

mgr inż. Elżbieta Gogół  
doc. dr Wiesław Gogół

Instytut Techniki Ciepłej  
Politechniki Warszawskiej

## APARAT DO BADANIA PRZEWODNOŚCI CIEPLNEJ METALI W TEMPERATURACH UMIARKOWANYCH METODĄ PORÓWNAWCZĄ

W pracy przedstawiono opis budowy i działania prostego aparatu do pomiaru przewodności cieplnej metali metodą porównawczą w stanie ustalonym,

Aparat zbudowano na podstawie wyników przeprowadzonej analizy teoretycznej rozkładu temperatury i wielkości strat ciepłych stosu pomiarowego w takim układzie.

Aparat przewidziano do pomiaru przewodności cieplnej ciał stałych w zakresie  $10 \div 300 \text{ W/mK}$  i zakresie temperatur od  $-15^{\circ}\text{C}$  do  $100^{\circ}\text{C}$ .

### 1. WSTĘP

W badaniach przewodności cieplnej metali najczęściej dotychczas stosowanymi metodami - wykazującymi szereg zalet - są metody stanu ustalonego, przy czym wyjątkowo rozpowszechnione są różne modyfikacje metod prętowych. Możliwość wykorzystania w takich układach pomiarowych metod porównawczych i użycia wzorców (ściślej pseudowzorców) przewodności cieplnej [2] pozwala znacznie uprościć zarówno sam układ pomiarowy jak i sposób opracowania wyników pomiarów. Jednakże w aparatach opartych na tych metodach występuje zwykle bardzo skomplikowane

zagadnienie zminimalizowania strat bocznych albo ich wyznaczenia (lub dokładniej określenie i zminimalizowanie wszystkich możliwych sposobów przewodzenia ciepła przez izolację otaczającą stos pomiarowy), co prowadzi do konieczności stosowania dodatkowych 2 lub 3 grzejników ochronnych. Dodatkowe grzejniki komplikują nie tylko układ termiczny aparatu ale przede wszystkim układ regulacyjny. Na ogół w przypadku zastosowania kilku grzejników w celu osiągnięcia równowagi termicznej niezbędne jest wprowadzenie automatycznych układów regulacyjnych, gdyż ręczna regulacja wykonywana przez eksperymentatora wymagałaby zbyt długiego czasu koniecznego do osiągnięcia stanu ustalonego lub też mogłaby się okazać w ogóle nieskuteczna.

Tego rodzaju skomplikowane układy regulacyjne o wysokiej niezawodności powinny być raczej używane w przypadku badań przewodności cieplnej prowadzonych w szerokim zakresie zmienności temperatur pomiaru, ponieważ straty boczne mogą być wtedy znaczne.

Próby uniknięcia komplikacji związanych z zastosowaniem układów grzejników ochronnych były oczywiście przeprowadzane, ale tylko w bardzo rzadkich przypadkach udało się osiągnąć względnie zadowalającą dokładność pomiarów, jak np. w układzie zastosowanym przez A.D.Stuckesa i R.P.Chasmara [9], w którym pomiary prowadzone były w próżni. Natomiast zagadnienie rozkładu temperatury i minimalizowania strat bocznych w aparatach prętowych wyposażonych w grzejniki ochronne było przedmiotem licznych prac, na przykład zostało szczegółowo analizowane przez M.J.Laubitza [5] i A.W.Pratta [7].

Celem niniejszej pracy była próba opracowania prostego układu pomiarowego do wyznaczania przewodności cieplnej metali, nie wymagającego specjalnych układów regulacyjnych a jednocześnie zapewniającego względnie dużą dokładność pomiarów; natomiast zakres temperatur pomiaru został ograniczony do temperatur zbliżonych do temperatury otoczenia.

## 2. ANALIZA TERMICZNA UKŁADU POMIAROWEGO

W celu opracowania układu pomiarowego rozważono kilka wariantów takich układów oraz przeprowadzono szczegółową analizę rozkładu temperatury w projektowanym aparacie.

Przyjęto następujące założenia:

a) średnica próbek walcowych wynosi  $3/4''$ ; przy takiej średnicy możliwe jest wykonywanie pomiarów przewodności cieplnej  $\lambda$  tych samych próbek w aparacie Firmy Dynatech Corp. [3]<sup>\*)</sup> oraz ewentualne wykorzystanie próbek wzorcowych cechowanych w National Bureau of Standards;

b) jako próbki wzorcowe przewidziano zasadniczo żelazo armco (francuskiej firmy Armco); istnieje również możliwość zastosowania próbek wzorcowych wykonanych ze stali 1H18N9T cechowanych uprzednio w aparacie Dynatech;

c) zakres temperatur pomiaru zbliżony do temperatury otoczenia i w tym zakresie możliwość wyznaczania przewodności cieplnej prawie wszystkich metali, tzn. wartości  $\lambda$  od 10 do 300 W/mK;

d) możliwie najprostsza konstrukcja aparatu i prosty układ pomiarowy;

e) łatwość i szybkość montażu aparatu i wymiany próbki;

f) możliwie krótki (dla metody ustalonej) czas całkowitego pomiaru, nie przekraczający 7 godzin;

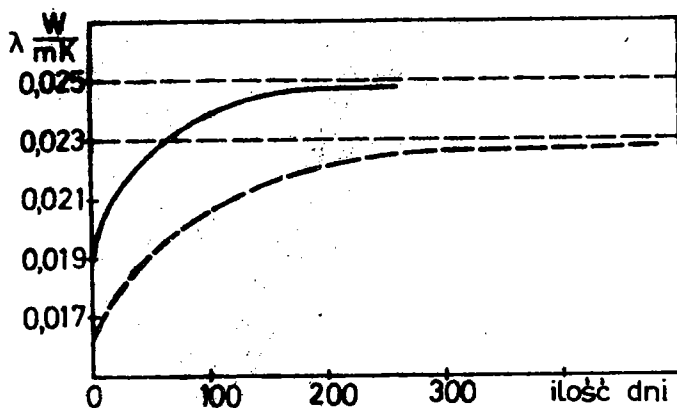
g) zadawalająca dokładność otrzymywanych wyników.

Najbardziej istotnym warunkiem umożliwiającym działanie takiego aparatu wydawał się dobór odpowiedniej izolacji cieplnej ponieważ układ pomiarowy bez grzejników ochronnych nawet w umiarkowanym zakresie temperatur mógłby być stosowany i spełniać wymagania odnośnie odpowiedniej dokładności jedynie w przypadku zastosowania izolacji o możliwie małej przewodności cieplnej. W opracowanym aparacie zastosowano poliuretan odznaczający się dobrą izolacyjnością a jednocześnie będący materiałem

\*) Znajdującego się w Instytucie Techniki Ciepłej PW.

łatwo obrabialnym i pozwalającym na wykonanie potrzebnych kształtek ściśle przylegających do elementów aparatu.

W celu określenia wielkości strat ciepłych w aparacie przeprowadzono kilkumiesięczne badania przewodności cieplnej poliuretanu wykazującego pogorszenie izolacyjności w miarę procesu starzenia [6]. Wyznaczono przewodność cieplną 7 próbek poliuretanu (o średniej gęstości  $\rho = 38,4 \text{ kg/m}^3$ ) w aparacie Bocka [4], przy czym w odróżnieniu od badań [6] były one poddawane okresowemu przegrzewaniu w temperaturach nie przekraczających  $100^\circ\text{C}$ . Uzyskane wyniki w porównaniu z wynikami [6] przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Wpływ czasu na przewodność cieplną próbek poliuretanowych (starzenie). ---- krzywa wg [6] (temperatura pomiaru  $0^\circ\text{C}$ ), ——— średniona krzywa z pomiarów własnych przy próbkach okresowo nagrzewanych do temperatur poniżej  $100^\circ\text{C}$  (średnia temperatura pomiaru  $25^\circ\text{C}$ )

Grzejnik i chłodnica aparatu wykonane zostały w kształcie kwadratowych płytek o boku 50 mm; upraszcza to znacznie montaż aparatu, a jednocześnie pewna ilość ciepła przewodzona jest bezpośrednio przez izolację wewnętrzną (rys. 2) od grzejnika do chłodnicy, co prowadzi do zmniejszenia strat bocznych stosu pomiarowego.

Dla przyjętych założeń można było przeprowadzić analizę rozkładu temperatury i strat ciepła pod pewnymi względami, podobną do wspomnianych wyżej rozważań M. J. Laubitz'a i A. W. Pratta

[5],[7]. W przeprowadzonej analizie uwzględniono szereg czynników wpływających w istotny sposób na wielkość strat cieplnych i dokładność pomiarów; między innymi wielkość strumienia ciepła przewodzonego przez stos pomiarowy (rys.2) i izolację wewnętrzną, spadki temperatury w próbkach badanej i wzorcowych, średnią temperaturę pomiaru, długości próbek badanej i wzorcowych oraz termiczny opór kontaktowy występujący na powierzchniach zetknięcia próbek, grzejnika i chłodnicy, sposób umieszczenia termoelementów w próbkach, celowość użycia miedzianych podkładek wyrównujących strumień ciepła w próbkach wzorcowych, rodzaj zastosowanej izolacji cieplnej itd.

Analizę przeprowadzono (dla uproszczenia) dla układu walcowego, przy czym wykonanie jej wymagało dość szczegółowych obliczeń (w tym również numerycznych) i pewnego zoptymalizowania na tej podstawie wymiarów i parametrów układu pomiarowego<sup>\*)</sup>.

Prawidłowość przeprowadzonej analizy mogła zostać sprawdzona między innymi na podstawie wyników wykonywanych badań przewodności cieplnej materiałów o znanej przewodności cieplnej oraz porównania wielkości strumieni ciepła przewodzonych przez górną i dolną próbkę wzorcową.

Najistotniejszym warunkiem zapewniającym prawidłowe działanie aparatu jest uzyskanie możliwie dużego strumienia ciepła przewodzonego przez stos pomiarowy przy stosunkowo małych stratach ciepła przewodzonych przez izolację.

Korzystniejsze warunki termiczne występują przy badaniu próbek o większej przewodności cieplnej, jednakże długość próbki musi być w tym przypadku większa i tym samym rosną straty boczne. Przy próbkach o małej przewodności cieplnej strumień przewodzony maleje, ale można wówczas zmniejszyć długość próbki i uzyskać zmniejszenie strat bocznych. Zmniejszenie długości próbek ograniczone jest odległością między termoelementami umieszczonymi w próbkach i błędem wynikającym z pomiaru tej odległości.

W zależności od przewidywanej przewodności cieplnej badanego materiału o dokładności uzyskiwanych wyników decyduje

\*) Oczywiście nie wszystkie czynniki mogły być zoptymalizowane, np. pt. d. i e. w przyjętych założeniach.

przede wszystkim wybór odpowiedniej długości próbki i strumienia przewodzonego przez stos pomiarowy.

Pomiary przewodności cieplnej materiałów o  $\lambda < 10 \text{ W/mK}$  są również możliwe, ale wtedy błędy są większe i trzeba je określać dla każdego konkretnego przypadku.

### 3. OPIS APARATU I STANOWISKA POMIAROWEGO

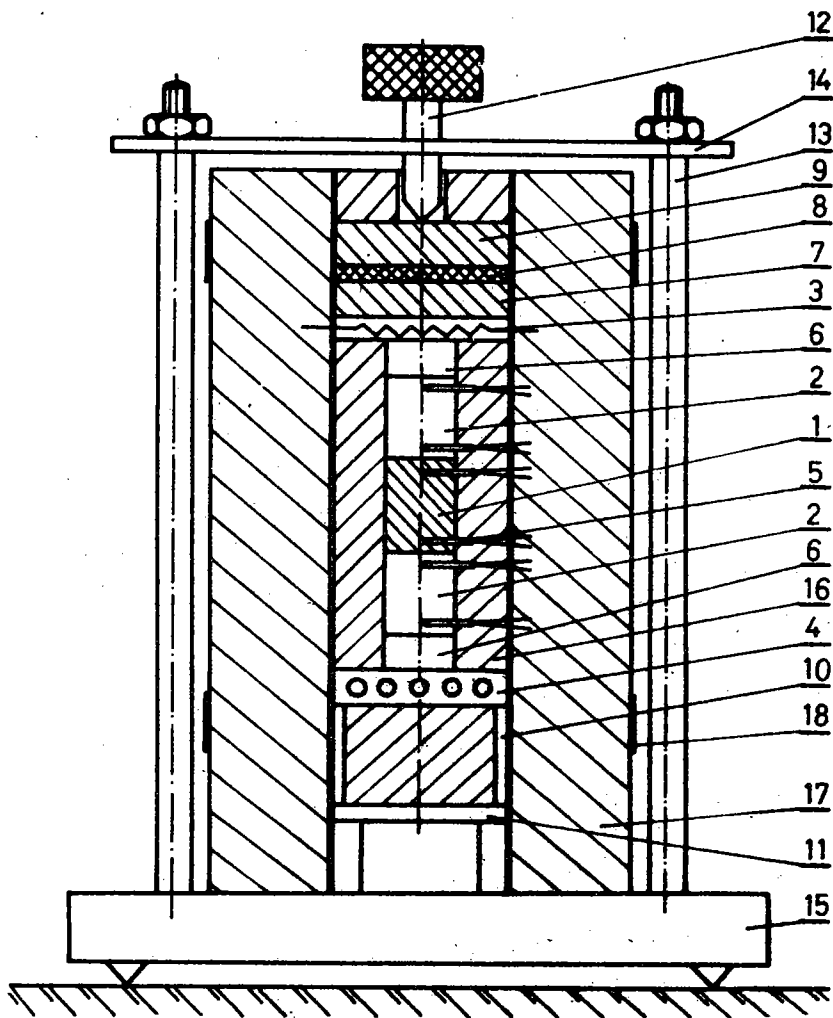
Schemat aparatu przedstawiono na rys.2. Stos pomiarowy składający się z próbki badanej, umieszczonej między dwiema próbkami wzorcowymi (górną i dolną), grzejnika i chłodnicy \*) ustawiany jest na odpowiedniej podstawie tekstolitowej. Do osiowego ustawienia próbek służą specjalne szablony. Termiczny opór kontaktowy na powierzchniach zetknięcia próbek zmniejszany jest przez nacisk śruby.

Izolacja zewnętrzna aparatu z poliuretanu wykonana została w kształcie prostopadłościanu o podstawie kwadratowej i boku około 120 mm.

Źródłem ciepła jest ceramiczny grzejnik elektryczny wykonany z kanthalu w obudowie miedzianej. Zasilanie grzejnika mogło odbywać się w dwojaki sposób: prądem zmiennym przez stabilizator napięcia ES-231 i kaskadowy układ autotransformatorów albo prądem stałym z zasilacza stabilizowanego P316 (Mera-tronic) (rys.3).

Ciepło odbierane jest przez chłodnicę miedzianą zasilaną z ultratermostatu UTP lub U10. W temperaturach dodatnich czynnikiem chłodzącym była woda, a w temperaturach ujemnych mieszanina glikolu etylenowego z wodą destylowaną. W przypadku wykonywania badań w temperaturach ujemnych ze względu na możliwość kondensacji pary wodnej na elementach aparatu musi być on umieszczony w specjalnej szczelnej komorze izolowanej styropia-

\*) Zamiast podkładek miedzianych pokazanych na rys.2 stosowano również grzejnik i chłodnicę z odpowiednimi występami walcowymi.



Rys.2. Schemat aparatu do badania przewodności cieplnej: 1- próbka badana, 2- próbki wzorcowe, 3- grzejnik elektryczny, 4- chłodnica wodna, 5- termoelementy do pomiaru temperatury w próbkach wzorcowych i badanej, 6- podkładki miedziane, 7- podkładka ceramiczna, 8- podkładka sprężysta, 9- podkładka stalowa, 10- ramka tekstolitowa, 11- podstawa tekstolitowa, 12- śruba dociskająca stos pomiarowy, 13- cztery pręty mocujące stos pomiarowy, 14- płyta sprężynująca, 15- płyta podstawy aparatu, 16- izolacja cieplna wewnętrzna (poliuretan), 17- izolacja cieplna zewnętrzna (poliuretan), 18- taśmy z folii metalowej mocujące izolację cieplną





menty (po dwa w każdej próbce) umieszczono w otworkach o średnicy 1,7 mm na głębokości 10 mm.

Odczyty wskazań termoelementów wykonywano na odpowiednio wysokiej klasy potencjometrze lub najczęściej na woltomierzu cyfrowym V 534. Ze względu na zastosowanie drutów na termoelementy o znacznej czystości (firmy Heraeus) możliwe było uniknięcie ich cechowania i korzystanie z tablic podanych przez Shenkera i innych [8].

Po uzyskaniu równowagi termicznej przewodność cieplną wyznacza się z prostej zależności

$$\lambda = \frac{Q \Delta x}{\Delta t F},$$

gdzie:

$Q$  - ilość ciepła przewodzona przez stos pomiarowy,

$\Delta t$  - różnica temperatur między termoelementami znajdującymi się w odległości  $\Delta x$ ,

$F$  - pole przekroju poprzecznego próbki.

W opisanym aparacie przy zastosowaniu dwóch próbek wzorcowych powyższą zależność można sprowadzić do postaci

$$\lambda = \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta x}{\Delta t} \right) \text{ próbki badanej} \left[ \left( \lambda \frac{\Delta t}{\Delta x} \right) \text{ próbki wzorcowej górnej} + \left( \lambda \frac{\Delta t}{\Delta x} \right) \text{ próbki wzorcowej dolnej} \right].$$

Całkowity czas pomiaru zależy od przewodności cieplnej badanego materiału i średniej temperatury pomiaru. Przy badaniach przewodności cieplnej próbek stalowych równowaga cieplna osiągana jest średnio po ok. 4 godzinach. Czas wykonywania odczytów w stanie ustalonym powinien wynosić ok. 2 godzin.

Na podstawie przeprowadzonej analizy określono dla aparatu zakres pomiaru przewodności cieplnej od 10 do 300 W/mK w zakresie temperatur od  $-15$  do  $100^{\circ}\text{C}$  przy temperaturze otoczenia około  $20^{\circ}\text{C}$ .

W przypadku zastosowania próbek wzorcowych z żelaza armco błąd pomiaru wynikający z występowania strat na bocznej powierzchni stosu w temperaturach zbliżonych do otoczenia oceniono na około 1%, natomiast w temperaturach ekstremalnych na około 5%. Wpływ termicznego oporu kontaktowego został zmniejszony do tego stopnia, że nie powodował trudności przy wykonywaniu

pomiarów. Natomiast okazało się, że szczególną uwagę należy zwrócić na dokładne wyznaczenie odległości między termoelementami.

Stosunkowo wysoka dokładność zastosowanych przyrządów pomiarowych pozwoliła zminimalizować błędy odczytów poszczególnych wielkości mierzonych. Całkowity maksymalny błąd pomiaru nie powinien przekroczyć 8%.

#### 4. WYNIKI BADAŃ

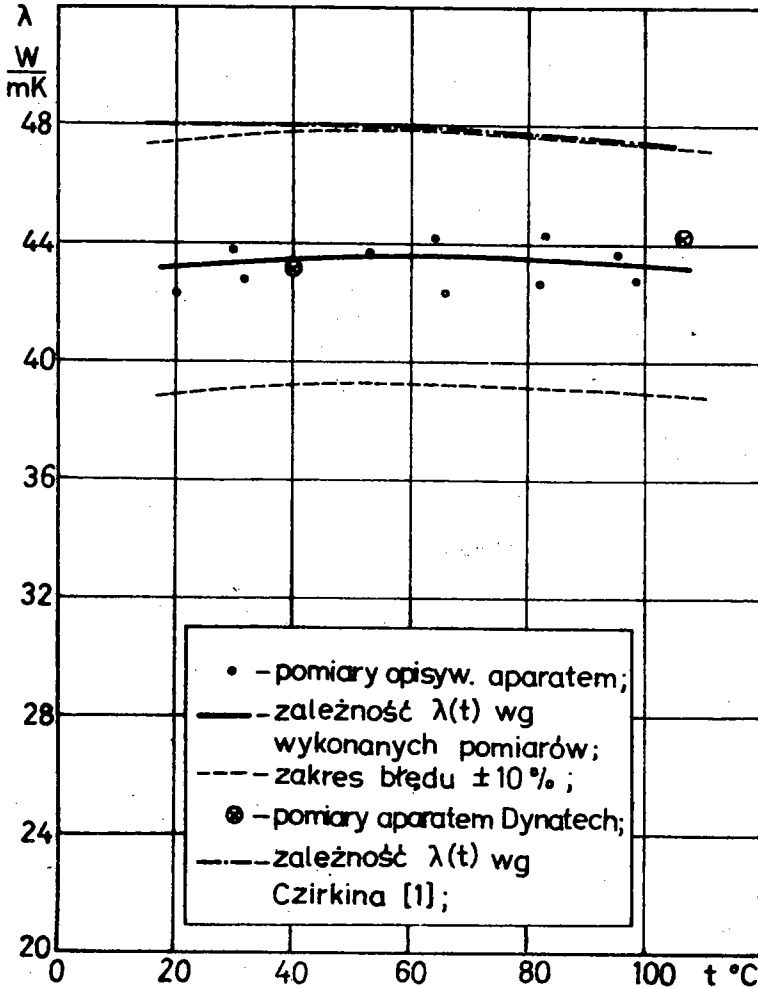
Analiza teoretyczna rozkładu temperatury w poszczególnych elementach aparatu była sprawdzana doświadczalnie. Między innymi dla kilku materiałów wykonano serie pomiarów przewodności cieplnej tej samej próbki w opracowanym aparacie i w aparacie Dynatech [3]. Uzyskano dobrą zgodność otrzymywanych wyników. Innym sposobem sprawdzenia prawidłowości działania aparatu było przeprowadzenie badania rozkładu temperatury w stosie pomiarowym złożonym z 3 próbek wykonanych z tego samego materiału, porównanie strumieni cieplnych przewodzonych przez każdą próbkę oraz wyznaczenie przewodności cieplnej dla poszczególnych próbek. Takie badania kontrolne przeprowadzono dla kilku materiałów ze szczególnym uwzględnieniem żelaza armco<sup>\*)</sup>, dla którego posiadano dużo danych dotyczących jego przewodności cieplnej. Przeprowadzone badania doświadczalne pozwoliły określić całkowity błąd pomiaru na nie przekraczający  $\pm 7\%$  oraz wykazały, że w rzeczywistym układzie straty boczne przy optymalnych wymiarach próbek i właściwie dobranej różnicy temperatur w stosie pomiarowym ( $5 \div 20^{\circ}\text{C}$ ) są nieco mniejsze niż wynikało to z rozważań teoretycznych.

Prawidłowość działania aparatu w stosunkowo szerokim zakresie mierzonych wartości  $\lambda$  sprawdzono wyznaczając przewodność cieplną kilku gatunków stali, stopów miedzi, kompozytów,

<sup>\*)</sup> Wg danych firmy Armco: - gęstość  $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$ ; zawartość domieszek - C - 0,03%, Mn - 0,04%, P - 0,01%, S - 0,025%, Cu - 0,15%, Si - ślady.

ceramiki alundowej a także innych ceramik o niskiej przewodności cieplnej (dla  $\lambda < 10 \text{ W/mK}$  pomiary mogą być wykonywane ale błędy pomiaru mogą być większe od podawanych powyżej).

Przykładowo na rys.4 podano wyniki badań przewodności cieplnej stali 45.



Rys.4. Wyniki pomiarów przewodności cieplnej stali 45

## 5. ZAKOŃCZENIE

Przeprowadzona analiza teoretyczna i badania doświadczalne pozwoliły opracować układ pomiarowy do wyznaczania przewodności cieplnej metali w temperaturach umiarkowanych o prostej konstrukcji oraz łatwym montażu przy wymianie próbki badanej a także uniknąć konieczności stosowania w nim bardziej skomplikowanej regulacji.

Aparat może być wykorzystywany, co prawda w dość wąskim zakresie temperatur, ale w dość znacznym zakresie mierzonych wartości przewodności cieplnej. Szczególną zaletą aparatu jest możliwość pomiaru większych przewodności cieplnych niż w aparacie Dynatech, oraz stosunkowo dobra dokładność uzyskiwanych wyników<sup>\*)</sup>.

Wydaje się natomiast, że nie byłoby właściwe stosowanie tego rodzaju układu pomiarowego do badań w temperaturach podwyższonych i niskich lub też do materiałów o małej przewodności cieplnej.

W zakończeniu autorzy wyrażają podziękowanie wszystkim pracownikom Pracowni Przewodzenia Ciepła Instytutu Techniki Ciepłej Politechniki Warszawskiej, a w szczególności p. A. Ubysz za wykonywanie pracochłonnych pomiarów i inż. J. Zagórskiemu za pomoc w wykonaniu aparatu.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] C z i r k i n W.S.: *Tiepłofiziczeskije swojstwa materialow jadiernej techniki*. Atomizdat, 1968.
- [2] C h a r ł a m o w A.G.: *Izmierienie tiepłoprowodnosti twiordych tieł*. Atomizdat, Moskwa 1973.

<sup>\*)</sup> Aparat ten może również służyć do badań rozpoznawczych przewodności cieplnej, w wyniku których możliwe byłoby ustalenie optymalnych wymiarów próbek do wyznaczania  $\lambda$  przy skomplikowanych i kosztownych badaniach w aparacie Dynatech.

- [3] G o g ó ł E., G o g ó ł W.: Układ pomiarowy do wyznaczenia przewodności cieplnej stali. Biul. Inf. Instytut. Techniki Ciepłej, Nr 46, 1977.
- [4] G o g ó ł W., G o g ó ł E., A r t e c k a E.: Badania przewodności cieplnej gruntów wilgotnych. Biul. Inf. Instytut. Techniki Ciepłej, Nr 40, Warszawa 1973.
- [5] L a u b i t z M.J.: Measurement of the Thermal Conductivity of Solids at High Temperature by Using Steady State Linear and Quasi Linear Heat Flow. Thermal Conductivity, Ed. R.P. Tye, Academic Press, London 1969.
- [6] M u s i a ł Z.: Technologia i własności poliuretanu. Chłodnictwo, Nr 2, 1976.
- [7] P r a t t A.W.: "Heat Transmission in Low Conductivity Materials Thermal Conductivity, Ed. R.P. Tye, Academic Press, London 1969.
- [8] S h e n k e r H., L a u r i t z e n J., C o r u c c i n i R., L o n b e r g e r S.: Reference Tables for Thermocouples. National Bureau of Standards, 1965.
- [9] S t u c k e s A.D., C h a s m a r R.P.: Measurement of the Thermal Conductivity of Semiconductors. Report of the Meeting on Semiconductors, Physical Society, London 1956.

U w a g a: Praca wykonana została częściowo w 1977 r. w ramach problemu węzłowego 05.12 01.4 pt.: "Wytrzymałość i optymalizacja konstrukcji maszynowych i budowlanych" - koordynowanego przez Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk.

## УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МЕТАЛЛОВ В УСЛОВИЯХ УМЕРЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР ПО СРАВНИТЕЛЬНОМУ МЕТОДУ

### К р а т к о е   с о д е р ж а н и е

В работе описывается конструкция и работа простого устройства, предназначенного для измерения теплопроводности металлов по методу сравнения в установившемся режиме.

Конструкция устройства основывается на результатах проведенного теоретического анализа распределения температур и тепловых потерь в экспериментальной установке.

Устройство предназначено для измерения теплопроводности твердых тел в границах от 10 Вт/мК до 300 Вт/мК в температурном диапазоне  $-15^{\circ}\text{C}$  -  $+100^{\circ}\text{C}$ .

**APPARATUS FOR MEASUREMENTS OF THERMAL  
CONDUCTIVITY OF METALS IN MODERATE TEMPERATURES  
BY THE COMPARISON METHOD**

S u m m a r y

The comparison method of measurements of thermal conductivity of metals in a steady state had been presented.

The design of the used simple apparatus had been based on previous theoretical analysis of temperature fields and calculations of heat losses in the experimental device.

The developed apparatus can be used for measurements of thermal conductivity in the range 10 W/mK-300 W/mK for temperatures in the range  $-15^{\circ}\text{C} \div 100^{\circ}\text{C}$ .

Rękopis dostarczono w grudniu 1977 r.