

dr Artur Miros*

Badanie współczynnika przewodzenia ciepła materiałów do izolacji cieplnej

Jedną z najbardziej charakterystycznych właściwości określającą materiał do izolacji cieplnej jest współczynnik przewodzenia ciepła λ . Aparaty wykorzystywane do pomiarów λ mogą różnić się zakresem pomiarowym, stopniem zaawansowania konstrukcji oraz dokładnością pomiaru, w tym oceną wpływu błędów poszczególnych składników na końcowy wynik badania.

Aparatura

Do pomiarów współczynnika przewodzenia ciepła w stanie ustalonym wykorzystuje się aparaty z czujnikami gęstości strumienia cieplnego kalibrowane materiałami odniesienia (pośrednia metoda pomiarowa) [3], albo z osłoniętą płytą grzejącą (bezpośrednia metoda pomiarowa) [4]. Poza zakresem $-10 \div 50 \text{ }^\circ\text{C}$, dedykowanym urządzeniem do pomiarów współczynnika λ jest aparat z osłoniętą płytą grzejącą [3], przede wszystkim dlatego, że brakuje certyfikowanych materiałów odniesienia służących do kalibracji aparatów z czujnikami gęstości strumienia cieplnego poza wymieniony zakres temperaturowy [4].

Zasadę działania przykładowego aparatu GHP 456 Titan do pomiarów współczynnika przewodzenia ciepła przedstawiono na rysunku 1. Zastosowano w nim dwupłytkowy system pomia-

ru przewodności cieplnej z osłoniętą (aktywnie izolowaną) płytą grzejącą w zakresie $-160 \div 700 \text{ }^\circ\text{C}$. Istotą pomiaru jest wytworzenie jednokierunkowego strumienia ciepła o stałej gęstości w warunkach stanu ustalonego, który mógłby istnieć w nieskończonej płycie ograniczonej dwiema płaskimi, równoległymi, izotermicznymi powierzchniami [5]. W trakcie pomiaru strumień ciepła w próbkach – dwie próbki danego materiału o podobnej gęstości i grubości – wywołany jest przez różnicę temperatury (ΔT) pomiędzy zespołem grzejącym złożonym z wewnętrznej, kwadratowej płyty grzejącej otoczonej strefą osłonową o niezależnej kontroli termicznej a zespołem chłodzącym. Niezależnie ogrzewana strefa osłonowa ma wyeliminować wszelkie boczne przepływy ciepła do lub z płyty grzejącej. Boki próbek są ogrzewane za pomocą paneli ochronnych, których temperatura jest odpowiednikiem średniej temperatury badania. Z uwagi, że jest to metoda bezpośrednia, wyznaczenie współczynnika przewodzenia ciepła opiera się na określeniu: temperatury na powierzchniach próbek, strumienia ciepła (czyli mocy dostarczanej do układu) i grubości badanych próbek zgodnie ze wzorem :

$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{EI}{S} \cdot \frac{1}{\left(\frac{\Delta T}{d}\right)_1 + \left(\frac{\Delta T}{d}\right)_2}$$

gdzie:

EI – pobór mocy grzania;
 S – powierzchnia zespołu grzejącego;
 ΔT – gradient temperatury w próbce;
 d – grubość próbki;
 indeksy $1, 2$ – próbka górna i dolna.

Podczas badania możliwe jest użycie różnych gazów stanowiących atmosferę próbki. W szczególności do badań materiałów do izolacji cieplnej wyposażenia budynków i instalacji przemysłowych wykorzystywany jest azot lub powietrze. Czas pojedynczego badania (jeden pomiar współczynnika przewodzenia ciepła w jednej temperaturze) zależy od gęstości i grubo-

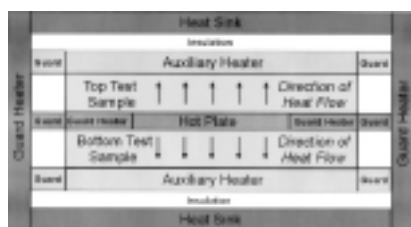
ści próbki oraz temperatury badania, i może wynosić co najmniej 6 godzin.

Ocena błędów

Ocena dokładności pomiaru metodą osłoniętej płyty grzejącej w aparacie GHP 456 Titan obejmuje wiele działań sprawdzających. Generalnie można je podzielić na część związaną bezpośrednio z aparaturą oraz związaną z próbką i przygotowaniem jej do badań. W artykule przedstawimy najistotniejsze zagadnienia związane z oceną błędów aparatu badawczego.

Sprawdzenie oraz ocena właściwości użytkowych aparatury polega na oszacowaniu cząstkowych wkładów do błędów całkowitego. Zakłada się, że są one addytywne jako błędy systematyczne [3], wobec tego niepewność pomiaru wyznacza się jako pierwiastek sumy kwadratów poszczególnych niepewności. Zagadnieniami rozpatrywanymi podczas analizy błędów aparatu badawczego powinny być: **płaskość i emisyjność powierzchni badawczych, boczne straty ciepła, nierównowagowa różnica temperatury przez szczelinę pomiędzy płytą grzejącą a strefą osłonową, pomiar mocy elektrycznej, pomiar wartości temperatury i różnicy temperatury pomiędzy powierzchniami badawczymi, określanie pola pomiarowego, badanie liniowości** [3, 6, 7]. Istotnym elementem wpływającym na rozpatrywane błędy jest zakres temperaturowy, w którym wykonuje się badania próbek [7].

Powierzchnie badawcze na całej powierzchni powinny stykać się z powierzchnią próbki. Każda, nawet minimalna szczelina pomiędzy próbką a powierzchnią badawczą powoduje powstanie błędu pomiarowego polegającego na zniekształceniu ostatecznego wyniku, ze względu na nierównomierne rozłożenie oporów kontaktu pomiędzy płytą aparatu a próbką. Powierzchnie badawcze powinny być więc maksy-



Rys. 1. Zasada działania aparatu GHP 456 Titan do pomiaru współczynnika przewodzenia ciepła metodą osłoniętej płyty grzejącej (rysunek z „Operating Instructions GHP 456 Titan”)

* Centralny Ośrodek Badawczo-Rozwojowy w Katowicach; obecnie Instytut Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego w Warszawie, oddział w Katowicach

malnie płaskie (**płaskość powierzchni badawczych**). Za nierównomierne rozłożenie oporów kontaktu pomiędzy płytą aparatu a próbką odpowiedzialna jest również struktura materiału izolacyjnego. W szczególności dotyczy to materiałów porowatych, włóknistych (np. aerożel, wełna skalna) o małej gęstości. W miejscach, w których nie występuje bezpośredni kontakt materiału próbki z powierzchnią płyty aparatu, wymiana ciepła pomiędzy płytą a próbką odbywa się w drodze promieniowania. Im powierzchnia aparatu ma większą zdolność emisyjną promieniowania, tym więcej ciepła zostanie przekazane do próbki, co z kolei wiąże się z mniejszym błędem związanym z wymianą ciepła pomiędzy płytą a próbką (**emisyjność powierzchni badawczych**).

Wyznaczanie emisyjności powierzchni badawczych aparatu polega na określeniu gęstości strumienia ciepłego przepływającego przez warstwę powietrza (w stanie ustalonym, przy braku konwekcji) przy różnej różnicy temperatury (ΔT) [8]. Emisyjność (ε) powierzchni badawczych można wyznaczyć, wykorzystując wzór na całkowitą gęstość strumienia ciepłego q_t :

$$q_t = q_r + \frac{\lambda}{d} \Delta T$$

$$q_r = \frac{4\sigma_n T_m^3 \Delta T}{2\varepsilon - 1}$$

gdzie:

q_t – gęstość strumienia ciepłego [W/m²];
 λ – przewodność cieplna powietrza [W/mK];
 d – grubość warstwy powietrza [m];
 T_m – średnia temperatur dwóch powierzchni aparatu [K];
 ΔT – różnica temperatury pomiędzy dwiema powierzchniami aparatu [K];
 σ_n – stała Stefana-Boltzmana ($5,67 \times 10^{-8}$ [W/(m²K⁴)]);
 ε – emisyjność dwóch powierzchni aparatu.

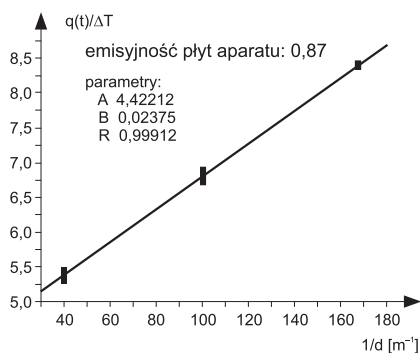
Mierząc $q_t/\Delta T$ dla różnej grubości warstwy powietrza, z zależności liniowej $q_t/\Delta T$ od $1/d$ można wyznaczyć λ oraz $q_r/\Delta T$. W tabeli 1 przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów określania emisyjności płyt aparatu. Doświadczalną oznaką braku konwekcji jest liniowość wykresu gęstości strumienia ciepłego (podzielonego przez ΔT) w warstwie powietrza (rysunek 2). Zakłada się, że emisyjność powyżej wartości 0,8 powoduje znikomy wpływ na końcowy wynik pomiarowy [7]. Oczywiście wraz ze wzrostem temperatury pomiaru składowa promieniowania staje się coraz bardziej znacząca

Tabela 1. Dane pomiarowe wyznaczania emisyjności powierzchni aparatu

d	1/d	ΔT	T średnie	$q(t)/\Delta T$
0,00598	167,22408	10	10	8,36656
0,00598	167,22408	20	10	8,39666
0,02481	40,30633	10	10	5,46332
0,02481	40,30633	20	10	5,41332
0,00997	100,3009	10	10	6,89719
0,00997	100,3009	20	10	6,82719
0,00598	167,22408	10	20	8,41666
0,00598	167,22408	20	20	8,39000
0,02481	40,30633	10	20	5,45332
0,02481	40,30633	20	20	5,36000
0,00997	100,3009	10	20	6,79719
0,00997	100,3009	20	20	6,76500
0,00598	167,22408	10	30	8,39666
0,00598	167,22408	20	30	8,39650
0,02481	40,30633	10	30	5,29100
0,02481	40,30633	20	30	5,29710
0,00997	100,3009	10	30	6,72000
0,00997	100,3009	20	30	6,81500

w ogólnym procesie transportu ciepła przez próbkę. Niższa emisyjność płyt w badaniach wysokotemperaturowych może skutkować zwiększeniem błędu pomiarowego, tym większym, im większa jest średnia temperatura pomiaru.

W przypadku próbek o dużym oporze cieplnym oraz dużej grubości największe **boczne straty ciepła** podczas pomiaru współczynnika przewodzenia ciepła występują dla małych różnic temperatury (ΔT). Dla pomiarów w 10 °C (pomiarów wyrobów dla budownictwa ogólnego) i różnicy temperatury $\Delta T = 20$ °C wystarczy zmierzenie temperatury na środku jednego z boków próbki w celu określenia skali bocznych strat ciepła. W przypadku badań w szerokim zakresie temperaturowym pomiary takie należy wykonać w różnej temperaturze i różnym ΔT z uwagi na to, że w zależności od temperatury badania



Rys. 2. Gęstości strumienia ciepłego (podzielonego przez ΔT) w warstwie powietrza

może być różna ucieczka ciepła przez boki próbki, a tym samym może zostać zaburzony jednokierunkowy przepływ ciepła. Przykładowe wyniki pomiarów zostały przedstawione w tabeli 2, gdzie porównano średnią temperaturę pomiaru (T_{mean}) z temperaturą środka boku próbki (T_{edge}) w zależności od różnych ΔT . Określenie bocznych strat ciepła polegające na przyjęciu kryterium:

$$(T_{edge} - T_{mean}) / \Delta T < 0,2$$

pozwala na określenie niepewności pomiarowej na poziomie 0,25% [2, 7].

Konstrukcja zespołu grzejnego polegająca na niezależnym sterowaniu temperaturą płyty grzejnej i strefy osłonowej powoduje, że podczas pomiaru może wystąpić niezrównoważenie temperatury pomiędzy tymi sekcjami (**błędy niezrównoważenia**), co powoduje przepływ ciepła, częściowo przez próbkę, a częściowo przez szczelinę, która oddziela sekcje. Im węższa szczelina, tym większy błąd niezrównoważenia.

Tabela 2. Boczne straty ciepła dla różnych temperatur pomiarowych

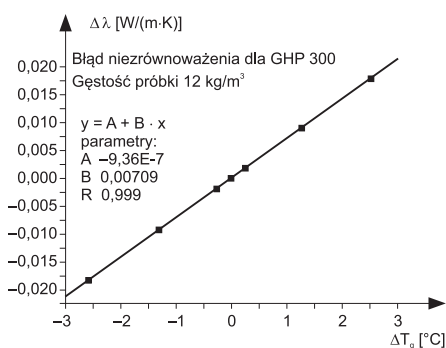
Średnia temperatura pomiaru	$\Delta T = 10$ °C	$\Delta T = 20$ °C	$\Delta T = 40$ °C
$T_{mean} = 10$ °C	$T_{edge} = 10,7$ °C	$T_{edge} = 10,5$ °C	$T_{edge} = 10,2$ °C
$T_{mean} = 100$ °C	$T_{edge} = 101,1$ °C	$T_{edge} = 300,9$ °C	$T_{edge} = 300,9$ °C
$T_{mean} = 300$ °C	$T_{edge} = 300,8$ °C	$T_{edge} = 300,8$ °C	$T_{edge} = 300,7$ °C

Z drugiej strony, przy konstrukcji aparatu bierze się pod uwagę, że zwiększanie szerokości szczeliny zwiększa niepewność określenia powierzchni pomiarowej [9]. Ocena błędu spowodowana niezrównoważeniem temperatury przez szczelinę polega na określeniu zależności zmiany współczynnika przewodzenia ciepła ($\Delta\lambda$) względem różnicy napięcia [μV] pomiędzy zespołem grzejnym a strefą osłonową, bądź też różnicy temperatury na grubości szczeliny ΔT_g (tabela 3). Wpływ niezrównoważenia temperatury pomiędzy strefą osłonową a płytą grzejną na wartość współczynnika przewodzenia ciepła doskonale widać na rysunkach 3 i 4. Zmiana ΔT_g lub różnicy napięcia [μV] na szczelinie powoduje zmianę uzyskiwanej wartości współczynnika przewodzenia ciepła, czyli faktyczny błędny wynik pomiaru.

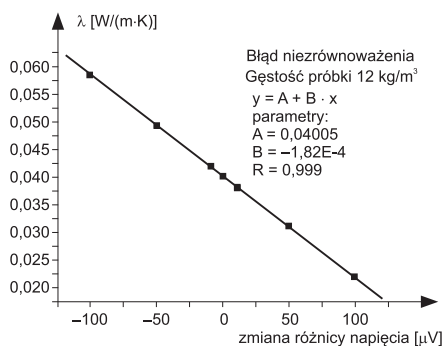
W przypadku pomiarów w wysokiej temperaturze zwiększa się wpływ promieniowania, zwiększając strumień

Tabela 3. Wyniki sprawdzenia błędów nieźrównoważenia

Nieźrównoważenie napięcia [μV]	λ [W/mK]	ΔT_g [$^{\circ}\text{C}$]	$\Delta \lambda$
-101	0,0584	-2,58974	-0,01835
-0,3	0,04004	-0,00769	1E-5
98,8	0,02211	2,53333	0,01794
49,7	0,03102	1,27436	0,00903
-51	0,04935	-1,30769	-0,0093
9,9	0,03823	0,25385	0,00182
-10,4	0,04199	-0,26667	-0,00194



Rys. 3. Zależność zmiany współczynnika przewodzenia ciepła od różnicy temperatury pomiędzy strefą osłonową a płytą grzejną



Rys. 4. Zależność wartości współczynnika przewodzenia ciepła od zmiany różnicy napięcia [μV] pomiędzy strefą osłonową a płytą grzejną

ciepły przez szczelinę. Efekt ten można minimalizować za pomocą materiału wypełniającego o niskiej przewodności cieplnej [7].

Zagadnienia związane z błędami pomiaru temperatury oraz pomiaru różnicy temperatury zasadniczo sprowadzają się do sprawdzenia odczytów sensorów, kontroli połączeń i ich montażu w aparacie. Czynnikiem mającym istotny wpływ na jakość odczytów temperatury jest wpływ długiego oddziaływania wysokiej temperatury na poszczególne sensory, których dokładność odczytów może ulec

zmniejszeniu. Opcją zmniejszającą wpływ temperatury na degradację sensorów jest stosowanie osłon. Jednak z uwagi na zwiększenie pola przekroju sensora następuje zwiększenie wymiany ciepła (w szczególności istotne w związku z sensorami znajdującymi się w okolicy szczeliny pomiędzy płytą grzejną a strefą osłonową).

Pole pomiarowe powinno być określone jako pole otoczone przez linię określającą środek szczeliny. Nie w każdych warunkach pomiarowych jest ono równe rzeczywistemu polu pomiarowemu próbki, przez który przepływa strumień ciepły dostarczany przez płytę grzejną aparatu. W zależności od temperatury badania, rodzaju próbki i jej grubości, obszar pola pomiarowego może się zmieniać od obszaru określonego przez linię prowadzącą przez środek szczeliny do obszaru pola powierzchni płyty grzejnej (określenie pola pomiarowego).

Jednym z ważniejszych kryteriów oceny systematycznych błędów aparatu jest określenie jego liniowości. Polega ono na uchwyceniu ewentualnych zmian współczynnika przewodzenia ciepła w określonej średniej temperaturze badania, ale przy różnej różnicy temperatury (ΔT). Generalnie wyniki pomiarów współczynnika przewodzenia ciepła nie powinny się od siebie różnić. W tabeli 4 przedstawiono przykładowe wartości pomiarowe współczynnika przewodzenia ciepła dla różnych ΔT .

Tabela 4. Wyniki sprawdzenia liniowości aparatu

	Średnia temperatura 10 $^{\circ}\text{C}$	Średnia temperatura 300 $^{\circ}\text{C}$	Średnia temperatura 700 $^{\circ}\text{C}$
λ [$\text{W/m}^{\circ}\text{K}$] dla $\Delta T = 10^{\circ}\text{C}$	0,03174	0,07274	0,19387
λ [$\text{W/m}^{\circ}\text{K}$] dla $\Delta T = 20^{\circ}\text{C}$	0,03142	0,07237	0,19152
λ [$\text{W/m}^{\circ}\text{K}$] dla $\Delta T = 40^{\circ}\text{C}$	0,03120	0,07209	0,19447
λ średnia [$\text{W/m}^{\circ}\text{K}$]	0,03145	0,07224	0,19329
Odczylenie standardowe λ	2,727E-4	3,26E-4	1,56E-3
Współczynnik zmienności [%]	0,86709	0,4503	0,8071

Podsumowanie

Stopień trudności związany z oceną niepewności pomiarowej współczynnika przewodzenia ciepła rośnie wraz ze wzrostem temperatury badania. Zmiana wpływu poszczególnych składowych transportu ciepła wraz ze wzrostem temperatury powoduje, że szacowane błędy dla standardowej temperatury określania współczynnika przewodzenia ciepła (10°C) w wyższej temperaturze mogą ulec, czy wręcz ulegają zmianie. Dlatego też pomiar współczynnika λ w temperaturze poza zakresem standardowym pomiarów wyrobów dla budownictwa wymaga od operatora dużej wiedzy w określaniu/szacowaniu wpływu poszczególnych właściwości użytkowych aparatu na końcowy wynik pomiarowy.

Literatura

- [1] PN-ISO 8301:1999 „Określanie oporu cieplnego i właściwości z nim związanych w stanie ustalonym. Aparat płytowy z czujnikami gęstości strumienia ciepłego”.
- [2] PN-ISO 8302:1999 „Określanie oporu cieplnego i właściwości z nim związanych w stanie ustalonym. Aparat płytowy z osłoniętą płytą grzejną”.
- [3] Miros A., Wyroby płaskie do izolacji cieplnej wyposażenia budynków i instalacji przemysłowych, IZOLACJE, nr 9/2012, s. 42-45.
- [4] Furmański P., Wiśniewski T. S., Banaszek J., Izolacje cieplne. Mechanizmy wymiany ciepła, właściwości cieplne i ich pomiary. ITC, Warszawa 2006.
- [5] Salomon D., Thermal conductivity of insulations using guarded hot plates, including recent developments and sources of reference materials. Measurement Science and Technology, Vol. 12 (2001), pp. 89 – 98.
- [6] PN-EN 1946-2:2000 „Właściwości cieplne wyrobów i komponentów budowlanych – Szczegółowe kryteria oceny laboratoriów wykonujących pomiary właściwości związanych z transportem ciepła – Pomiary metodą osłoniętej płyty grzejnej”.
- [7] prCEN/TS 15548-1:2008 „Thermal insulation products for building equipment and industrial installations – Determination of thermal resistance by means of the guarded hot plate method – Part 1: Measurements at elevated temperatures from 100°C to 850°C ”.
- [8] Arduini M. C., De Ponte F., Analysis of Emission Measurements with Heat Flow Meter and Guarded hot Plate Apparatus. XVIII ICHMT Symposium on Heat and Mass Transfer in Cryoengineering and Refrigeration, Dubrovnik, 1986, Hemisphere Pub., Washington.
- [9] De Ponte F., Di Filippo P., Design Criteria for Guarded Hot Plate Apparatus, Heat Transmission Measurements in Thermal Insulations, ASTM STP 544, ASTTA, Am. Soc. Testing Mats., 1974, p. 97.