

Termografia w podczerwieni w hutniczym przemyśle szklarskim

Termografia jest metodą rejestracji temperatury w każdym punkcie powierzchni ciała. Polega na detekcji promieniowania podczerwonego i zamianie tego promieniowania na obraz widzialny. Nazwą stosowaną potocznie jest termowizja. Badania termowizyjne, prowadzone specjalnymi kamerami termowizyjnymi, polegają na pomiarze fal elektromagnetycznych emitowanych przez ciało, którego temperatura jest wyższa od 0K. W przemyśle szklarskim są użyteczne do kontroli stanu materiałów ogniotrwałych pieców szklarskich, w lokalizacji zagrożonych obszarów oraz kontroli procesów termicznych.

1. Wstęp

Zapoczątkowane przez F.W. Herschla prace nad konstrukcją teleskopów astronomicznych doprowadziły przypadkowo do odkrycia przez niego w roku 1800 promieniowania podczerwonego. Odkrycie to zapoczątkowało wiele prac naukowych i przyczyniło się do rozwoju wielu dziedzin wykorzystujących prawa promieniowania elektromagnetycznego. Jedną z tych dziedzin jest termowizja o wprost nieograniczonym zakresie zastosowań naukowych i praktycznych. Wykorzystanie kamer termowizyjnych w przemyśle hutniczym, wojskowym, w energetyce, budownictwie, medycynie i ratownictwie pozwala analizować badane obszary w sposób bezstykowy i bezinwazyjny. W diagnostyce prowadzonej w przemyśle hutniczym dostarcza wiedzy nie tylko o zjawiskach termodynamicznych i cieplnych, ale również o izolacyjności, wymianie ciepła czy sprawności układów chłodzenia tak ważnych dla bezpiecznego i ekonomicznego cyklu produkcyjnego.

2. Zasady pomiaru termograficznego

Badania termowizyjne wykonuje się kamerą termowizyjną. Kamera termowizyjna jest urządzeniem elektronicznym, przetwarzającym widmo niewidzialnego promieniowania podczerwonego z powierzchni odległych obiektów w odpowiednie sygnały elektryczne przetwarzane następnie na sygnały wizualne.

* Mgr inż., Instytut Szkła, Ceramiki, Materiałów Ogniotrwałych i Budowlanych w Warszawie, Oddział Szkła w Krakowie.

W pomiarach termowizyjnych wykorzystuje się zatem podstawowe prawa, parametry i zjawiska fizyczne, takie jak: ciepło, temperatura, emisyjność, energia, widmo promieniowania, prawo Plancka i prawo Stefana-Boltzmann. W artykule omówiono niektóre z nich.

Ciepło

W większości przypadków część pracy zostaje zamieniona na ciepło. Następnie zaczyna się proces wyrównywania temperatury w danym układzie. Ciepło przekazywane jest ośrodkom o niższej temperaturze drogami:

- przewodnictwa (wewnątrz ciała);
- konwekcji (unoszenie ciepła swobodne i wymuszone);
- promieniowania cieplnego.

Temperatura

Umowna wielkość fizyczna, skalarna, charakteryzująca stan równowagi termodynamicznej. Umowności tej dowodzi występowanie skal empirycznych: Celcjusza, Fahrenheita, a także bezwzględnej Kelwina, pomiędzy którymi występują zależności:

$$T_C = T_K - 273,16 \qquad T_C = (T_F - 32) \cdot 5/9$$

W technikach termografii brak jest jakiegokolwiek oddziaływania układu odbiorczego na powierzchnię, brakuje między nimi kontaktu cieplnego. Jednak interpretacja wyników pomiaru uwzględnić musi cechy promienne powierzchni, otoczenia, ośrodka przenoszenia promieniowania oraz cechy urządzenia odbiorczego. Jedną z cech jest emisyjność.

Emisyjność

Istotnym parametrem mającym wpływ na wynik pomiaru termograficznego jest współczynnik emisyjności, który związany jest ściśle ze stanem powierzchni badanego obiektu. Dla ciała doskonale czarnego emisyjność wynosi zawsze 1, co oznacza, że ciało takie pochłania całą energię, nie odbija jej ani też jej nie przepuszcza.

W rzeczywistości obiekty odbiegają od tego modelu, dlatego przy pomiarach należy uwzględnić tę niedoskonałość poprzez wprowadzenie współczynnika emisyjności. Jego wartość określa możliwość wysyłania promieniowania IR przez dane ciało.

3. Prawa promieniowania termografii w podczerwieni – widmo promieniowania

Materia świata w sposób nieprzerwany wysyła i pochłania promieniowanie elektromagnetyczne. Termicznemu wzbudzeniu przejść elektronów towarzyszy wy-

syłanie kwantowanej energii w postaci fotonów. Energia W takiego promieniowania zależy od długości fali promieniowania i może być opisana równaniem:

$$W_{\lambda} = \frac{hc}{\lambda},$$

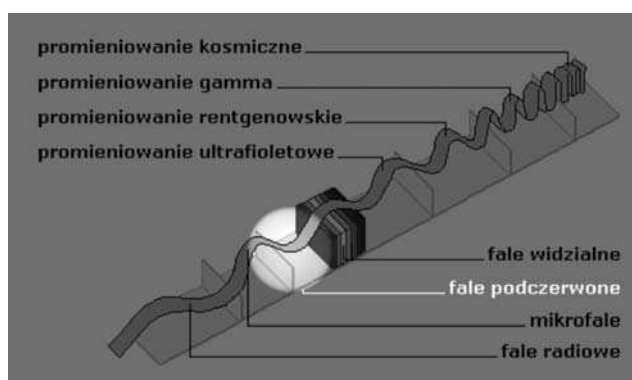
w gdzie:

$h = 6,63 \times 10^{-23}$ [Js] – stała Plancka,

$c = 3 \times 10^8$ [m/s] – prędkość światła,

$[\lambda]$ – długość fali.

Rozkład promieniowania przedstawia ryc. 1.



Ryc. 1. Fale podczerwone „IR”: $0,76 \mu\text{m} \div 1000 \mu\text{m}$.

Termografia wykorzystuje zakres: $2 \mu\text{m} \div 13 \mu\text{m}$

Prawo Plancka

Pozwala wyznaczyć widmowy rozkład monochromatycznej emitancji promienistej ciała czarnego. Dla każdej długości fali emitowana energia wzrasta wraz ze wzrostem temperatury (więc także emitowane jest promieniowanie z obszaru widzialnego). Z obniżeniem temperatury zakres widma odpowiadający maksymalnej emisji energii przesuwa się w kierunku fal dłuższych. Oko ludzkie dostosowane jest do odbioru promieniowania słonecznego, źródła bardzo wysokotemperaturowego, ok. 6000K, a maksimum energii promieniowane jest w paśmie: $0,4 \div 0,8 \mu\text{m}$.

Prawo Stefana-Boltzmann

Określa zależność pomiędzy emitancją promienistą do półprzestrzeni ciała czarnego a temperaturą bezwzględną.

$$E = \sigma T^4,$$

gdzie:

$\sigma = 5,6693 \times 10^{-8}$ [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$] – stała Boltzmann.

4. Budowa kamery termowizyjnej

Kamera termowizyjna składa się z dwóch zasadniczych elementów: układu optycznego oraz detektorów promieniowania.

- układ optyczny podczerwieni:
 - zwierciadlany (układ lusterek skracających obiektyw przy zachowaniu drogi światła równej ogniskowej);
 - refrakcyjny (układ soczewek zwierciadeł pryzmatów płytek płasko-równoległych);
 - mieszany (kompilacja wymienionych).

Detektory promieniowania IR

Detektor jest urządzeniem zamieniającym promieniowanie podczerwone na wielkość fizyczną. W kamerze termowizyjnej detektory tworzą najczęściej matrycę liniową lub prostokątną, która przetwarza promieniowanie podczerwone na mapę temperatury.

Detektory promieniowania mogą być wykonane z następujących materiałów: tellurku kadmu, antymonku indu, krzemionki, platyny, selenku ołowiu, siarczku ołowiu. Matryce chłodzone są najczęściej ciekłym azotem lub termoelektrycznie.

Uzyskanie ekstremalnych wykrywalności małych różnic energii sygnałów promiennych wiąże się ze zminimalizowaniem szumów własnych detektora. W tym celu konieczne jest znaczne obniżenie jego temperatury.

Stosowane są trzy typy układów chłodziarek:

- otwarte, napełniane ciekłym azotem;
- kriogeniczne, zamknięte;
- termoelektryczne.

Obecnie wprowadza się matryce bolometryczne, niewymagające chłodzenia, lecz stabilizacji temperatury.

5. Prowadzenie obserwacji przy użyciu kamer termowizyjnych

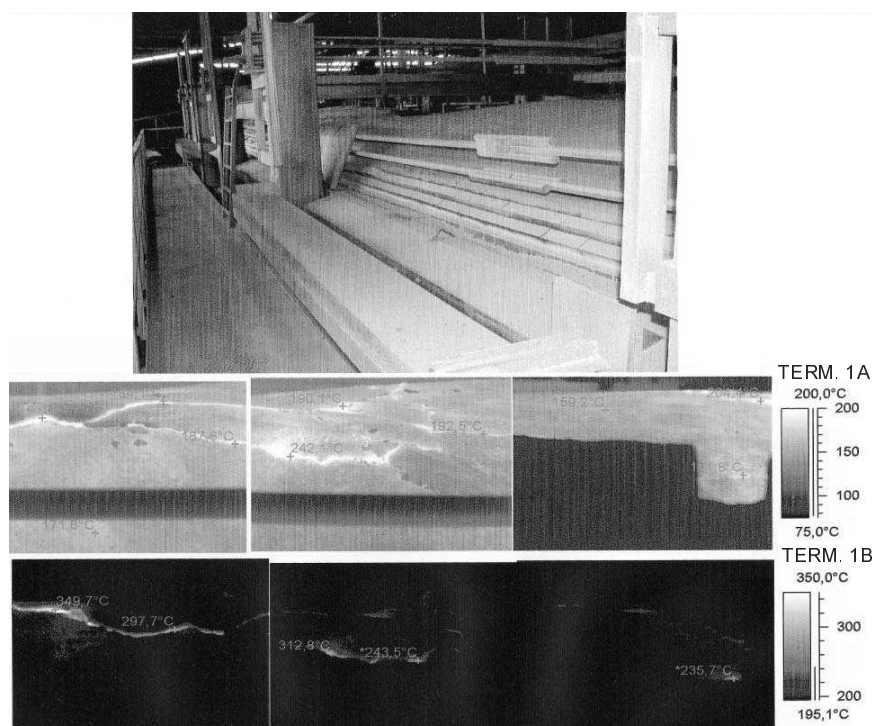
Badania termowizyjne należą do metod nieniszczących i bezkontaktowych. Przy ich wykonywaniu należy uwzględnić następujące parametry:

- orientację badanego obiektu względem stron świata;
- nasłonecznienie;
- odległość kamery od badanego obiektu;

- temperaturę otoczenia;
- cechy promienne obiektu (współczynnik emisyjności).

Monitoring termowizyjny znajduje zastosowanie w: przemysłach hutniczych (metalurgicznym, szklarskim), budownictwie, elektroenergetyce, elektronice, motoryzacji, przemyśle zbrojeniowym i medycynie.

Zastosowanie termowizji w hutniczym przemyśle szklarskim jest bardzo szerokie. Na rycinach przedstawiono różne fragmenty pieca szklarskiego z rozkładem temperatur na jego powierzchni.



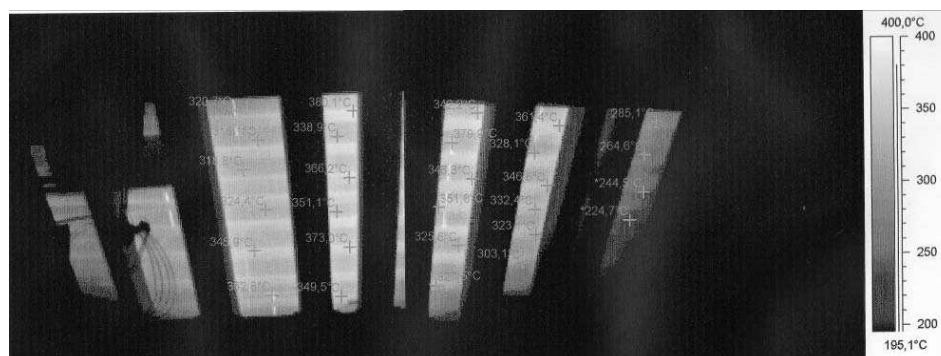
Ryc. 2. Sklepienie pieca do topienia szkła gospodarczego

Rycina 2 przedstawia w górnej części fotografię sklepienia pieca szklarskiego do topienia szkła gospodarczego wraz z odpowiadającymi mu termogramami wykonanymi w dwóch zakresach pomiarowych ($75^{\circ}\text{C} \div 200^{\circ}\text{C}$ i $195,1^{\circ}\text{C} \div 350^{\circ}\text{C}$). Badanie ma ocenić stan techniczny izolacji termicznej pod kątem lokalnych defektów i uszkodzeń materiałów ogniotrwałych sklepienia pieca. Komputerowa obróbka obrazu termograficznego pozwoliła na wyznaczenie wartości temperatur w analizowanych obszarach.



Ryc. 3. Sklepienie pieca do produkcji włókien szklanych

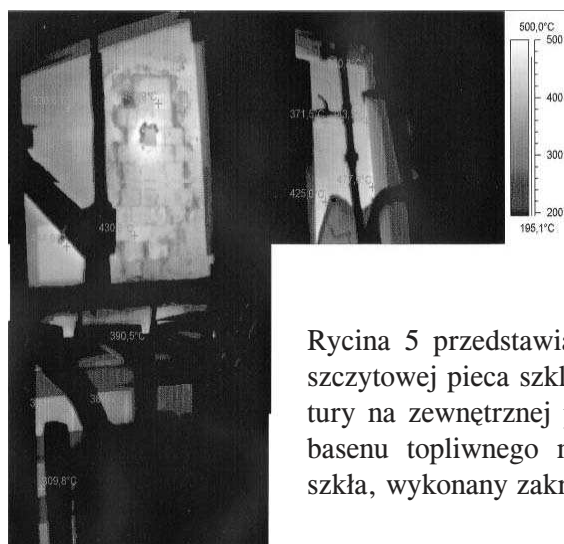
Rycina 3 przedstawia w lewej części fotografię sklepienia pieca szklarskiego do produkcji włókien szklanych, pokrytego arkuszami blachy stalowej oraz odpowiadający mu termogram wykonany w zakresie pomiarowym $120^{\circ}\text{C} \div 350^{\circ}\text{C}$. Sklepienie pieca pokryto arkuszami blachy stalowej. Wykonany obraz termograficzny pozwala na ocenę jakości połączeń arkuszy, a wyznaczone temperatury dostarczają informacji na temat stanu cieplnego sklepienia. W taki sam sposób można pomierzyć rozkład temperatury w innych interesujących nas obszarach.



Ryc. 4. Dno pieca do topienia szkła gospodarczego

Rycina 4 przedstawia obraz termograficzny dna pieca do topienia szkła gospodarczego z rozkładem temperatur na jego powierzchni zewnętrznej, wykonany w zakresie $195,1^{\circ}\text{C} \div 400^{\circ}\text{C}$.

Badanie takie służy często analizie stanu technicznego dna oraz ewentualnej ocenie zagrożenia wyciekami stopionej masy szklanej, wynikającej z korozji materiałów ogniotrwałych.



Ryc. 5. Ściana szczytowa pieca szklarskiego

Rycina 5 przedstawia obraz termograficzny ściany szczytowej pieca szklarskiego z rozkładem temperatury na zewnętrznej powierzchni ściany szczytowej basenu topliwego na poziomie i powyżej lustra szkła, wykonany w zakresie $195,1^{\circ}\text{C} \div 500^{\circ}\text{C}$.



Ryc. 6. Piec do produkcji fryty szklanej



Ryc. 7. Metoda frytowania

Rycina 6 przedstawia fotografię fragmentu pieca do topienia szkła, które później wykorzystuje się jako surowiec przeznaczony do produkcji fryty szklanej. Natomiast metodę samego frytowania, polegającą na wylewaniu stopionego szkła pomiędzy dwa walce chłodzone wodą, przedstawia ryc. 7.

Rycina 8 przedstawia obraz termograficzny strugi stopionego szkła, wykonany



Ryc. 8. Obraz termograficzny strugi stopionego szkła

z zakresie $200^{\circ}\text{C} \div 1360^{\circ}\text{C}$. Monitoring stopionej masy szklanej pomaga dobrać odpowiednie parametry i kontrolować procesy technologiczne wytopu i frytowania.

6. Podsumowanie

Termografia należy do metod badawczych nieniszczących. Dzięki niej można wykrywać wady i defekty materiałowe, dokonywać oceny procesów cieplnych statycznych i dynamicznych bez konieczności zatrzymywania produkcji, maszyn, urządzeń, co w przypadku przemysłu szklarskiego daje wymierne korzyści. Najczęściej pomiary prowadzi się, rejestrując termogramy ścian bocznych pieców szklarskich w miejscach najbardziej zagrożonych, tj. na poziomie i powyżej lustra szkła, gdzie agresywne działanie stopionej masy szklanej na materiały ogniotrwałe jest największe. Na granicy styku trzech ośrodków, tj. bloków materiałów ogniotrwałych, lustra szkła i atmosfery pieca korozja materiałów ogniotrwałych jest największa. Skutkuje to w tym obszarze ich ubytkiem, a tym samym postępującym zmniejszeniem grubości bloków ogniotrwałych. Uzyskane obrazy termograficzne dostarczają informacji, które pozwalają przedsięwziąć odpowiednie działania zapobiegawcze.

Oprócz tego badaniom poddaje się również inne fragmenty pieca, takie jak: sklepienie, ściany boczne, przepust i dno. Badanie dna pieca pozwala poznać rozkład temperatury na jego całej zewnętrznej powierzchni, zlokalizować obszary lokalnych przegrzań i dokonać czynności zapobiegających wystąpieniu awarii. Z praktyki bowiem znane są przypadki wycieku stopionej masy szklanej, które niejednokrotnie były powodem pożarów, dotkliwych poparzeń i zranień.

Doceniając zalety ze stosowania kamer termowizyjnych, wiele przedsiębiorstw zaopatruje się w ten drogi sprzęt diagnostyczny, a metody badań stają się bardziej powszechne i znajdują coraz szersze zastosowania.

Literatura

- Pomiary termowizyjne w praktyce*. Red. H. Madura, Agenda Wydawnicza Paku, Warszawa 2004.
Materiały z VI Konferencji Krajowej pt. „Termografia i termometria w podcierwieni”. Red. B. Więcek, Ustroń-Jaszowiec 2004.
Materiały szkoleniowe firmy: „Termo-Pomiar” Włodzimierz Adamczewski.

TOMASZ ZDUNIEWICZ

THE THERMOGRAPHY OF INFRA – RED RADIATRON
IN GLASS INDUSTRY

The thermography is a method the depending on registration of temperature in every point of surface by detection of infra-red radiation and exchange this radiation in to a visible picture. Common name of this method is thermovision. Thermovision investigation depends on measurement of electromagnetic waves emitted by a body at the temperature higher of 0K. Thermovision investigations were are carried out by use the special thermovision cameras. In glass industry this investigation is useful in control of the state refractory materials, of the glass furnaces, for location of the menaced areas, and for checking of thermal processes.