

POMIAR WSPÓŁCZYNNIKA PRZEWODZENIA CIEPŁA W MATERIAŁACH IZOLACYJNYCH.

1. OZNACZENIA

a – dyfuzyjność cieplna
 A – pole powierzchni
 c – ciepło właściwe
 I – natężenie prądu elektrycznego
 P – moc elektryczna grzejnika
 U – spadek napięcia
 T, t – temperatura
 T_h – temperatura grzejnika
 T_c – temperatura chłodnicy
 δ – grubość próbki
 λ – przewodność cieplna
 ρ – gęstość
 \dot{q} – gęstość strumienia ciepła

2. WPROWADZENIE TEORETYCZNE

Projektowanie i eksploatacja wszelkiego typu urządzeń cieplnych wymaga znajomości własności mechanicznych i cieplnych materiałów stosowanych do ich konstrukcji. W praktyce inżynierskiej najczęściej wykorzystuje się przewodność cieplną λ (współczynnik przewodzenia ciepła). Przewodność cieplna λ jest wielkością fizyczną wprowadzona po raz pierwszy przez Fouriera w prawie nazwanym jego nazwiskiem, które jak dotąd jest fundamentalną zależnością w dziedzinie wymiany ciepła. Dla przypadku jednowymiarowego ma ono postać:

$$\dot{q} = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

przy czym \dot{q} jest gęstością strumienia ciepła, a dT/dx gradientem temperatury.

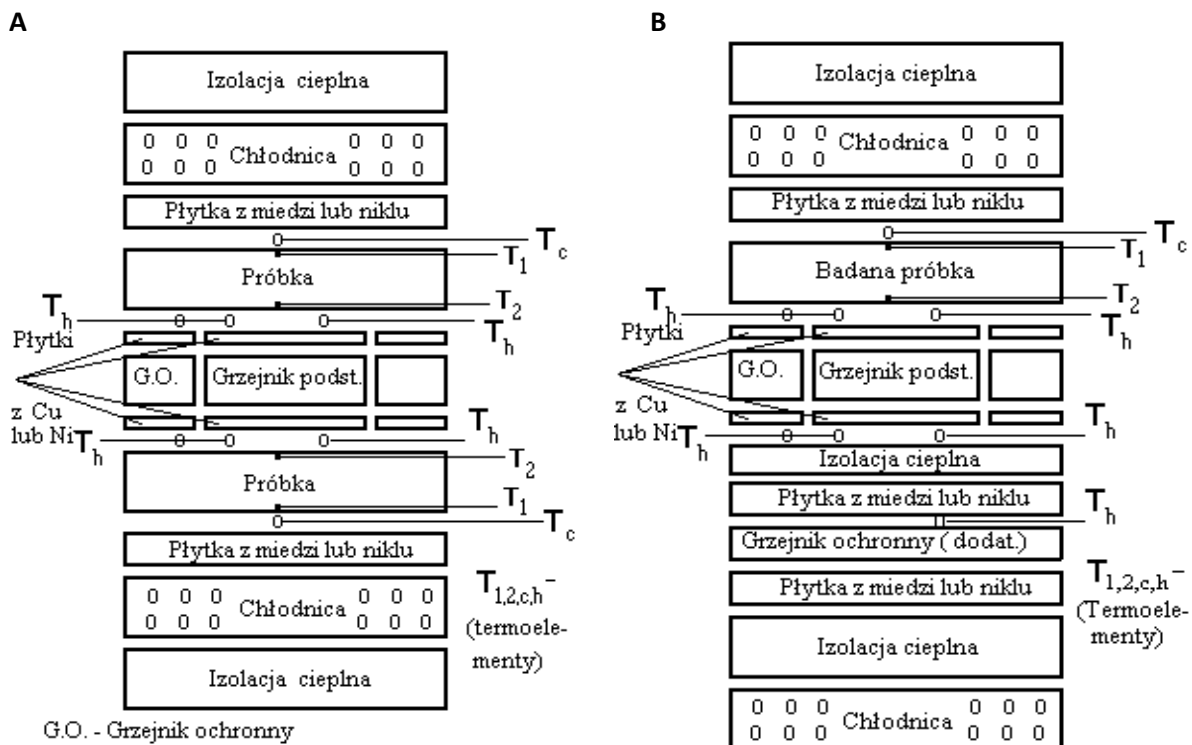
Przewodność cieplna λ jest powiązana z ciepłem właściwym c , gęstością ρ i dyfuzyjnością cieplną a ciała stałego zależnością:

$$\lambda = \rho ca \quad (2)$$

Przewodność cieplna λ jest parametrem termofizycznym określającym jakość materiału jako przewodnika ciepła w warunkach ustalonej wymiany ciepła. Zakres mierzonych wartości λ ciał stałych jest bardzo szeroki i obejmuje około sześciu rzędów wartości, na przykład w temperaturze pokojowej węgiel tytanu ma przewodność cieplną $2.8 \cdot 10^{-3} \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, a czyste srebro około $430 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$. Podawane w literaturze wartości przewodności cieplnej czystych metali niejednokrotnie różnią się dość znacznie. Wynika to z faktu dużego wpływu na λ małych ilości domieszek oraz obróbki termicznej, decydującej o strukturze metalu. Wartość przewodności cieplnej stopu jest zwykle znacznie mniejsza niż czystych składników wchodzących w jego skład. Również w przypadku izolatorów i materiałów budowlanych, które są z reguły porowate, mogą wystąpić znaczne różnice w wartościach λ , w zależności od zastosowanej technologii ich otrzymywania.

Metody badania przewodności cieplnej λ materiałów izolacyjnych są związane z pomiarem gęstości strumienia ciepła \dot{q} w próbce przy zadanym gradiencie temperatury. Źródłem ciepła jest najczęściej grzejnik elektryczny zasilany prądem stałym, którego moc P określa się przez pomiar napięcia i natężenia przepływającego prądu. Pomiary wykonuje się w stanie ustalonym, gdy gęstość strumienia ciepła \dot{q} przepływający przez próbkę nie ulega zmianie w dostatecznie długim czasie. Pomiar

przewodności cieplnej jest zawsze eksperymentem bardzo czasochłonnym i wymagającym szczególnych zabiegów w wysokiej temperaturze. Tradycyjna metoda określania przewodności cieplnej polega na bezpośrednim wykorzystaniu zależności definicyjnej (1). Eksperyment polega na stworzeniu takich warunków, aby wymiana ciepła przez przewodzenie w próbce badanego materiału miała charakter ustalony w czasie i jednowymiarowy. Badania przeprowadza się w aparacie płytowym z ochronną płytą cieplną, nazywanym również od nazwiska pomysłodawcy aparatem Poensgena. Do badań wykorzystywane są dwie jednakowe próbki pomiarowe w kształcie płaskich prostokątów lub dysków umieszczone symetrycznie po obu stronach płyty grzejnika elektrycznego (rys. 1.a). Dwie płyty chłodzące o wymiarach równych średnicy próbki lub długości boku zamykają stos pomiarowy. Grzejnik elektryczny, nazywany podstawowym, jest otoczony grzejnikiem elektrycznym ochronnym (GO) o średnicy zewnętrznej równej średnicy próbek. Pomiędzy grzejnikiem podstawowym i ochronnym znajduje się niewielka szczelina ułatwiająca pomiar i sterowanie temperaturą obydwu grzejników. Ciepło wydzielane w grzejnikach przepływa przez dwie próbki prostopadle do ich powierzchni styku



Rys. 1. Aparat płytowy z ochronną płytą cieplną: **A** z dwiema próbkami pomiarowymi, **B** z jedną próbką pomiarową.

z chłodnicami. W czasie pomiarów temperatura grzejnika podstawowego musi być równa temperaturze grzejnika ochronnego. Również temperatury chłodnic muszą być jednakowe. Temperatury są mierzone przy pomocy termoelementów. Przewodność cieplną λ oblicza się przekształcając zależność (1) do postaci:

$$\lambda = \frac{P}{2A} \cdot \frac{\delta}{\Delta T} = \frac{P}{2A} \cdot \frac{\delta}{T_h - T_c} \quad (3)$$

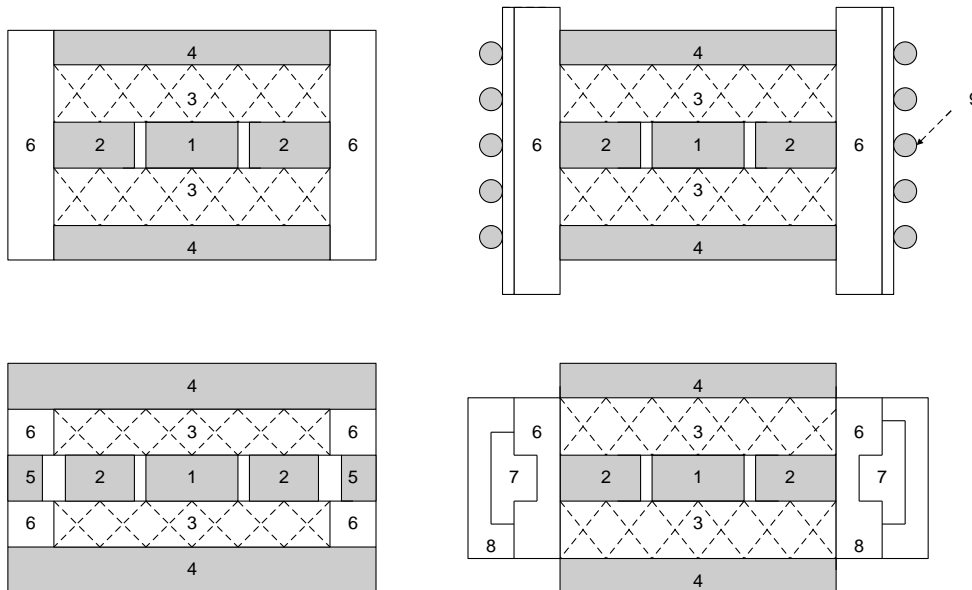
Oprócz aparatu płytowego z ochronną płytą cieplną i dwiema jednakowymi próbkami pomiarowymi wykorzystuje się również inną wersję metody i aparat płytowy z jedną próbką pomiarową o grubości δ i dwoma grzejnikami dodatkowymi, tzw. aparat płytowy z podwójną ochroną cieplną (rys. 1.b). Dodatkowy grzejnik ochronny, przy ustalonej i takiej samej temperaturze grzejnika podstawowego i ochronnego, umożliwia wymianę ciepła tylko w jednym kierunku: prostopadle do powierzchni próbki z grzejnika podstawowego o temperaturze T_h przez badaną próbkę do chłodnicy o temperaturze T_c . Współczynnik przewodzenia ciepła λ dla tego przypadku oblicza się z relacji:

$$\lambda = \frac{P}{A} \cdot \frac{\delta}{\Delta T} = \frac{P}{A} \cdot \frac{\delta}{T_h - T_c} \quad (4)$$

Czasami dla kontroli mierzy się również temperatury T_1 i T_2 powierzchni próbek (rys. 1). W zależności od przeznaczenia aparaty płytowe z ochronną płytą cieplną różnią się wymiarami płyt w stosie pomiarowym oraz zakresem temperatury pracy. Ze względu na zakres temperatury, w którym określa się przewodność cieplną, aparaty płytowe dzielimy na:

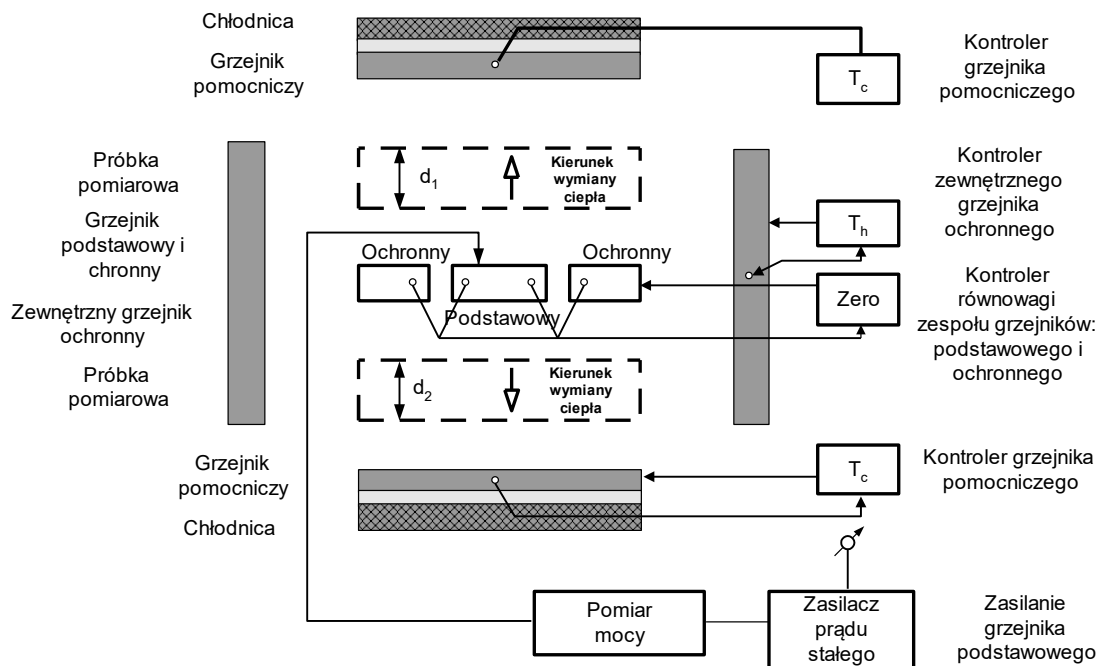
- a) pracujące w pobliżu temperatury pokojowej ($0^\circ\text{C} < T < 100^\circ\text{C}$);
- b) niskotemperaturowe ($-200^\circ\text{C} < T < 0^\circ\text{C}$);
- c) wysokotemperaturowe ($100^\circ\text{C} < T < 1200^\circ\text{C}$).

W czasie pomiarów przewodności cieplnej zarówno w niskich, jak i w wysokich temperaturach stos pomiarowy otacza się odpowiednio chłodnicą lub grzejnikiem ochronnym, aby wyeliminować straty ciepła przez konwekcję z bocznych powierzchni stosu pomiarowego – rys. 2.



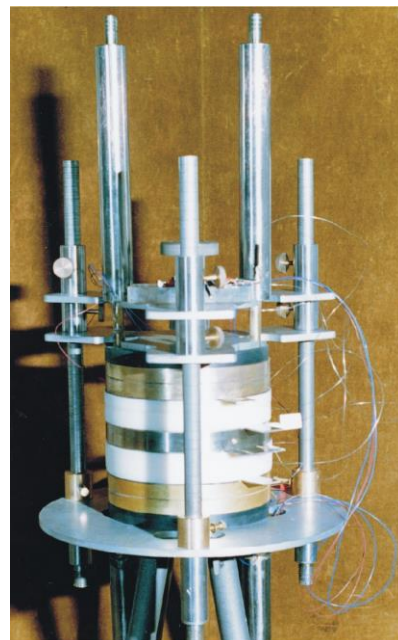
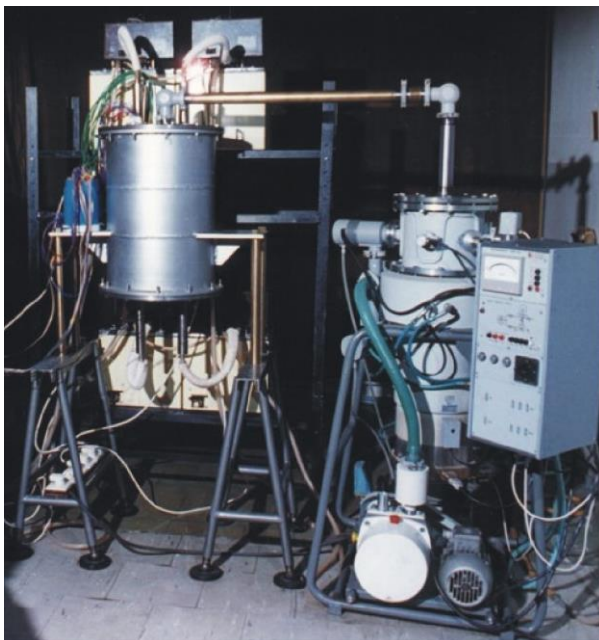
Rys. 2. Różne układy ochronne zmniejszające straty ciepła z bocznych powierzchni próbek pomiarowych w aparatach Poensgena: 1 – grzejnik podstawowy, 2 – grzejnik ochronny, 3 – próbka pomiarowa, 4 – chłodnica, 5 – zewnętrzny grzejnik ochronny, 6, 8, - izolacja cieplna, 7 – kształtka z miedzi, 9 – grzejnik ochronny w kształcie cylindra otaczający stos pomiarowy.

Schemat ideowy aparatu płytowego z zewnętrznym grzejnikiem ochronnym przedstawiono na rys. 3. Wyszczególniono stos pomiarowy, układ stabilizacji i kontroli temperatury chłodziw i grzejników oraz układ pomiaru mocy stałego prądu elektrycznego zespołu grzejników.



Rys. 3. Schemat ideowy profesjonalnego aparatu Poensgena z dwiema próbkami pomiarowymi do pomiaru przewodności cieplnej materiałów izolacyjnych.

Widok stanowiska do pomiaru współczynnika przewodności cieplnej wytworzonego w WAT oraz jego stos pomiarowy pokazano na rysunku 4. W środkowej części stosu jest widoczna próbka badanego materiału.



Rys. 4 Widok ogólny stanowiska do pomiaru współczynnika przewodności cieplnej oraz stos pomiarowy z badaną próbką wstawiany do osłony.

3. OPIS STANOWISKA LABORATORYJNEGO

Do pomiaru przewodności cieplnej ciał stałych, złych przewodników ciepła ($\lambda < 2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) często są stosowane aparaty płytowe w konfiguracji z jedną próbką pomiarową (rys. 1.b). Widok stanowiska laboratoryjnego używanego w pomiarach pokazano na rysunku 5.



Rys. 5. Widok stanowiska laboratoryjnego używanego w pomiarach

Główny element stanowiska laboratoryjnego zawierający stos pomiarowy jest pokazany na rysunku 6.

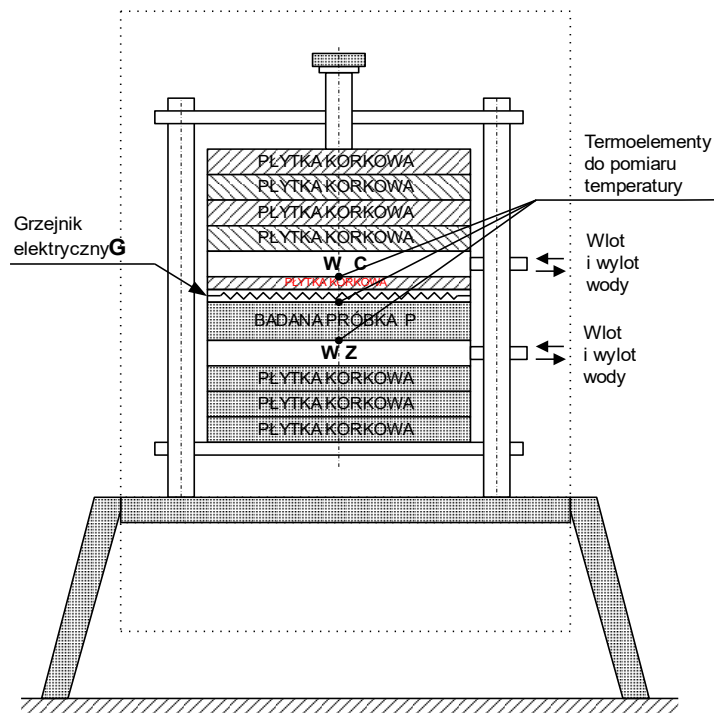


Rys. 6. Stos pomiarowy stanowiska z osłoną. Widoczny przełącznik obrotowy punktów pomiarowych i termostat.

Schemat konstrukcyjny takiego aparatu, który posłuży do wykonania ćwiczenia pokazano na rys.7.

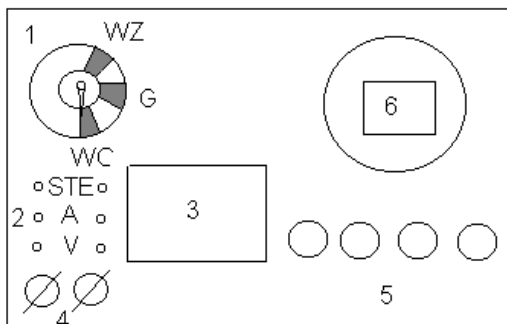
Płaska próbka P wykonana z badanego materiału przylega z jednej strony do grzejnika elektrycznego G, z drugiej do chłdnicy WZ. Grzejnik jest wykonany w postaci płaskiej metalowej płytki, we wnętrzu której znajduje się spirala elektryczna. Chłdnica jest wykonana w postaci płaskiej metalowej płytki, przez którą wewnątrz przepływa zimna woda.

Jednostronny przepływ ciepła z grzejnika G do próbki P i z próbki P do chłdnicy WZ jest realizowany w ten sposób, że z drugiej strony grzejnika za cienką warstwą korka jest umieszczony grzejnik WC z ciepłą wodą, której temperatura jest bliska temperaturze grzejnika elektrycznego. Druga strona tej płytki jest izolowana również warstwami korka. Druga strona chłdnicy, która nie styka się z próbką, jest izolowana również warstwami korka. Układ „warstwa korka, płytka ogrzewana gorącą wodą, warstwa korka, grzejnik elektryczny, badana próbka, chłdnica, warstwa korka” jest umieszczony w uchwycie zapewniającym prawidłowe ustawienie poszczególnych elementów oraz umożliwiających ich prawidłowe przyleganie przez dociśnięcie śrubą umieszczoną w krzyżowym jarzmie.



Rys. 7. Schemat aparatu płytowego z jedną próbką pomiarową

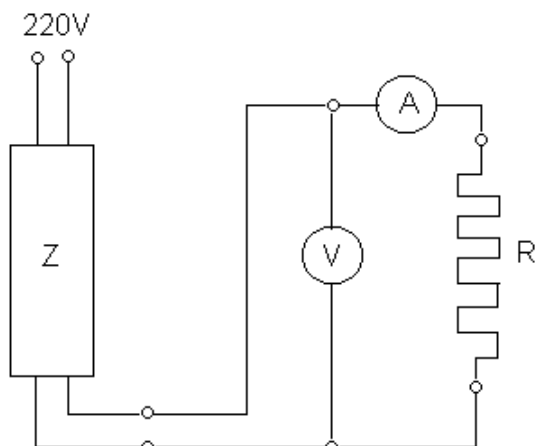
Dla ustalenia odległości od sworzni i wyrównania krawędzi całego stosu stosuje się specjalną wkładkę, którą należy koniecznie usunąć przed rozpoczęciem pomiarów. Cały układ jest zamknięty w pudle wypełnionym kulkami ze styropianu, w celu zmniejszenia odpływu ciepła przez powierzchnie boczne płytek. Pod spodem układu płytek znajduje się drugie pudło, do którego po otwarciu zasuwę przesypane są kulki styropianu, gdy jest przewidziana wymiana próbki. Konstrukcja grzejnika zapewnia równomierny przepływ strumienia ciepła na całej powierzchni grzejnej. Spirala grzejnika jest umieszczona między cienkimi płytkami miedzianymi i jest od nich izolowana elektrycznie. Dzięki równomiernemu nawinięciu spirali oporowej oraz zastosowaniu płytek miedzianych, temperatura grzejnika jest stała na całej powierzchni grzejnej. Na podstawie aparatu (rys. 8) są umieszczone gniazda do podłączenia zasilania grzejnika oraz do podłączenia przyrządów mierzących spadek napięcia i natężenie prądu zasilającego grzejnik w celu określenia jego mocy.



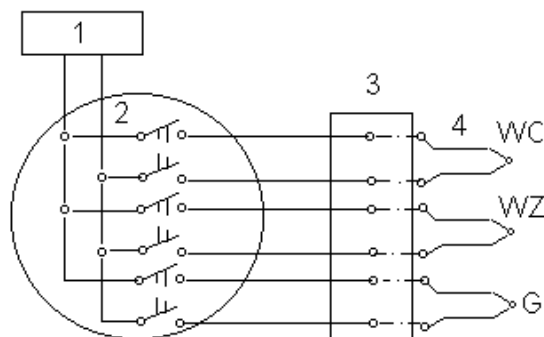
Rys. 8. Podstawa aparatu Poensgena:
1 – przełącznik termoelementów; 2 – miejsce podłączenia przyrządów mierniczych (woltomierza, amperomierza, miliwoltomierza); 3 – termostat elektroniczny; 4 – miejsce podłączenia zasilania grzejnika; 5 – studzienki do umieszczenia termometrów; 6 – stos pomiarowy aparatu Poensgena (rys. 6).

Prąd z sieci jest doprowadzany do stabilizowanego zasilacza prądu stałego, który pozwala na dowolną regulację napięcia i natężenia prądu zasilającego grzejnik (rys. 9). Maksymalne napięcie prądu zasilającego grzejnik nie powinno przekroczyć 30 V. Chłodnica WZ i płytka metalowa ogrzewana ciepłą wodą są wykonane w postaci pudełek miedzianych z wyfrezowanymi wewnątrz kanałami umożliwiającymi taki przepływ wody, który zapewni równomierny rozkład temperatury na całej powierzchni stykającej się z próbką. Woda ciepła, która przepływa przez płytkę, krąży w układzie zamkniętym „ultratermostat – ogrzewana płytka”. Woda zimna może być doprowadzana do chłodnicy WZ z sieci wodociągowej lub z drugiego ultratermostatu. Na podstawie przyrządu (rys. 8) są umieszczone cztery studzienki do zamocowania termometrów do pomiaru temperatury wody dopływającej i odpływającej z płytki ogrzewanej ciepłą wodą i z chłodnicy.

Pomiaru temperatury na powierzchniach grzejnika, chłodnicy i płytki z ciepłą wodą dokonuje się za pomocą termoelementów Nichrom - Nikiel (NiCr - Ni), których charakterystyka termometryczna jest zamieszczona w tablicy 1. Schemat układu pomiarowego pokazano na rys. 10.



Rys. 9. Schemat zasilania grzejnika:
Z – stabilizowany zasilacz prądu stałego,
R – rezystor grzejnika, K – woltomierz,
A - amperomierz.



Rys. 10. Układ do pomiaru napięcia termoelektrycznego: 1 – woltomierz cyfrowy, 2 – przełącznik, 3 – termostat elektroniczny, 4 – termoelementy.

Spoiny termoelementów (4), tzw. „gorące końce”, są przylutowane do powierzchni chłodnicy WZ, grzejnika G oraz płytki zasilanej ciepłą wodą WC. Spoiny odniesienia, tzw. „zimne końce” są podłączone do termostatu elektronicznego (3). Temperatura odniesienia wynosi więc 50 °C. Spoiny odniesienia z przełącznikiem, umożliwiającym kolejny pomiar trzech napięć termoelektrycznych za pomocą jednego woltomierza cyfrowego są połączone przewodami miedzianymi. Po ustawieniu przełącznika w położenie G, WC, WZ można kolejno pomierzyć napięcia termoelektryczne odpowiadające różnicy temperatury między powierzchniami grzejnika, ogrzewanej płytki i chłodnicy, a spoinami odniesienia umieszczonymi w termostacie.

Tab. 1 Charakterystyka termoelementu Nichrom - Nikiel (NiCr-Ni) w zakresie od 0°C do 100°C, (typ K, DIN 43710/1977, IEC 584-1, temperatura odniesienia 0 °C).

t, °C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
U, mV	0	0.397	0.798	1.203	1.611	2.022	2.436	2.850	3.266	3.681	4.095

4. PRZEBIEG ĆWICZENIA

Próbki materiałów, których przewodność cieplna winna być zmierzona, powinny być bardzo starannie przygotowane. Powierzchnie ich powinny być gładkie, a płaszczyzna ogrzewana i chłodzona równoległe. Wymiary tych powierzchni, tj. długość i szerokość próbki są określone przez wymiary odpowiednich powierzchni grzejnika i chłodnicy (50 x 50 mm). Grubość próbki zależy od jej przewodności cieplnej i wynosi od 5 do 10 mm. Im większy jest współczynnik przewodzenia ciepła, tym większa musi być grubość próbki celem otrzymania tego samego gradientu temperatury. Odpowiednio duża różnica temperatury na obydwu powierzchniach zewnętrznych próbki jest konieczna, aby błędy pomiarów były jak najmniejsze.

Przed przystąpieniem do pomiarów należy zdjąć górne pudło i włożyć próbkę pomiędzy chłodnicę a cienką płytkę korkową, umieszczoną pod grzejnikiem. W celu właściwego wzajemnego ustawienia stosu należy włożyć specjalną wkładkę pomiędzy stos a sworznie i wyrównać brzegi elementów, a następnie założyć jarzmo i skrócić śrubami cały układ. Po wykonaniu tych czynności należy wyjąć wkładkę, założyć górne pudło i zasypać cały układ materiałem izolacyjnym przechowywanym w pudle dolnym.

Pomiar przewodności cieplnej przebiega dwuetapowo i składa się z etapu przygotowawczego i pomiaru właściwego. W pierwszym etapie doprowadza się układ do równowagi cieplnej, a w drugim zapisuje się wskazania przyrządów pomiarowych i oblicza się przewodność cieplną badanej próbki.

W okresie przygotowawczym należy na początku ustalić wartości napięcia i natężenia prądu dostarczanego I do grzejnika oraz temperaturę wody ciepłej t_{WC} , dopływającej do grzejnika WC z ultratermostatu. Równowagę cieplną układu uzyskuje się poprzez zmianę napięcia zasilającego grzejnik tak długo, aż osiągnie się stan, w którym temperatura grzejnika G i płytki ogrzewanej WC będą jednakowe. Po osiągnięciu równowagi cieplnej należy co 10 minut sprawdzać napięcia termoelektryczne na termoelementach. Jeżeli dwie sąsiednie serie odczytów wykazują stałość wszystkich wielkości mierzonych, to można przystąpić do pomiarów właściwych. Polegają one na odczytywaniu wskazań przyrządów w odstępach 5 – cio minutowych przez pół godziny. Wynik pomiarów należy umieścić w tablicy 2.

Tab. 2 Pomiar współczynnika przewodzenia ciepła

Próbka; $\delta = \dots\dots\dots mm$; $A = 25 [cm^2]$

Lp.	t_{WC}		t_G		t_{WZ}		t_{WC1}	t_{WC2}	t_{WZ1}	t_{WZ2}	U	I	t_{ZK}	
	mV	°C	mV	°C	mV	°C	°C	°C	°C	°C	V	mA	°C	
1.														
2.														
3.														
4.														
5.														
Śr.														

$P = U * I = \dots\dots\dots [W]; \quad \Delta T = \dots\dots\dots [K].$

Wartość przewodności cieplnej oblicza się ze wzoru:

$$\lambda = \frac{U * I * \delta}{A * \Delta T} \left[\frac{W}{m * K} \right] \quad (5)$$

gdzie:

$U[V]$ - średnia wartość spadku napięcia na spirali grzejnej;

$I[A]$ - średnia wartość natężenia prądu grzejnego;

δ - grubość próbki;

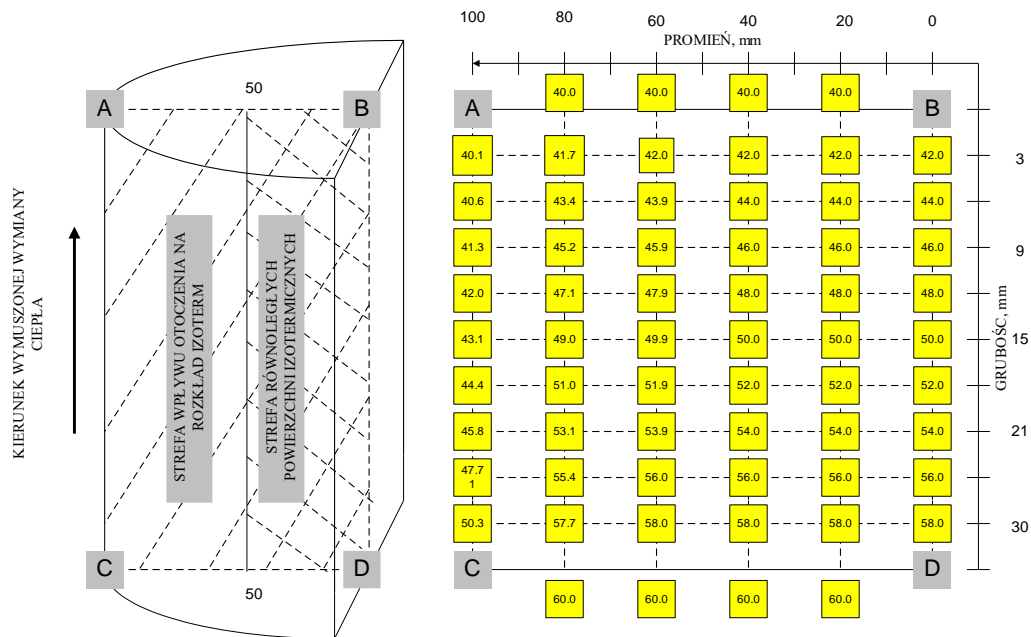
$A[m^2]$ - pole powierzchni próbki;

ΔT - średnia wartość spadku temperatury na badanej próbce, równa różnicy średniej temperatury chłodnicy WZ i grzejnika G, odczytywanych z wykresu cechowania termoelementów.

5. WNIOSKI

Jednym z najważniejszych błędów pomiaru przewodności cieplnej w profesjonalnym aparacie płytowym jest błąd związany ze startami ciepła z bocznej powierzchni próbki pomiarowej. Warunkiem poprawnego pomiaru jest zapewnienie jednokierunkowego przepływu ciepła z grzejnika podstawowego (rys. 7) przez próbkę do chłodnicy. W obrębie próbki płaszczyzny izotermiczne są wzajemnie równoległe. Straty ciepła z jej bocznych powierzchni powodują zaburzenie tej równoległości. Jeżeli dociera ono do przestrzeni pomiarowej, to przepływ ciepła przestaje być jednokierunkowy. Aby zilustrować ten problem, na rysunku 10 pokazano propagację zaburzenia pola temperatury w próbce profesjonalnego aparatu Poensgena.

Specjalistyczne aparaty płytowe FOX300HT i FOX314 firmy LaserComp USA używane w pracach badawczych pokazano na rysunku 11. Próbki badanego materiału mają kształt prostopadłościanu o wymiarach podstawy 300mm x 300mm i wysokości do 50mm. Zakres temperatury odpowiednio 20°C do 200°C dla FOX300HT i od -20°C do 80°C dla FOX300HT



Rys. 10. Rozkład temperatury wewnątrz próbki w kształcie krążka o średnicy 200 mm i grubości 30 mm ze szkła organicznego (plexi) w otoczeniu powietrza (przestrzeń pomiarowa to wewnętrzny krążek o średnicy 100 mm).



Rys. 11. Profesjonalne aparaty do pomiaru współczynnika przewodzenia ciepła materiałów izolacyjnych firmy LaserComp FOX300HT (zakres temperatury od 20°C do 200°C) oraz FOX314 (20°C do 90°C) z próbką materiału izolacyjnego umieszczoną w komorze pomiarowej.

SPRAWOZDANIE

Sporządzić sprawozdanie z ćwiczenia. W sprawozdaniu umieścić:

1. Opis układu pomiarowego.
2. Obliczenie wartości przewodności cieplnej badanej próbki.
3. Analizę błędów pomiaru.



LITERATURA:

- [1] S. Wiśniewski: Wymiana ciepła, PWN, Warszawa, 1979.
- [2] J. Terpiłowski, A. Panas, J. Zmywaczyk, P. Koniorczyk, S. Wiśniewski, M. Preiskorn: Termodynamika. Pomiary cieplne – skrypt WAT, Warszawa