivity is approximated by power function. Solution of the problem is possible due to increase in a number of optical measuring bands. To eliminate emissivity influence three-band pyrometer was used. Computer simulations were used to study surrounding radiation influence for measurement error. The noise in all three working channels was simulated to obtain signal to noise ratio for 1% measurement error. The temperature of testing plate from PA3 aluminum alloy in range from 200°C to 800°C was measured. During this measurements the temperature were determined by three-band pyrometer and reference contact thermometer. The pyrometer measurement errors were calculated. For plates temperatures over 400°C there were below 1%.



Dr inż. Tadeusz Piątkowski, ukończył studia na Wydziale Mechaniki Precyzyjnej (1981) i Wydziale Elektroniki Politechniki Warszawskiej (1984). Od 1995 roku pracuje w Instytucie Optoelektroniki WAT. Stopień naukowy doktora nauk technicznych uzyskał w 2003 roku. Obecnie pracuje na stanowisku adiunkta. Zajmuje się zdalnymi pomiarami temperatury, projektowaniem układów optycznych i elektronicznych oraz systemów mikroprocesorowych. Jest autorem i współautorem ponad 40 publikacji.

Dr hab. inż. Henryk Madura, prof. WAT, specjalista w dziedzinie optoelektroniki, techniki podczerwieni i termowizji. Absolwent Wydziału Elektroniki WAT (1976). Stopień doktora nauk technicznych uzyskał w roku 1983, a stopień doktora habilitowanego w 1999 roku. W latach 1991-1997 zastępca Komendanta Instytutu Optoelektroniki. Opublikował ponad 140 artykułów i referatów konferencyjnych. Autor i współautor 19 wdrożeń i 12 patentów. Od 2000 roku profesor Wojskowej Akademii Technicznej.



Dr inż. Krzysztof Chmielewski, absolwent Wydziału Chemii i Fizyki Technicznej Wojskowej Akademii Technicznej. W 1991r. podjął pracę w Instytucie Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy, a od 1992r. pracuje w Instytucie Optoelektroniki WAT. Stopień naukowy doktora nauk technicznych uzyskał w 2001 r. Obecnie pracuje na stanowisku adiunkta. Zajmuje się głównie projektowaniem układów optoelektronicznych i systemów mikroprocesorowych do urządzeń termowizyjnych. Autor i współautor 20 publikacji naukowych.