

Sposób i przyrząd pomiarowy do wyznaczania dyfuzyjności cieplnej materiałów stałych

Przedmiotem wynalazku jest sposób i przyrząd pomiarowy do wyznaczania dyfuzyjności cieplnej materiałów stałych zwłaszcza do prowadzenia nieniszczących pomiarów dyfuzyjności cieplnej gotowych produktów lub półproduktów.

Znane są metody pomiaru dyfuzyjności cieplnej materiałów stałych. Można je podzielić na metody stanu ustalonego i nieustalonego, wg kryterium opisującego sposób prowadzenia pomiarów, jaki i na metody niszczące i nieniszczące, wg kryterium odnoszącego się do konieczności (lub jej braku) ekstrakcji próbek laboratoryjnych z badanego materiału.

W metodach stanu ustalonego dąży się do ustanowienia w badanej próbce materiału niezmiennego w czasie jednowymiarowego pola temperatury będącego wynikiem znanego strumienia ciepła przepływającego przez badaną próbkę materiału. Dyfuzyjność materiału wyznacza się albo bezpośrednio na podstawie znajomości strumienia ciepła, wymiarów próbki oraz zmierzonych temperatur w wybranych punktach próbki, albo metodą pośrednią, w której pomiaru dyfuzyjności dokonuje się poprzez porównanie zmierzonych temperatur w wybranych miejscach próbki z wartościami uzyskanymi dla próbki wzorcowej, o znanej dyfuzyjności cieplnej.

Metody stanu nieustalonego polegają na wywołaniu wymuszenia cieplnego (o charakterze falowym, stale narastającym lub w postaci krótkotrwałego impulsu) oraz pomiarze zmian temperatury badanego ciała pod wpływem wymuszenia. Metody te zwykle wymagają złożonego opisu matematycznego zjawiska przewodzenia ciepła w badanym materiale, w tym uwzględniającego rozwiązania równań różniczkowych cząstkowych o pochodnych podług czasu jak i przestrzeni.

Znanym przykładem metody niszczącej stanu nieustalonego jest tzw. metoda Parkera (Parker W.J. *et al.* Journal of Applied Physics (1961)32, pp.1679) opisana w amerykańskiej normie E1461-01, ASTM. Wykorzystuje się w niej krótkotrwałe wymuszenie cieplne w postaci równomiernego ogrzewania próbki laboratoryjnej światłem lasera z jednej jej strony, co pozwala uzyskać w badanej próbce pole temperatury o charakterze jednowymiarowym.

Większość metod stanu ustalonego jak i nieustalonego jest metodami laboratoryjnymi, wymagającymi ekstrakcji i przygotowania próbek laboratoryjnych z badanego materiału. Są to więc metody niszczące, nienadające się na przykład do testowania gotowych produktów. Przykładowo w metodzie Parkera pomiar temperatury następuje po przeciwnej stronie próbki materiału w stosunku do miejsca działania wymuszenia cieplnego.

W większości znanych metod stanu ustalonego jak i nieustalonego dodatkową wadą jest wymóg prowadzenia eksperymentu w taki sposób aby rozkład temperatury w badanej próbce miał charakter jednowymiarowy.

Nieniszczącą odmianą metody Parkera jest przedstawiona w zgłoszeniu nr US2014301424 (A1) metoda błysku laserowego, polegająca na zastosowaniu krótkotrwałego wymuszenia cieplnego oraz pomiarze czasowego i przestrzennego rozkładu temperatur pobudzonego ciała stałego. Jej odmiany, przedstawione w opisach patentowych nr PL227017 (B1) oraz nr PL227020 (B1) mają zastosowanie do wyznaczania współczynnika przewodności cieplnej próbki materiału stałego anizotropowego o dowolnym kształcie metodą równoczesnego wielokierunkowego pobudzenia cieplnego oraz do wyznaczania współczynnika przewodności cieplnej próbki materiału stałego o nieregularnym kształcie oraz materiału warstwy pokrycia ochronnego.

Wspólną zaletą metod błysku laserowego jest fakt że pomiar zmian temperatury pobudzonego ciała badanego prowadzi się z tej samej strony powierzchni badanego materiału na której dokonuje się pobudzenia cieplnego. Pomiar ten jest nieniszczący, ponieważ nie występuje konieczność ekstrakcji

próbek laboratoryjnych z badanego materiału. Wadą powyżej opisanych metod błysku laserowego jest jednak konieczność znajomości zarówno strumienia ciepła dostarczonego do ciała podczas pobudzenia cieplnego jak i rzeczywistych wartości temperatur powierzchni badanego ciała. Obydwie te wielkości wymagają znajomości właściwości radiacyjnych badanej powierzchni, np. emisyjność powierzchni badanego materiału. Niedokładne określenie emisyjności powierzchni może mieć negatywny wpływ na wyniki pomiarów prowadzonych wg tych sposobów.

Temperatura na powierzchni półnieskończonego ciała stałego o właściwościach izotropowych, i zaizolowanej powierzchni a poddanego punktowemu wymuszeniu cieplnemu o charakterze impulsu, działającego we współrzędnych $x = 0, y = 0$, opisane jest zależnością:

$$T(x, y, z = 0, \tau) - T_0 = \frac{q \exp \left[-\frac{x^2 + y^2}{4D\tau} \right]}{4c\rho (\pi D\tau)^{3/2}} \quad (i)$$

Pochodna temperatury z równania (i) podług czasu przyjmuje postać:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T(x, y, z = 0, \tau)}{\partial \tau} &= \\ &= \frac{q(x^2 + y^2) \exp \left[-\frac{x^2 + y^2}{4D\tau} \right]}{16\pi^{3/2} c\rho D\tau^2 (D\tau)^{3/2}} \\ &\quad - \frac{3Dq \exp \left[-\frac{x^2 + y^2}{4D\tau} \right]}{8\pi^{3/2} c\rho (D\tau)^{5/2}} \end{aligned} \quad (ii)$$

Czas dla którego w miejscu o współrzędnych x, y temperatura badanego ciała osiąga maksimum odpowiada miejscu zerowemu tej pochodnej, tj.:

$$\tau_{max} = \frac{x^2 + y^2}{6D} = \frac{r^2}{6D} \quad (iii)$$

gdzie: T – temperatura badanego ciała,

q – strumień ciepła (będącego wynikiem wymuszenia cieplnego),

r – odległość pomiędzy miejscem działania wymuszenia cieplnego (początek układu współrzędnych) a miejscem o współrzędnych x, y , ($r^2 = x^2 + y^2$),

C – pojemność cieplna właściwa badanego ciała,

ρ – gęstość badanego ciała,

τ – czas,

λ – współczynnik przewodzenia ciepła badanego ciała,

D – dyfuzyjność cieplna badanego ciała, $D = \lambda/(\rho C)$,

T_0 – jednorodna temperatura początkowa badanego ciała.

W toku prowadzonych badań stwierdzono, że pomiar czasu jaki upłynął od momentu zadziałania wymuszenia cieplnego do momentu dla którego notowana jest maksymalna intensywność promieniowania cieplnego emitowanego w punkcie badanego ciała można wykorzystać do nieniszczącego pomiaru dyfuzyjności cieplnej materiałów stałych za pomocą zbudowanego przyrządu.

Sposób według wynalazku polega na tym, że miejsce badane, zlokalizowane na zewnętrznej powierzchni badanego materiału, korzystnie o średnicy mniejszej niż 1 mm, poddaje się krótkotrwałemu, korzystnie krótszemu niż 0,5 sekundy, działaniu wymuszenia cieplnego wywołanego przez generator impulsów cieplnych, korzystnie laser lub źródło światła żarowego skupionego soczewką, a następnie rejestruje się historię mierzonych zmian intensywności promieniowania cieplnego w czasie, emitowanego z punktu pomiarowego na powierzchni badanego materiału za pomocą detektora podczerwieni, korzystnie pirometru lub kamery termowizyjnej, oraz rejestruje się w systemie komputerowym, korzystnie sterowniku przemysłowym, czas po jakim mierzona intensywność promieniowania w punkcie pomiarowym osiąga maksymalną wartość względem stanu sprzed pobudzenia cieplnego, przy czym czas ten odmierza się od chwili zadziałania krótkotrwałego impulsu cieplnego

wywołanego generatorem impulsów, którą to chwilę synchronizuje się z pomiarem czasu po jakim emitowana intensywność promieniowania w punkcie pomiarowym osiąga maksymalną wartość względem stanu sprzed pobudzenia cieplnego, przy użyciu systemu komputerowego oraz mierzy się i rejestruje w systemie komputerowym odległość pomiędzy środkami miejsca badanego poddanego działaniu wymuszenia cieplnego oraz punktem pomiarowym intensywności promieniowania cieplnego, a pomiar intensywności promieniowania cieplnego wykonuje się po odizolowaniu obszaru pomiarowego od wpływu otoczenia przy pomocy ekranu.

Przyrząd według wynalazku charakteryzuje się tym, że generator impulsów cieplnych, korzystnie laser lub źródło światła żarowego skupionego soczewką, oraz detektor podczerwieni, korzystnie pirometr lub kamera termowizyjna, zamocowane są do konstrukcji nośnej za pomocą wsporników o regulowanym położeniu, korzystnie za pomocą wałków gwintowanych o małym skoku, do której zamocowany jest również ekran, korzystnie o kształcie półsfery lub powierzchni cylindrycznej, przy czym ekran zamocowany jest do konstrukcji nośnej tak aby krawędź ekranu znajdowała się w małej odległości, korzystnie mniejszej niż 5 mm, od powierzchni badanego materiału ponadto ekran posiada szczelinę, korzystnie o szerokości mniejszej niż 5 mm, umiejscowioną w linii łączącej osie optyczne generatora impulsów oraz detektora podczerwieni, a ekran wykonany jest z cienkiego materiału, o grubości mniej niż 0,5mm, o wysokiej emisyjności, większej niż 0,95, pomalowany matową farbą na czarno oraz że generator impulsów cieplnych ma regulowaną moc.

Zaletą sposobu pomiaru dyfuzyjności cieplnej według wynalazku jest wyeliminowanie potrzeby pomiaru rzeczywistych wartości temperatury badanego ciała, która to wielkość w przypadku pomiaru detektorem podczerwieni jest wielkością mierzoną pośrednio, na podstawie pomiaru intensywności promieniowania cieplnego oraz znajomości emisyjności badanej

powierzchni. W rozwiązaniu według wynalazku czas po jakim mierzona intensywność promieniowania w punkcie pomiarowym osiąga maksymalną wartość względem stanu przed pobudzenia cieplnego odpowiada czasowi po jakim temperatura ciała w miejscu pomiarowym osiąga maksimum. Dodatkowo, zaletą sposobu pomiaru dyfuzyjności cieplnej według wynalazku jest wyeliminowanie konieczności znajomości strumienia ciepła dostarczonego do ciała podczas pobudzenia cieplnego. Zaletą rozwiązania według wynalazku jest też pomiar dyfuzyjności cieplnej w sposób nieniszczący, który nadaje się także do pomiaru gotowych produktów, półproduktów lub gotowych elementów w procesie kontroli jakości ich wykonania. Sposób i przyrząd do pomiaru dyfuzyjności cieplnej według wynalazku może być stosowany do pomiaru właściwości elementów które posiadają co najmniej jedną powierzchnie płaską jako brzeg, który poddawany jest pobudzeniu cieplnemu, podczas gdy pozostałe wymiary są na tyle duże, aby stosowanie opisu matematycznego dla ciała półnieskończonego (równania i, ii, iii) było uprawnione.

Wynalazek przedstawiono w przykładzie wykonania na figurze rysunku, która przedstawia schemat przyrządu pomiarowego do wyznaczania dyfuzyjności cieplnej materiałów stałych z generatorem impulsów cieplnych i detektorem podczerwieni.

Generator impulsów cieplnych (3), laser, oraz detektor podczerwieni (5), pirometr, zamocowane są do konstrukcji nośnej (7) za pomocą wsporników (8) o regulowanym położeniu za pomocą wałków gwintowanych o małym skoku, umożliwiającym precyzyjną regulację oraz pomiar odległości pomiędzy miejscem badanym (1) oraz punktem pomiarowym (4) zmian intensywności promieniowania cieplnego. Do konstrukcji nośnej (7) zamocowany jest ekran (6) celem odizolowania wpływu promieniowania emitowanego przez powierzchnie znajdujące się w otoczeniu badanego materiału na pomiar intensywności promieniowania. Ekran (6) zamocowany jest do konstrukcji nośnej (7) tak aby

krawędź (6a) ekranu (6) znajdowała się w małej odległości od powierzchni badanego materiału (2), celem zminimalizowania promieniowania ciepłego docierającego do badanej powierzchni z otoczenia. Ekran (6) posiada szczelinę (9) umiejscowioną w linii łączącej osie optyczne generatora impulsów (3) oraz detektora podczerwieni (5). Ekran (6) wykonany z cienkiego materiału o wysokiej emisyjności, na przykład pomalowany matową farbą na czarno. Generator impulsów ciepłych (3) jest wykonany w sposób umożliwiający regulację mocy wymuszenia ciepłego przy pomocy systemu komputerowego (10).

Pomiar dyfuzyjności ciepłej ciała stałego wykonuje się poprzez poddanie krótkotrwałemu działaniu wymuszenia ciepłego miejsca badanego (1), zlokalizowanego na zewnętrznej powierzchni badanego materiału (2), wywołanego przez generator impulsów ciepłych (3), laser, a następnie rejestruje się historię mierzonych zmian intensywności promieniowania ciepłego w czasie, emitowanego z punktu pomiarowego (4) na powierzchni badanego materiału (2) za pomocą detektora podczerwieni (5), pirometru, oraz rejestruje się w systemie komputerowym (10) czas po jakim mierzona intensywność promieniowania w punkcie pomiarowym (4) osiąga maksymalną wartość względem stanu przed pobudzenia ciepłego. Czas ten odmierza się od chwili zadziałania krótkotrwałego impulsu ciepłego wywołanego generatorem impulsów (3), którą to chwilę synchronizuje się z pomiarem czasu po jakim emitowana intensywność promieniowania w punkcie pomiarowym (4) osiąga maksymalną wartość względem stanu sprzed pobudzenia ciepłego. Przy użyciu systemu komputerowego (10) mierzy się i rejestruje odległość pomiędzy środkiem miejsca badanego (1) poddanego działaniu wymuszenia ciepłego oraz punktem pomiarowym (4). Pomiar intensywności promieniowania ciepłego wykonuje się po odizolowaniu obszaru pomiarowego od wpływu otoczenia przy pomocy ekranu (6). Ekran (6) posiada szczelinę (9) umiejscowioną w linii łączącej osie optyczne generatora impulsów (3) oraz detektora podczerwieni (5) przez którą oddziałuje na miejsce badane (1) generator impulsów ciepłych (3) oraz

proszony jest pomiar intensywności promieniowania detektorem podczerwieni (5) z punktu pomiarowego (4) na powierzchni badanego materiału (2). Po zakończeniu pomiaru dyfuzyjność cieplną oblicza się w systemie komputerowym (10) według wzoru wynikającego z równania (iii):

$$D = \frac{r^2}{6\tau_{max}} \quad (iv)$$

gdzie: D – dyfuzyjność cieplna badanego ciała,

r – odległość pomiędzy miejscem badanym (1) a punktem pomiarowym (4),

τ_{max} – czas odmierzony od chwili zadziałania krótkotrwałego impulsu cieplnego wywołanego generatorem impulsów (3) po jakim emitowana intensywność promieniowania w punkcie pomiarowym (4) osiąga maksymalną wartość względem stanu sprzed pobudzenia cieplnego.

