

RZECZPOSPOLITA
POLSKA



Urząd Patentowy
Rzeczypospolitej Polskiej

(12) **OPIS PATENTOWY** (19) **PL** (11) **227017**

(13) **B1**

(21) Numer zgłoszenia: **412627**

(51) Int.Cl.
G01N 25/18 (2006.01)
G01K 17/20 (2006.01)

(22) Data zgłoszenia: **08.06.2015**

(54) **Stanowisko i sposób do pomiaru współczynnika przewodności cieplnej próbki materiału stałego o nieregularnym kształcie oraz materiału warstwy pokrycia ochronnego**

(43) Zgłoszenie ogłoszono:
19.12.2016 BUP 26/16

(45) O udzieleniu patentu ogłoszono:
31.10.2017 WUP 10/17

(73) Uprawniony z patentu:
POLITECHNIKA ŚLĄSKA, Gliwice, PL

(72) Twórca(y) wynalazku:
WOJCIECH ADAMCZYK, Mikołów, PL
RYSZARD BIAŁECKI, Gliwice, PL
PAWEŁ KOZOŁUB, Leśnica, PL
TADEUSZ KRUCZEK, Gliwice, PL

(74) Pełnomocnik:
rzecz. pat. Katarzyna Borkowy

PL 227017 B1

Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest stanowisko i sposób do pomiaru współczynnika przewodności cieplnej próbki materiału stałego o nieregularnym kształcie oraz materiału warstwy pokrycia ochronnego, zwłaszcza będącej gotowym produktem lub półproduktem.

Dotychczas znane są różne techniki pomiaru przewodności cieplnej materiałów stałych, przy czym rodzaj stosowanej metody pomiarowej wynika z warunków pomiaru tj.: rodzaju badanego materiału, wykonania badanej próbki, zakresu temperatury, wartości badanej wielkości fizycznej, czasu pomiaru, miejsca realizacji (np. laboratorium, hala produkcyjna) czy dokładności pomiaru. Znane metody pomiaru przewodności cieplnej można podzielić na dwie grupy: metody stanu ustalonego i stanu nieustalonego oraz według innego kryterium na metody niszczące i nieniszczące. W metodach stanu ustalonego dąży się do wytworzenia w badanej próbce ustalonego rozkładu temperatury, a wielkościami mierzonymi są wartości temperatury w wybranych punktach i strumień przepływającego przez badaną próbkę ciepła mierzony bezpośrednio lub pośrednio poprzez zastosowanie jednej lub dwóch próbek wzorcowych o znanych wartościach przewodności cieplnej. W metodach niszczących konieczne jest przygotowanie próbki badanego materiału wskutek czego następuje zniszczenie części badanego materiału. W metodach nieniszczących nie następuje zużycie badanego materiału na wykonanie próbki jak również badaną próbką może być wprost wytworzony produkt. Metoda jest jedyną metodą która może być stosowana w końcowej kontroli jakości gotowych produktów.

Z polskiego opisu patentowego PL135856 znana jest metoda stanu ustalonego wyznaczania współczynnika przewodności cieplnej. Metoda ta jest czasochłonna w realizacji pomiaru natomiast dzięki temu, że posługuje się prostymi modelami obliczeniowymi proces przetwarzania wyników pomiarowych w celu wyznaczenia mierzonej wielkości jest krótkotrwała.

Metody stanu nieustalonego są dość szybkie w realizacji natomiast wymagają złożonego matematycznego opisu zjawiska transportu ciepła w badanej próbce celem wyznaczenia współczynnika przewodności cieplnej. Ogólnie, metody te sprowadzają się do wymuszenia zmiany temperatury w próbce i rejestracji skutków.

Wymuszenie może mieć charakter falowy co przedstawione jest w US20060153269, bądź monotonicznie narastający w czasie znany z PL 139300 lub charakter krótkotrwałego lokalnego impulsu cieplnego. Do ostatniej grupy należy metoda Parkera nazywana też metodą typu „flash”, Parker R.J. i in. Appl. Phys. 32, 1679 (1961), rekomendowana w amerykańskiej normie E1461-01, ASTM, jest standardową metodą pomiaru dyfuzyjności, a tym samym przewodności cieplnej. Odmianą metody Parkera jest metoda „błysku laserowego-BL” przedstawiona w zgłoszeniu WO2013092775A1, polegająca na zastosowaniu krótkotrwałego impulsu laserowego do punktowego pobudzenia cieplnego badanego materiału.

Metoda Parkera jest metodą laboratoryjną, niszczącą – wymaga przygotowania próbki pomiarowej o ściśle określonych wymiarach, a zagadnienie przewodzenia ciepła w próbce traktuje się jako jednowymiarowe. Metoda „błysku laserowego-BL” jest metodą nieniszczącą, typu In-Situ, umożliwiającą wyznaczenie dwóch składowych współczynnika przewodności cieplnej materiałów anizotropowych. Może być stosowana do badania próbek posiadających przynajmniej jedną płaszczyznę jako brzeg i mających na tyle duże rozmiary, aby przy trójwymiarowym opisie przewodzenia ciepła próbka mogła być potraktowana jako nieskończenie rozległa w półprzestrzeni, której granicę stanowi wymieniona wyżej płaszczyzna brzegowa. W obu przypadkach stosuje się analityczne rozwiązanie problemu.

W przypadku pomiarów przewodności cieplnej materiału termicznych warstw ochronnych wykorzystuje się metody stanu ustalonego, które są czasochłonne w realizacji pomiaru lecz prostsze w interpretacji wyników, oraz szybsze w realizacji samego pomiaru lecz wymagające bardziej złożonych algorytmów obliczeniowych metody stanu nieustalonego. Ogólnie, metody stanu nieustalonego sprowadzają się do wymuszenia zmiany temperatury w próbce i rejestracji skutków. Specjalną grupę stanowią tu metody w których jako wymuszenie cieplne stosuje się krótkotrwały impuls cieplny. Do tej grupy należy wymieniona wcześniej metoda Parkera nazywana też metodą typu „flash”. Metoda Parkera jest metodą laboratoryjną, niszczącą, ponieważ wymaga przygotowania próbki pomiarowej o ściśle określonych wymiarach, a zagadnienie przewodzenia ciepła w próbce traktuje się jako jednowymiarowe. Znane są liczne zastosowania tej metody z jej różnymi modyfikacjami, do pomiarów przewodności cieplnej materiałów warstw ochronnych: „Wang H., i in., J. Thermal Spray Technol., (2000), vol. 9, s. 210” oraz publikacje „Chi W., i in., J. Thermal Spray Technol., (2006), vol. 15, s.773”, „Jenifer Su Y., i in., J. Materials Sci., (2001), vol. 36, s.3511” a także „Curry N., i in., J. Thermal Spray

Technol., (2013), vol. 22, s. 864". Cechą wspólną jest generalna zasada tych pomiarów według której za pomocą impulsu cieplnego próbkę podgrzewa się z jednej strony, natomiast pomiar zmian temperatury wykonuje się na drugiej stronie próbki. We wszystkich wymienionych przypadkach pomiary przeprowadzano na specjalnie przygotowanych próbkach, o ściśle określonych wymiarach i kształtach wynikających z cech konstrukcyjnych stanowiska pomiarowego.

W opisie przewodzenia ciepła stosuje się dwa zasadnicze równania:

$$q = -\lambda \nabla T \quad (1)$$

oraz

$$c\rho \frac{\delta T}{\delta t} = \lambda \nabla^2 T \quad (2)$$

gdzie:

q – jednostkowy strumień ciepła,
 λ – współczynnik przewodności cieplnej,
 T – temperatura,
 c – ciepło właściwe,
 ρ – gęstość,
 t – czas, natomiast

$$\nabla = \frac{\delta}{\delta x} + \frac{\delta}{\delta y} + \frac{\delta}{\delta z} \text{ oraz } \nabla^2 = \frac{\delta^2}{\delta x^2} + \frac{\delta^2}{\delta y^2} + \frac{\delta^2}{\delta z^2} \text{ – operatory matematyczne.}$$

Wielkość pomocnicza D , występująca przy rozwiązaniu równania (2), nazywana dyfuzyjnością cieplną jest zdefiniowana równaniem (3):

$$D = \frac{\lambda}{c\rho} \quad (3)$$

Stosownie do warunków prezentowanego sposobu pomiaru przyjmuje się, że równanie (2) jest określone w obszarze Ω badanej próbki wykonanej z izotropowego materiału o stałych własnościach cieplnych. W badanej próbce w początkowej chwili czasu $t_0 = 0$ występuje wyrównany rozkład temperatury w próbce $T(x,y,z,t_0) = T_0$, natomiast brzeg Γ próbki jest adiabatyczny z wyjątkiem części Γ_g oświetlanej laserem w czasie od $t = 0$ do $t = t_k$, a pochłonięty jednostkowy strumień ciepła \bar{q} promieniowania laserowego jest stały w czasie i nie zmienia się w przestrzeni. Wykazano, że dla tak postawionego zadania rozwiązanie równania (2) można wyrazić za pomocą funkcji Greena w postaci zależności (4): (patrz R.A. Bialecki and Z. Buliński, Green's Function in Transient Heat Conduction, Chapter in Encyclopedia of Thermal Stress, R.H. Hetnarski (edt) Springer, Dordrecht, Heidelberg, New York, London, (2014), s. 2070–2096)".

$$T(x, y, z, t) - T_0 = \frac{1}{c\rho} \int_0^t \left[\int_{\Gamma_g} \bar{q}(\xi, \eta, \zeta, \tau) \cdot G(x - \xi, y - \eta, z - \zeta, t - \tau) d\Gamma(\xi, \eta, \zeta) \right] d\tau \quad (4)$$

gdzie \mathbf{G} jest funkcją Greena spełniającą równanie:

$$\begin{aligned} & \lambda \left[\frac{\partial^2 \mathbf{G}(x - \xi, y - \eta, z - \zeta, t - \tau)}{\partial x^2} + \right. \\ & + \frac{\partial^2 \mathbf{G}(x - \xi, y - \eta, z - \zeta, t - \tau)}{\partial y^2} + \\ & \left. + \frac{\partial^2 \mathbf{G}(x - \xi, y - \eta, z - \zeta, t - \tau)}{\partial z^2} \right] + \\ & + \frac{1}{D} \delta(x - \xi, y - \eta, z - \zeta, t - \tau) = \\ & = \frac{1}{D} \frac{\partial \mathbf{G}(x - \xi, y - \eta, z - \zeta, t - \tau)}{\partial t} \end{aligned} \quad (5)$$

natomiast $\delta(x - \xi, y - \eta, z - \zeta, t - \tau)$ jest dystrybucją Diraca (chwilowym, jednakowym źródłem ciepła działającym w punkcie (ξ, η, ζ) w chwili τ).

Dla warunków pomiaru, równanie (4) będące rozwiązaniem równania (2) wyrażonym w postaci ogólnej przekształca się do postaci:

$$T(x, y, z, t) - T_0 = \frac{\bar{q}}{c\rho} \int_0^{t_k} \left[\int_{\Gamma_g} G(x - \xi, y - \eta, z - \zeta, t - \tau) d\Gamma(\xi, \eta, \zeta) \right] d\tau \quad (6)$$

Przy takim przedstawieniu rozwiązania równania przewodzenia ciepła (2) z relacji (6) i wcześniejszych wynika, że dla ciała o dowolnym kształcie oraz dowolnego punktu o współrzędnych (x, y, z) leżącego na jego powierzchni i dwóch różnych chwil czasowych iloraz nadwyżki temperatury ponad temperaturę początkową $(T(x, y, z, t) - T_0)$ nie zależy od strumienia ciepła \bar{q} pochłoniętego przez próbkę w wyniku naświetlania laserem.

Przedstawiane sposoby pomiaru współczynnika przewodności cieplnej materiału stałego i materiału warstwy wymagają uprzedniej znajomości gęstości ρ oraz ciepła właściwego c dla badanych materiałów. Wielkości te słabo zależą od temperatury i mogą być wyznaczone jednorazowo przed pomiarem współczynnika przewodności cieplnej.

Celem wynalazku jest opracowanie technologii umożliwiającej wykonywanie pomiarów współczynnika przewodności cieplnej materiałów stałych uformowanych w postaci próbek/przedmiotów o dowolnym kształcie geometrycznym jak również materiałów nałożonych jako warstwy ochronne na zewnętrzne powierzchnie tych próbek.

Stanowisko według wynalazku charakteryzujące się tym, że w zespole pomiarowym detektor podczerwieni i laser umieszczone są na wspólnym ramieniu nośnym wyposażonym w przegub i osadzonym na belce pionowej, która na trwale jest połączona z płytą podstawy, na której posadowiona jest płyta ustalająca, zespolona z płytą podstawy poprzez układ przesuwu poprzecznego i układ przesuwu wzdłużnego, przy czym na płycie ustalającej umocowane są na stałe tulejki z otworami ustalającymi podczas, gdy kołki ustalające zespolone są z płytą mocowania, przy czym detektor podczerwieni i laser sprzężone są elektrycznie z układem sterująco-rejestrującym, natomiast zespół skanowania składa się ze skanera przestrzennego, struktury nośnej oraz płyty obrotowej, do której przymocowana jest płyta ustalająca wraz z tulejkami ustalającymi, na której stawiana jest płyta mocowania z przymocowanym do niej badanym materiałem za pomocą elementów mocujących.

Sposób pomiaru według wynalazku polega na tym, że skanuje się przestrzennie badany materiał i rejestruje się otrzymane wyniki będące numerycznym zapisem kształtu i wymiarów badanego materiału, następnie materiał wraz z płytą mocowania przestawia się na płytę ustalającą zespołu pomiarowego, gdzie osie detektora podczerwieni i lasera ustawia się w kierunku normalnym lub zbliżonym do tego kierunku w odniesieniu do planowanego punktu pobudzenia cieplnego na badanej powierzchni, po czym mierzy się i rejestruje początkowy rozkład temperatury tej powierzchni za pomocą detektora podczerwieni, następnie za pomocą lasera pobudza się punktowo krótkotrwałym impulsem cieplnym badany materiał i równocześnie detektorem podczerwieni wykonuje się ciągły pomiar szybkozmiennej w czasie pola temperatury w otoczeniu punktu pobudzenia, rejestruje się za pomocą układu sterująco-rejestrującego z zadaną częstotliwością termogramy będące obrazami chwilowych rozkładów temperatury na powierzchni badanego materiału oraz rejestruje się czas pobudzenia cieplnego i czasy występowania rejestrowanych termogramów, po czym otrzymany z detektora podczerwieni wynik pomiaru rozkładu temperatury przenosi się na rzeczywistą krzywoliniową powierzchnię badanego materiału, przy czym wykorzystuje się do tego celu dane numeryczne opisujące kształt i wymiary danej powierzchni z procesu przestrzennego skanowania badanego materiału, po czym w oparciu o wyniki pomiarów temperatury na powierzchni oblicza się wartości stosunków zmierzonych nadwyżek temperatury ponad temperaturę początkową występujących w dwóch różnych chwilach czasowych dla przyjętych punktów leżących na badanej powierzchni w otoczeniu miejsca pobudzenia cieplnego, a następnie wykorzystuje się dane geometryczne ze skanowania przestrzennego badanego ciała i rozwiązuje się znanymi metodami numerycznymi równanie przewodzenia ciepła dla badanej próbki, a następnie oblicza się wartości stosunków nadwyżki temperatury na powierzchni badanego materiału ponad temperaturę początkową w tych samych punktach i dla tych samych momentów czasowych w jakich wykonano obliczenia zmierzonych wartości nadwyżek temperatury i wyznacza się wartość współczynnika przewodności cieplnej λ_s materiału stałego w rozwiązaniu numerycznym równania przewodzenia ciepła (2), która zapewnia najlepsze statystyczne dopasowanie zbioru wartości

stosunków nadwyżek temperatury obliczonych numerycznie do zbioru zmierzonych stosunków nadwyżek temperatury dla zbioru rozpatrywanych punktów leżących na powierzchni badanego materiału.

Sposób pomiaru według wynalazku polega na tym, że skanuje się badany materiał pokryty warstwą ochronną i rejestruje się otrzymane wyniki będące numerycznym zapisem kształtu i wymiarów badanego materiału, po czym porównuje się wynik z kształtem wymiarami materiału bez warstwy ochronnej i wyznacza się grubość tej warstwy, a następnie badany materiał pokryty warstwą ochronną wraz z płytą mocowania przenosi się na płytę ustalającą zespołu pomiarowego, gdzie detektor podczerwieni i laser ustawia się w kierunku normalnym lub zbliżonym do tego kierunku w odniesieniu do planowanego punktu pobudzenia cieplnego na badanej powierzchni, po czym za pomocą detektora podczerwieni mierzy się i rejestruje początkowy rozkład temperatury powierzchni warstwy ochronnej, a następnie laserem pobudza się punktowo badaną warstwę w punkcie, a za pomocą detektora podczerwieni wykonuje się ciągły pomiar rozkładu temperatury w otoczeniu punktu pobudzenia i rejestruje się termogramy dla powierzchni badanej warstwy ochronnej oraz rejestruje się czas pobudzenia cieplnego i czas występowania rejestrowanych termogramów, po czym otrzymany z detektora podczerwieni wynik pomiaru rozkładu temperatury przenosi się na badaną rzeczywistą powierzchnię, przy czym wykorzystuje się do tego celu dane numeryczne opisujące kształt i wymiary badanej powierzchni otrzymane z procesu przestrzennego skanowania ciała pokrytego warstwą ochronną, a następnie w oparciu o wyniki pomiarów temperatury na powierzchni warstwy oblicza się wartości stosunków zmierzonych nadwyżek temperatury ponad temperaturę początkową występujących w dwóch różnych chwilach czasowych dla przyjętych punktów leżących na badanej powierzchni w otoczeniu miejsca pobudzenia cieplnego, a następnie wykorzystuje się dane geometryczne ze skanowania przestrzennego badanego ciała oraz przyjmuje się jako znaną wartość współczynnika przewodności cieplnej λ_s materiału podłoża warstwy i za pomocą znanych metod numerycznych rozwiązuje się równanie przewodzenia ciepła, a następnie oblicza się wartości stosunków nadwyżki temperatury na powierzchni badanej warstwy ponad temperaturę początkową w tych samych punktach i dla tych samych momentów czasowych w jakich wyznaczono zmierzone wartości nadwyżek temperatury, przy czym wyznacza się wartość współczynnika przewodności cieplnej λ_w materiału warstwy w rozwiązaniu numerycznym równania przewodzenia ciepła (2), która zapewnia najlepsze statystyczne dopasowanie zbioru wartości stosunków nadwyżek temperatury obliczonych numerycznie do zbioru zmierzonych stosunków nadwyżek temperatury dla zbioru przyjętych punktów leżących na powierzchni badanej warstwy.

Zaletą rozwiązania według wynalazku jest pomiar przewodności cieplnej w sposób nieniszczący, metodą krótkotrwałego pobudzenia cieplnego za pomocą impulsu laserowego próbki badanego materiału stałego lub warstwy ochronnej pokrywającej ciało stałe dowolnym kształcie geometrycznym. Dzięki tym cechom, prezentowane urządzenie sposobu pomiaru mogą być stosowane do badania gotowych wyrobów lub półwyrobów stanowiąc element końcowej lub międzyoperacyjnej kontroli jakości tych produktów lub element okresowej diagnostyki stanu technicznego będących w eksploatacji części maszyn. W prezentowanych przypadkach pomiaru przewodności cieplnej do końcowych numerycznych obliczeń współczynnika przewodności cieplnej materiału stałego oraz materiału warstwy ochronnej stosuje się iloraz nadwyżek temperatury po pobudzeniu cieplnym ponad temperaturę początkową, dzięki czemu wynik pomiaru nie jest zależny od trudnej do wyznaczenia ilości ciepła pochłoniętego przez próbkę podczas cieplnego pobudzenia próbki. Ponadto wynik pomiaru ilorazu nadwyżek temperatury za pomocą detektora podczerwieni nie jest wrażliwy na błędy wyznaczenia emisyjności badanych powierzchni.

Stanowisko według wynalazku przedstawiono w przykładzie wykonania na rysunkach, na którym fig. 1 przedstawia zespół pomiarowy stanowiska, fig. 2 przedstawia zespół skanowania, a fig. 3 przedstawia zespół pomiarowy z przykładowym ciałem stałym pokrytym badaną warstwą ochronną.

Stanowisko według wynalazku charakteryzuje się tym, że składa się z dwóch oddzielnych zespołów, w szczególności z zespołu pomiarowego i zespołu skanowania. Zespół pomiarowy stanowiska zbudowany jest z detektora podczerwieni **1** korzystnie kamery termowizyjnej, generatora impulsów cieplnych korzystnie lasera **2** z głowicą optyczną emitującą wiązkę promieniowania cieplnego, połączonych wspólnym ramieniem nośnym **4** osadzonym na belce pionowej **6** pozwalającej na ustawienie detektora podczerwieni **1** i lasera **2** na pożądaną wysokość oraz układu sterującego rejestrującego **3** rejestrującego wyniki pomiarów. Na ramieniu nośnym **4** wbudowany jest przegub **5** pozwalający na zmianę kąta zorientowania detektora podczerwieni **1** i lasera **2** w stosunku do kierunku pionowego. Belka pionowa **6** jest na trwale połączona z płytą podstawy **7**, na której posadowiona jest płyta ustalająca **9a**, zespolona z płytą podstawy **7** poprzez układ przesuwu poprzecznego **12**

i układ przesuwu wzdłużnego **13**. Na płycie ustalającej **9a** umocowane są na stałe tulejki ustalające **10a** z otworami ustalającymi położenie płyty mocowania **8** natomiast kołki ustalające **11** są zespolone z płytą mocowania **8**. Ponadto urządzenie składa się z zespołu skanera obejmującego skaner przestrzenny **16**, jego strukturę nośną **15** oraz z płytą obrotową **17**. Do płyty obrotowej **17** przymocowana jest płyta ustalająca **9b** wraz z tulejkami ustalającymi **10b**, na której stawiana jest płyta mocowania **8** z przymocowanym do niej badanym materiałem **18** za pomocą elementów mocujących **14**.

Pomiar współczynnika przewodności cieplnej materiału stałego wykonuje się kładąc na płycie ustalającej **9b** zamocowanej trwale do płyty obrotowej **17** skanera przestrzennego **16** płytą mocowania **8** z umieszczonym i przymocowanym badanym materiałem **18**. Następnie za pomocą skanera przestrzennego **16** skanuje się przestrzennie badany materiał **18**, którym może być wyrób końcowy lub półwyrób w procesie produkcyjnym, a wynik skanowania zawierający dane dotyczące kształtu i wymiarów zapisuje się w postaci zbioru numerycznego. Następnie badany materiał **18** razem z płytą mocowania **8** przestawia się na płytę ustalającą **9a**, pomiarowego zespołu stanowiska. Krawędzie i powierzchnia płyty mocowania **8** stanowią pomiarową bazę odniesienia przy przenoszeniu badanego materiału **18** pomiędzy zespołem skanowania (fig. 2) i zespołem pomiarowym (fig. 1). Wykorzystując układ przesuwu poprzecznego **12** i układ przesuwu wzdłużnego **13** przesuwa się badany materiał **18** tak, aby dobrać pożądane współrzędne X-Y punktu pomiarowego **20**, czyli punktu lokalnego pobudzenia cieplnego. Wartości współrzędnych X-Y lokalizujących położenie punktu pomiarowego **20** określa się odczytując wartości przesunięć w układzie przesuwu poprzecznego **12** oraz w układzie przesuwu wzdłużnego **13** i zestawia je z położeniem elementów stanowiących pomiarową bazę odniesienia. Po wyborze punktu pomiarowego **20**, poprzez pionowe przesuwanie ramienia nośnego **4** oraz obrót w przegubie **5** ustawia się położenie detektora podczerwieni **1** tak, aby przestrzenne położenia osi środkowej jego układu optycznego i osi głowicy optycznej lasera **2**, były zbliżone do kierunku normalnego do badanej powierzchni w punkcie pomiarowym **20**. Kolejnym krokiem jest wykonanie pojedynczego pomiaru za pomocą detektora podczerwieni **1** i zarejestrowanie początkowej wartości temperatury T_0 badanego materiału **18**. Następnie za pomocą krótkotrwałego impulsu **19** wyemitowanego przez laser **2** pobudza się cieplnie badany materiał **18** w punkcie **20**, a za pomocą detektora podczerwieni **1** dokonuje się pomiaru zmiennego w czasie rozkładu temperatury na pobudzonej cieplnie powierzchni badanego materiału **18**. Wyniki pomiaru temperatury w postaci sekwencyjnych termogramów będących odwzorowaniem chwilowych rozkładów temperatury na powierzchni badanego materiału **18** w otoczeniu punktu **20** wraz z czasem ich występowania są rejestrowane za pomocą układu rejestrującego **3**. Następnie wynik pomiaru rozkładu temperatury przenosi się na rzeczywistą powierzchnię badanego materiału **18** przez odtworzenie elementarnych wycinków widzianych w obszarach kątów bryłowych odpowiadających pojedynczym pikselom matrycy detektora podczerwieni **1** wykorzystując dane numeryczne opisujące kształt i wymiary badanej powierzchni otrzymane z przestrzennego skanowania badanego ciała **18**. Dalej, w oparciu o wyniki pomiarów temperatury na powierzchni oblicza się, wyrażone zależnością (6), wartości nadwyżek temperatury ponad temperaturę początkową, a następnie oblicza się wartości ich stosunków w punktach i , co przedstawia zależność:

$$\bar{\Psi}_{i,j,k}(x_i, y_i, z_i, t_j, t_k) = \frac{\bar{T}(x_i, y_i, z_i, t_k) - T_0}{\bar{T}(x_i, y_i, z_i, t_j) - T_0} \quad (7)$$

gdzie $\bar{\Psi}_{i,j,k}(x_i, y_i, z_i, t_j, t_k)$ oznacza iloraz nadwyżek temperatury ponad temperaturę początkową T_0 zmierzonych w punkcie (x_i, y_i, z_i) w otoczeniu punktu pobudzenia **20** na badanej powierzchni materiału dla dwóch chwil czasowych t_j oraz t_k .

Następnie wykorzystując dane geometryczne badanego ciała otrzymane w wyniku skanowania przestrzennego tworzy się siatkę geometryczną i znanymi metodami numerycznymi oblicza się wartości nadwyżki temperatury zdefiniowanej przez (6), a następnie oblicza się wartości stosunku tych nadwyżek $\Psi_{i,j,k}^{mod}$ według zależności (8) w tych samych punktach (x_i, y_i, z_i) dla tych samych momentów czasowych t_j oraz t_k w jakich wykonano obliczenia wartości nadwyżek temperatury wyznaczonych z pomiaru:

$$\Psi_{i,j,k}^{mod}(x_i, y_i, z_i, t_j, t_k, \lambda_s) = \frac{T^{mod}(x_i, y_i, z_i, t_k, \lambda_s) - T_0}{T^{mod}(x_i, y_i, z_i, t_j, \lambda_s) - T_0} \quad (8)$$

przy czym w trakcie obliczeń numerycznych poszukuje się takiej wartości współczynnika przewodności cieplnej materiału stałego λ_s która zapewni najlepsze statystyczne dopasowanie zbioru wartości stosunków nadwyżek temperatury obliczonych numerycznie do zbioru zmierzonych stosunków nadwyżek temperatury dla zbioru rozpatrywanych punktów (x_i, y_i, z_i) leżących na powierzchni badanego ciała **18**. Operację dopasowania statystycznego wymienionych zbiorów ujmuje zależność (9):

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K [\Psi_{i,j,k}^{mod}(x_i, y_i, z_i, t_j, t_k, \lambda_s) - \bar{\Psi}_{i,j,k}(x_i, y_i, z_i, t_j, t_k)]^2 \rightarrow \underset{\text{ze względu na } \lambda_s}{\min} \quad (9)$$

gdzie sumowanie w zależności (9) rozciąga się po punktach pomiarowych „i” leżących na badanej powierzchni, a także po chwilach czasowych „j” oraz „k”. Tak wyznaczona wartość przewodności cieplnej λ_s jest zmierzonym współczynnikiem przewodności cieplnej materiału stałego.

Sposób pomiaru przewodności cieplnej materiału warstwy ochronnej pokrywającej ciało stałe, zwłaszcza o nieregularnym kształcie, polega na tym, że skanuje się badany materiał **18** pokryty warstwą ochronną **21** i rejestruje otrzymane wyniki będące numerycznym zapisem kształtu i wymiarów badanego materiału **18**, a następnie porównuje ten wynik z kształtem i wymiarami materiału bez warstwy ochronnej w celu wyznaczenia grubości tej warstwy. Następnie badany materiał **18** pokryty warstwą ochronną **21** wraz z płytą mocowania **8** przenosi się na płytę ustalającą **9a** zespołu pomiarowego, gdzie detektor podczerwieni **1** i laser **2** ustawia w kierunku normalnym lub zbliżonym do tego kierunku w odniesieniu do planowanego punktu pobudzenia cieplnego **23** na badanej powierzchni. Z kolei, za pomocą detektora podczerwieni **1** mierzy się i rejestruje początkową temperaturę warstwy ochronnej **21**. Następnie za pomocą krótkotrwałego impulsu laserowego **22** pobudza się cieplnie badaną warstwę **21** w punkcie **23**, a za pomocą detektora podczerwieni **1** dokonuje się pomiaru zmiennej w czasie rozkładu temperatury w otoczeniu punktu pobudzenia **23**. Wyniki pomiaru temperatury w postaci sekwencyjnych termogramów będących odwzorowaniem chwilowych rozkładów temperatury na powierzchni badanej warstwy **21** w otoczeniu punktu **23** oraz czasy ich występowania są rejestrowane za pomocą układu rejestrującego **3**. Następnie wyniki pomiaru rozkładu temperatury przenosi się na rzeczywistą powierzchnię badanej warstwy **21** przez odtworzenie na powierzchni rzeczywistej elementarnych wycinków tej powierzchni które są widziane w obszarach kątów bryłowych odpowiadających pojedynczym pikselom matrycy detektora podczerwieni **1**. Wykorzystuje się w tym celu dane numeryczne opisujące kształt i wymiary badanej warstwy otrzymane z procesu przestrzennego skanowania badanego ciała **18** pokrytego warstwą **21**. Dalej w oparciu o wyniki pomiarów temperatury na powierzchni oblicza się zdefiniowane zależnością (6) wartości nadwyżek temperatury ponad temperaturę początkową, a następnie oblicza się wartości ich stosunków co przedstawia zależność:

$$\bar{\Psi}_{i,j,k}(x_i, y_i, z_i, t_j, t_k) = \frac{\bar{T}(x_i, y_i, z_i, t_k) - T_0}{\bar{T}(x_i, y_i, z_i, t_j) - T_0} \quad (10)$$

gdzie $\bar{\Psi}_{i,j,k}(x_i, y_i, z_i, t_j, t_k)$ oznacza iloraz nadwyżek temperatury ponad temperaturę początkową T_0 zmierzonych w punkcie (x_i, y_i, z_i) w otoczeniu punktu pobudzenia **23** na badanej powierzchni materiału dla dwóch chwil czasowych t_j oraz t_k .

Następnie wykorzystując dane geometryczne badanego ciała otrzymane w wyniku skanowania przestrzennego tworzy się siatkę geometryczną i znanymi metodami numerycznymi oblicza się wartości stosunków nadwyżki temperatury $\Psi_{i,j,k}^{mod}$ na powierzchni badanej warstwy **21** ponad temperaturę początkową T_0 według zależności (11), w tych samych punktach (x_i, y_i, z_i) i dla tych samych momentów czasowych t_j oraz t_k w jakich wykonano obliczenia wartości nadwyżek temperatury określonych przez pomiar:

$$\Psi_{i,j,k}^{mod}(x_i, y_i, z_i, t_j, t_k, \lambda_s, \lambda_w) = \frac{T^{mod}(x_i, y_i, z_i, t_k, \lambda_s, \lambda_w) - T_0}{T^{mod}(x_i, y_i, z_i, t_j, \lambda_s, \lambda_w) - T_0} \quad (11)$$

przy czym w trakcie obliczeń numerycznych, przy znanym współczynniku dla materiału stałego λ_s , poszukuje się takiej wartości współczynnika przewodności cieplnej materiału warstwy λ_w która zapewni najlepsze statystyczne dopasowanie zbioru wartości stosunków nadwyżek temperatury obliczonych numerycznie do zbioru zmierzonych stosunków nadwyżek temperatury dla zbioru przyjętych punktów leżących na powierzchni badanej warstwy **21**. Operację dopasowania statystycznego wymienionych zbiorów ujmuje zależność (12):

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K [\Psi_{i,j,k}^{mod}](x_i, y_i, z_i, t_j, t_k, \lambda_s, \lambda_w) - \bar{\Psi}_{i,j,k}(x_i, y_i, z_i, t_j, t_k)]^2 \rightarrow \underset{\text{ze względu na } \lambda_w}{\min} \quad (12)$$

gdzie sumowanie w zależności (12) rozciąga się po punktach pomiarowych „i” leżących na powierzchni badanej warstwy a także po chwilach czasowych „j” oraz „k”. Tak wyznaczona wartość przewodności cieplnej λ_w jest mierzonym współczynnikiem przewodności cieplnej materiału warstwy.

Zastrzeżenia patentowe

1. Stanowisko do pomiaru współczynnika przewodności cieplnej próbki materiału stałego zwłaszcza o nieregularnym kształcie, składające się z zespołu pomiarowego zawierającego detektor podczerwieni korzystnie kamerę termowizyjną, generator impulsów cieplnych korzystnie laser i układ sterująco-rejestrujący oraz z zespołu skanowania zawierającego skaner z płytą obrotową, **znamiennie tym**, że w zespole pomiarowym detektor podczerwieni **1** i laser **2** umieszczone są na wspólnym ramieniu nośnym **4** wyposażonym w przegub **5** i osadzonym na belce pionowej **6**, która na trwale jest połączona z płytą podstawy **7**, na której posadowiona jest płyta ustalająca **9a**, zespolona z płytą podstawy **7** poprzez układ przesuwu poprzecznego **12** i układ przesuwu wzdłużnego **13**, przy czym na płycie ustalającej **9a** umocowane są na stałe tulejki z otworami ustalającymi **10a** podczas, gdy kołki ustalające **11** zespolone są z płytą mocowania **8**, przy czym detektor podczerwieni **1** i laser **2** sprzężone są elektrycznie z układem sterująco-rejestrującym **3**, natomiast zespół skanowania składa się ze skanera przestrzennego **16**, struktury nośnej **15** oraz płyty obrotowej **17**, do której przymocowana jest płyta ustalająca **9b** wraz z tulejkami ustalającymi **10b**, na której stawiana jest płyta mocowania **8** z przymocowanym do niej badanym materiałem **18** za pomocą elementów mocujących **14**.
2. Sposób pomiaru przewodności cieplnej próbki materiału stałego o nieregularnym kształcie, **znamiennie tym**, że skanuje się przestrzennie badany materiał **18** i rejestruje się otrzymane wyniki będące numerycznym zapisem kształtu i wymiarów badanego materiału, następnie materiał **18** wraz z płytą mocowania **8** przestawia się na płytę ustalającą **9a** zespołu pomiarowego, gdzie osie detektora podczerwieni **1** i lasera **2** ustawia się w kierunku normalnym lub zbliżonym do tego kierunku w odniesieniu do planowanego punktu pobudzenia cieplnego na badanej powierzchni, po czym mierzy się i rejestruje początkowy rozkład temperatury tej powierzchni za pomocą detektora podczerwieni **1**, następnie za pomocą lasera **2** pobudza się punktowo krótkotrwałym impulsem cieplnym badany materiał **18** i równocześnie detektorem podczerwieni **1** wykonuje się ciągły pomiar szybkozmiennego w czasie pola temperatury w otoczeniu punktu pobudzenia, rejestruje się za pomocą układu sterująco-rejestrującego **3** z zadaną częstotliwością termogramy będące obrazami chwilowych rozkładów temperatury na powierzchni badanego materiału **18** oraz rejestruje się czas pobudzenia cieplnego i czasy występowania rejestrowanych termogramów, po czym otrzymany z detektora podczerwieni **1** wynik pomiaru rozkładu temperatury przenosi się na rzeczywistą krzywoliniową powierzchnię badanego materiału **18**, przy czym wykorzystuje się do tego celu dane numeryczne opisujące kształt i wymiary badanej powierzchni z procesu przestrzennego skanowania badanego materiału **18**, po czym w oparciu o wyniki pomiarów temperatury na powierzchni oblicza się wartości stosunków zmierzonych nadwyżek temperatury ponad temperaturę początkową występujących w dwóch różnych chwilach czasowych dla przyjętych punktów leżących na badanej powierzchni w otoczeniu miejsca pobudzenia cieplnego **20**, a następnie wykorzystuje się dane geometryczne ze skanowania przestrzennego badanego ciała i rozwiązuje się znanymi metodami numerycznymi równanie przewodzenia ciepła dla badanej próbki, a następnie oblicza się wartości stosunków nadwyżki temperatury na powierzchni badanego materiału **18** ponad temperaturę początkową w tych samych punktach oraz dla tych samych momentów czasowych w jakich wykonano obliczenia zmierzonych wartości nadwyżek temperatury i wyznacza się wartość współczynnika przewodności cieplnej λ_s materiału stałego w rozwiązaniu numerycznym równania przewodzenia ciepła (**2**), która zapewnia najlepsze statystyczne dopasowanie zbioru wartości stosunków nadwyżek temperatury obliczonych

- numerycznie do zbioru zmierzonych stosunków nadwyżek temperatury dla zbioru rozpatrywanych punktów leżących na powierzchni badanego materiału **18**.
3. Sposób pomiaru przewodności cieplnej materiału warstwy ochronnej pokrywającej ciało stałe zwłaszcza o nieregularnym kształcie, **znamienny tym**, że skanuje się badany materiał **18** pokryty warstwą ochronną **21** i rejestruje się otrzymane wyniki będące numerycznym zapisem kształtu i wymiarów badanego materiału **18**, po czym porównuje się wynik z kształtem i wymiarami materiału bez warstwy ochronnej i wyznacza się grubość tej warstwy, a następnie badany materiał **18** pokryty warstwą ochronną **21** wraz z płytą mocowania **8** przenosi się na płytę ustalającą **9a** zespołu pomiarowego, gdzie detektor podczerwieni **1** i laser **2** ustawia się w kierunku normalnym lub zbliżonym do tego kierunku w odniesieniu do planowanego punktu pobudzenia cieplnego **23** na badanej powierzchni, po czym za pomocą detektora podczerwieni **1** mierzy się i rejestruje początkowy rozkład temperatury powierzchni warstwy ochronnej **21**, a następnie laserem **2** pobudza się punktowo badaną warstwę **21** w punkcie **23**, a za pomocą detektora podczerwieni **1** wykonuje się ciągły pomiar rozkładu temperatury w otoczeniu punktu pobudzenia **23** i rejestruje się termogramy dla powierzchni badanej warstwy ochronnej **21** oraz rejestruje się czas pobudzenia cieplnego i czas występowania rejestrowanych termogramów, po czym otrzymany z detektora podczerwieni **1** wynik pomiaru rozkładu temperatury przenosi się na badaną rzeczywistą powierzchnię, przy czym wykorzystuje się do tego celu dane numeryczne opisujące kształt i wymiary badanej powierzchni otrzymane z procesu przestrzennego skanowania ciała **18** pokrytego warstwą ochronną **21**, a następnie w oparciu o wyniki pomiarów temperatury na powierzchni warstwy oblicza się wartości stosunków zmierzonych nadwyżek temperatury ponad temperaturę początkową występujących w dwóch różnych chwilach czasowych dla przyjętych punktów leżących na badanej powierzchni w otoczeniu miejsca pobudzenia cieplnego **23**, a następnie wykorzystuje się dane geometryczne ze skanowania przestrzennego badanego ciała oraz przyjmuje się jako znaną wartość współczynnika przewodności cieplnej λ_s materiału podłoża warstwy i za pomocą znanych metod numerycznych rozwiązuje się równanie przewodzenia ciepła, a następnie oblicza się wartości stosunków nadwyżki temperatury na powierzchni badanej warstwy **21** ponad temperaturę początkową w tych samych punktach i dla tych samych momentów czasowych w jakich wyznaczono zmierzone wartości nadwyżek temperatury, przy czym wyznacza się wartość współczynnika przewodności cieplnej λ_w materiału warstwy w rozwiązaniu numerycznym równania przewodzenia ciepła (**2**), która zapewnia najlepsze statystyczne dopasowanie zbioru wartości stosunków nadwyżek temperatury obliczonych numerycznie do zbioru zmierzonych stosunków nadwyżek temperatury dla zbioru przyjętych punktów leżących na powierzchni badanej warstwy **21**.

Rysunki

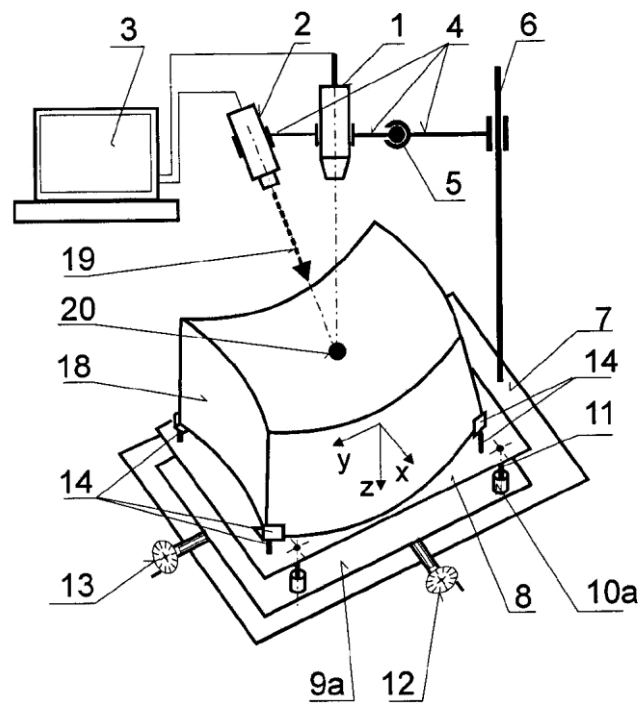


Fig. 1

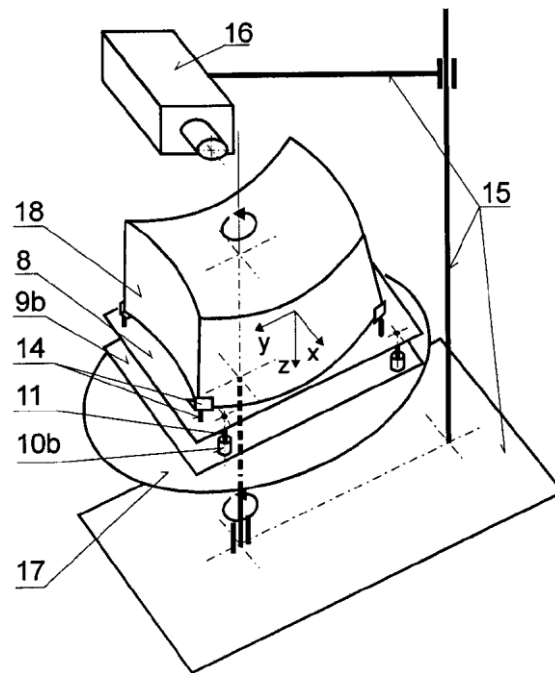


Fig. 2

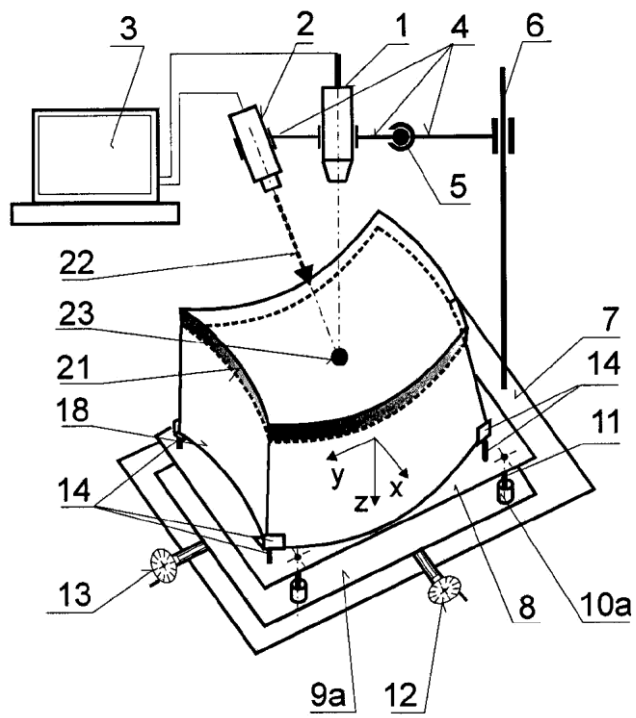


Fig.3

