

mgr inż. Roman Domański  
mgr inż. Elżbieta Gogół  
doc. dr Wiesław Gogół  
Instytut Techniki Ciepłej

## POMIARY PRZEWODNOŚCI CIEPLNEJ STALI

### 1. Wstęp

W chwili obecnej brak jest jakichkolwiek danych dotyczących przewodności cieplnej i dyfuzyjności cieplnej metali produkowanych w kraju; korzystanie z zagranicznych danych literaturowych w większości przypadków nie jest w ogóle możliwe lub bardzo utrudnione, ponieważ na wartość przewodności cieplnej w silnym stopniu wpływa skład chemiczny stopu (nawet nieznaczne domieszki), obróbka termiczna a także technologia jego wykonania. Szczególnie dotkliwy jest brak danych dotyczących stopów, z których wykonywane są elementy pracujące w warunkach dużych naprężeń termicznych.

Z tego względu wydawało się konieczne podjęcie, w ramach prac prowadzonych w Pracowni Przewodzenia Ciepła ITC z zakresu metodyki wyznaczania właściwości cieplnych ciał stałych, badań rozpoznawczych dotyczących pomiarów przewodności cieplnej stali stopowych.

Celem pracy - przedstawionej w formie krótkiego komunikatu - była ocena przydatności kilku najczęściej stosowanych metod pomiaru przewodności cieplnej metali w przypadku zastosowania ich do określonego gatunku stali stopowej oraz wyznaczenie zależności przewodności cieplnej tej stali od temperatury.

Jako badany gatunek stali wybrano stal narzędziową stopową NC6. Pomiarów przeprowadzono w zakresie temperatur  $20 \pm 400^{\circ}\text{C}$ .

Zastosowane zostały 4 metody; dwie z nich oparte były na metodzie Donaldsona i polegały na pomiarach w stanie ustalonym, przy osiowym przewodzeniu ciepła przez próbkę o kształcie pręta; trzecia metoda była metodą czysto porównawczą i polegała na wyznaczeniu rozkładu temperatury w próbce badanej i wzorcowej o kształcie cienkiego pręta walcowego ochładzanych w warunkach konwekcji w powietrzu; w czwartej zespołowej metodzie opartej na teorii stanu uporządkowanego przeprowadzono dwa oddzielne pomiary w termostacie powietrznym i wodnym przy użyciu tej samej próbki badanego materiału; metodą tą zmierzono właściwości cieplne próbki ( $\lambda$ ,  $c$ ) w temperaturze  $20^{\circ}\text{C}$ .

Przeprowadzenie tych badań wymagało zbudowania w Instytucie Techniki Ciepłej stanowisk doświadczalnych, które w trakcie pracy ulegały licznym przeróbkom i modyfikacjom konstrukcyjnym.

Uśrednienie wyników pomiarów otrzymanych wszystkimi 4 metodami pozwoliło wyznaczyć z zadowalającą dokładnością zależność  $\lambda(t)$  badanego gatunku stali.

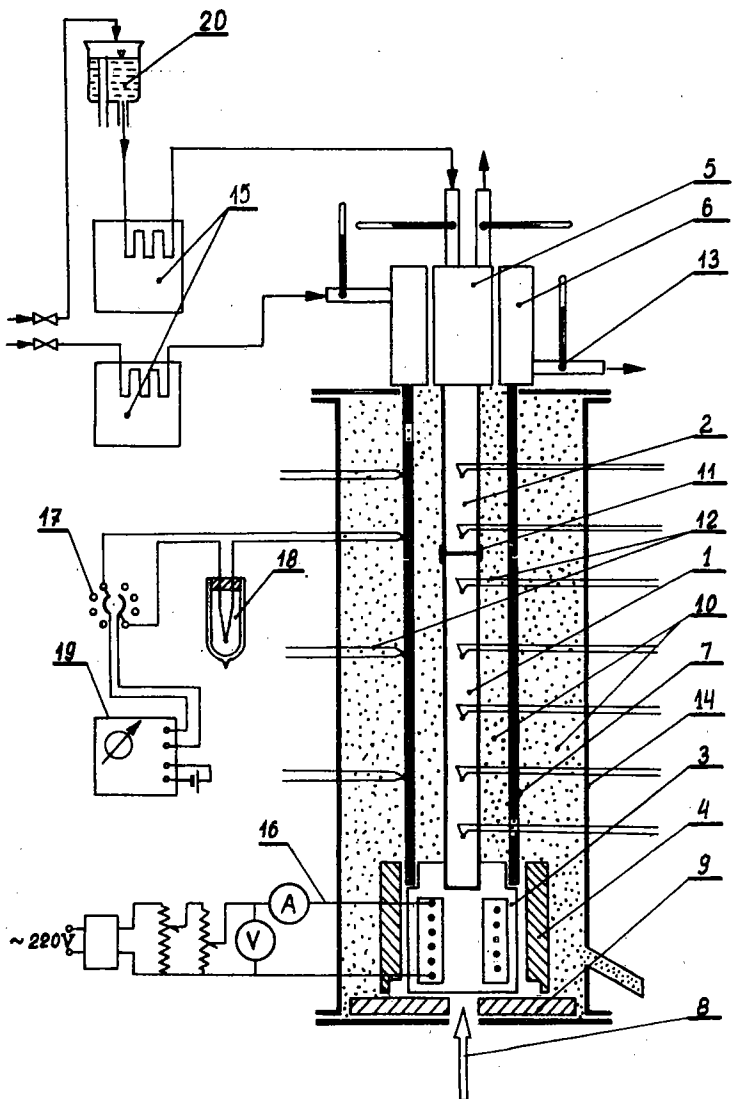
Przeprowadzenie serii pomiarów oraz porównanie wyników umożliwiło ocenę wad i zalet oraz zakresu stosowalności i dokładności poszczególnych metod, a także wykazało konieczność wprowadzenia zmian w konstrukcji aparatów.

Przedstawiona praca została wykonana w ramach współpracy z Instytutem Przemysłu Organicznego.

## 2. Pomiar przewodności cieplnej metodą Donaldsona

Przewodność cieplna badanego materiału mierzona była metodą prętową w stanie ustalonym. Schemat aparatu pokazano na rys.1. Próbka badana miała średnicę  $\varnothing$  20 mm i długość 300 mm. Temperatury mierzone były w pięciu punktach próbki badanej i w dwóch punktach próbki porównawczej.

Pomiaru temperatury dokonywano termoelementami miedź-konstantan (w zakresie niskich temperatur) oraz termoelementami Ni-NiCr (w zakresie wyższych temperatur) o średnicy  $\varnothing$  0,10 mm i kompensatorem firmy Metra z zewnętrznym galwanometrem lusterkowym o czułości  $20,5 \div 56 \cdot 10^{-9}$  A/dz i oporze wewnętrznym



Rys.1. Schemat stanowiska do pomiaru przewodności cieplnej metodą Donaldsona: 1 - próbka badana, 2 - próbka wzorcowa, 3 - grzejnik elektryczny, 4 - tuleja mosiężna, 5 - chłodnica wewnętrzna, 6 - chłodnica zewnętrzna, 7 - dwuczęściowy pierścień ochronny, 8 - układ sprężynowy do wywierania stałego nacisku, 9 - izolacja cieplna, 10 - sypka izolacja cieplna, 11 - cienka tuleja stalowa, 12 - termoelementy, 13 - termometry, 14 - obudowa aparatu, 15 - ultratermostaty, 16 - układ zasilania grzejnika, 17 - przełącznik wielopunktowy, 18 - termostat, 19 - kompensator, 20 - układ przelewowowy

21Ω. Termoelementy cechowane były w zakresie od 0 ÷ 100°C według termometrów wzorcowych w ultratermostacie UT-12.

W zakresie temperatur do 500°C w specjalnym urządzeniu (wykonanym w Pracowni Przewodzenia Ciepła) do cechowania termoelementów w temperaturach podwyższonych na podstawie wskazań termoelementu Pt-PtRh wzorcowanego w Centralnym Urzędzie Jakości i Miar.

Spoiny termoelementów były umieszczone w otworach o średnicy  $\varnothing$  1,0 mm wykonanych w próbce badanej i porównawczej.

Moc grzejnika mierzona była woltomierzem i amperomierzem elektrodynamicznym firmy Metra klasy 0,2.

Temperaturę wody chłodzącej mierzono termometrami rtęciowymi. Wydatek wody wyznaczany był przez pomiar ilości wody wypływającej z chłodnic w określonym czasie mierzonym stoperem. W celu uzyskania stałego wydatku chłodnica wewnętrzna zasilana była z układu z przelewem umieszczonym na określonej wysokości. Temperatura wody wpływającej do chłodnic była ustalana w ultratermostatach.

Średnie temperatury chłodnicy wewnętrznej i zewnętrznej w czasie trwania pomiaru powinny być równe; regulacja średniej temperatury była dokonywana przez zmianę wydatku wody chłodzącej lub temperatury w ultratermostacie.

Założenie próbki i montaż aparatu były dość skomplikowane; próbki i pierścień ochronny ściskane były w czasie pomiaru przez układ sprężyn talerzowych (nie pokazanych na rys.1).

Próbka badana i porównawcza połączone były za pomocą cienkiej tulei stalowej, która zapewniała ustawienie próbek w osi symetrii układu oraz zmniejszała między nimi wpływ termicznego oporu kontaktowego.

Cały aparat był izolowany ziemią okrzemkową firmy Merck o granulacji ziaren  $\varnothing$  0,2 ÷ 0,3 mm. Izolacja zewnętrzna nie wpływała w istotny sposób na wyniki pomiarów.

Podczas pomiarów dążono do uzyskania takich rozkładów temperatury w próbce badanej i w pierścieniu ochronnym aby różnice temperatur w tej samej odległości od grzejnika były jak najmniejsze. Właściwy rozkład temperatury w pierścieniu ochronnym osiągnięto dla badanej próbki przez zastosowanie dodatkowej tulei mosiężnej otaczającej część grzejnika i pierścienia.

Przy odpowiednim kształcie, wielkości i ułożeniu tulei udało się wystarczająco zmniejszyć różnicę temperatur między próbką i pierścieniem.

Stan równowagi osiągnano po czasie około 12 godzin a całkowity czas pomiaru wynosił  $16 \div 18$  godzin.

W czasie pomiaru wykreślano krzywe rozkładu temperatury  $t(x, r)$  w badanej próbce, pręcie wzorcowym i pierścieniu ochronnym, kontrolując w ten sposób osiągnięcie stanu równowagi cieplnej i wpływ zakłóceń cieplnych.

Przewodność cieplną obliczano z ilości ciepła  $Q$  pobieranego przez chłodnicę wewnętrzną i różnicy temperatur  $\Delta t$  między termoelementami (np. skrajnymi) umieszczonymi w próbce na podstawie zależności

$$\lambda = \frac{Q \delta}{\Delta t F}. \quad (1)$$

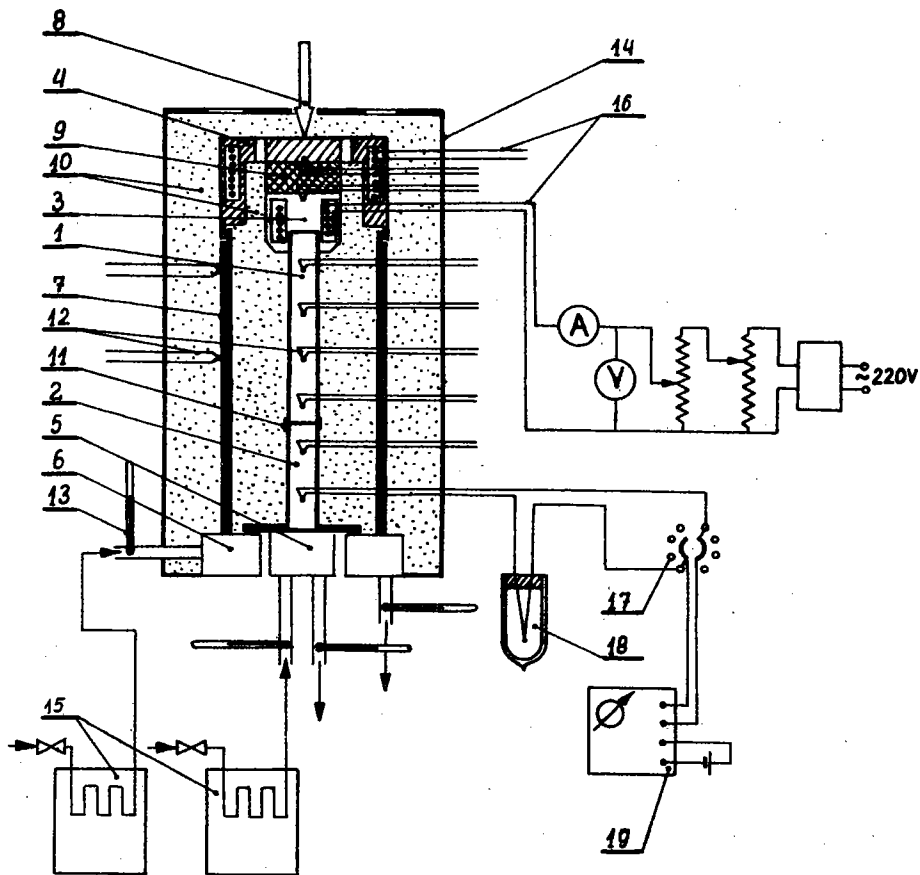
Średnia temperatura pomiaru określana była jako średnia arytmetyczna z wartości temperatur mierzonych skrajnymi termoelementami.

Całkowity spadek temperatury w badanej próbce mógł wynosić do  $300^{\circ}\text{C}$  zależnie od warunków pomiaru; wobec tego można było również wyznaczać wartości przewodności cieplnej  $\lambda$  dla poszczególnych odcinków badanego pręta między kolejnymi termoelementami.

Za pomocą opisanego aparatu można określać  $\lambda$  w sposób porównawczy wykorzystując wskazania termoelementów umieszczonych w próbce wzorcowej (porównawczej). Można także wykorzystywać aparat (bez stosowania pomiaru kalorymetrycznego) do wyznaczania względnej zmienności przewodności cieplnej z temperaturą z samego wykresu  $t = f(x)$  w stanie równowagi cieplnej.

### 3. Pomiar przewodności cieplnej zmodyfikowaną metodą Donaldsona (Fridmana)

Podobnie jak w aparacie opisanym w poprzednim rozdziale przewodność cieplną mierzono metodą prętową w stanie ustalonym.



Rys.2. Schemat stanowiska do pomiaru przewodności cieplnej zmodyfikowaną metodą Donaldsona: 1 - próbka badana, 2 - próbka wzorcowa, 3 - grzejnik wewnętrzny, 4 - grzejnik zewnętrzny, 5 - chłodnica wewnętrzna, 6 - chłodnica zewnętrzna, 7 - pierścień ochronny, 8 - dźwigniowy układ do wywierania stałego nacisku, 9 - przekładka ceramiczna, 10 - sypka izolacja cieplna, 11 - cienka tulejka stalowa, 12 - termoelementy, 13 - termometry, 14 - obudowa aparatu, 15 - ultratermostaty, 16 - układ zasilania grzejników, 17 - przełącznik wielopunktowy, 18 - termostat, 19 - kompensator

Aparat zmodyfikowano przez zastosowanie dwóch niezależnych grzejników, zewnętrznego służącego do ogrzewania pierścienia ochronnego i wewnętrznego do ogrzewania badanego pręta (rys. 2). Grzejniki były odizolowane cieplnie a ich temperatury mierzono za pomocą termoelementów. Dzięki takiej konstrukcji grzejników można było niezależnie regulować ich moc i przez minimalizowanie różnicy temperatur na ich powierzchniach za-

pewnie jednokierunkowy przepływ ciepła z grzejnika wewnętrznego, przez próbkę badaną i wzorcową do chłodnicy wewnętrznej.

Wymiary aparatu zmniejszono; badana próbka miała średnicę  $\emptyset$  15 mm a długość 82 mm. Temperatury mierzono w czterech punktach pręta badanego i w dwóch punktach pręta wzorcowego, przez umieszczenie termoelementów w otworach o średnicy  $\emptyset$  0,8 mm.

Wszystkie uwagi dotyczące termoelementów, ich cechowania, pomiaru mocy grzejników, pomiaru wydatku i temperatury wody chłodzącej, izolacji itd. podane w poprzednim rozdziale odnoszą się również do tej metody.

Próbka dociskana była do pręta wzorcowego za pomocą układu dźwigniowego nie pokazanego na rys.2.

Stan równowagi osiągnano średnio po czasie około 6 godzin. Całkowity czas pomiaru wynosił  $8 \div 9$  godzin.

W czasie pomiaru wykreślano krzywe rozkładu temperatury  $t(x, \tau)$  dla próbki badanej, wzorcowej, pierścienia ochronnego i grzejników. Przewodność cieplną określano podobnie jak poprzednio z ilości ciepła odbieranego przez chłodnicę wewnętrzną i różnicy temperatur  $\Delta t$  między skrajnymi termoelementami, zgodnie ze wzorem (1).

Temperaturę średnią pomiaru określano jako średnią arytmetyczną ze wskazań skrajnych termoelementów.

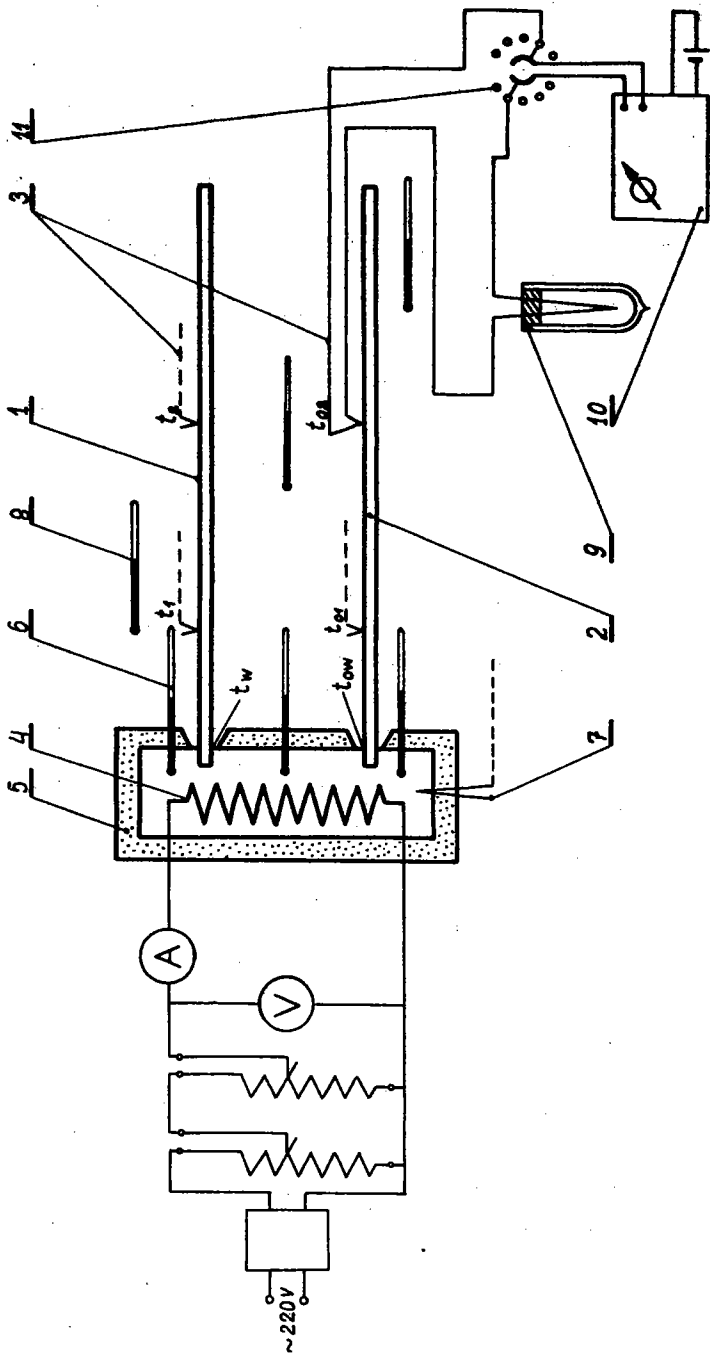
Podobnie jak w układzie poprzednim można było także określać przewodność cieplną metodą porównawczą.

#### 4. Pomiar przewodności cieplnej metodą porównawczą dwóch prętów ochładzanych konwekcyjnie w powietrzu

Przewodność cieplna próbki ze stali NC6 o wymiarach  $\emptyset$  5x200 mm mierzona była metodą porównawczą opartą na rozkładzie temperatury w stanie ustalonym w żebrze prętowym o przekroju kołowym półograniczonym i o skończonej długości.

Schemat aparatu przedstawiono na rys.3.

Próbka porównawcza wykonana była ze stali 45, dla której przewodność cieplną  $\lambda(t)$  w zakresie  $0 \div 400^{\circ}\text{C}$  przyjęto jako średnią z wartości podawanych w literaturze [1, 2, 3, 7].



Rys. 5. Schemat stanowiska do pomiaru przewodności cieplnej metodą porównawczą: 1 - próbka badana, 2 - próbka wzorcowa, 3 - termoelementy do pomiaru temperatury pręta badanego i wzorcowego, 4 - grzejnik elektryczny, 5 - izolacja cieplna, 6 - termometry do pomiaru temperatury grzejnika, 7 - termoelement Ni-NiCr do pomiaru temperatury grzejnika, 8 - termometry do pomiaru temperatury powietrza otaczającego, 9 - termostat, 10 - kompensator, 11 - przełącznik wielopunktowy



Próbka wzorcowa miała taki sam kształt, wymiary i stan powierzchni (chromowana i polerowana) jak próbka badana.

Obie próbki wkręcane były w blok grzejnika wykonany z aluminium na głębokość 10 mm. Pomiary odbywały się przy kolejnych zmianach położenia próbek w otworach grzejnika w celu wyeliminowania ewentualnego wpływu różnic termicznego oporu kontaktowego na połączeniu gwintowym. Grzejnik elektryczny wykonany z kanthalu zasilany był stabilizowanym prądem zmiennym; regulacja napięcia odbywała się za pomocą kaskadowego układu autotransformatorów. Powierzchnia zewnętrzna grzejnika izolowana była warstwą azbestu i kilkoma warstwami cienkiej folii aluminiowej o małej emisyjności, wskutek czego możliwe było znaczne zmniejszenie lub prawie całkowite wyeliminowanie (przy emisyjności próbek ok. 0,1) wpływu promieniowania od grzejnika.

Pomiary odbywały się w warunkach konwekcji swobodnej i wymuszonej w powietrzu. W przypadku wymuszonego przepływu powietrza (o małej prędkości) wywołanego działaniem wentylatorów stałość prędkości powietrza kontrolowana była katatermometrami. Temperaturę otaczającego powietrza w pobliżu próbek mierzono (sondowano) termometrami rtęciowymi.

Temperatura grzejnika była mierzona termoelementem Ni-NiCr oraz termometrami rtęciowymi do 360°C w trzech miejscach (wyównanie temperatury w grzejniku było zupełnie poprawne).

Pomiar temperatury obu próbek wykonany był dwoma sposobami:

a) przy użyciu termokolorów (trwałych i odwracalnych); wzdłuż części pręta malowano termokolorom cienki pasek o szerokości ok. 1 mm i mierzono odległości od powierzchni grzejnika do miejsc odpowiadających zmianie barwy w stanie równowagi cieplnej ( $x_0$  i  $x$ ).

Przewodność cieplną próbki badanej  $\lambda$  obliczano ze wzoru

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = \left( \frac{x_0}{x} \right)^2 \quad (2)$$

otrzymanego z rozkładu temperatury w przecie półograniczonym przy założeniu stałości i równości współczynnika  $\alpha$  dla próbki badanej i wzorcowej.

b) za pomocą termoelementów (rys.3) miedź-konstantan lub Ni-NiCr o średnicy  $\varnothing 0,1$  mm; w próbce wiercono otworki  $\varnothing 0,5$  mm na głębokość 0,6 mm, w których lutowane były spoiny termoelementów. Druty termoelementów wyprowadzano stycznie do powierzchni walcowej pręta na długości  $1/3$  jego obwodu. Prawdliwość wyznaczenia temperatury pręta za pomocą termoelementów sprawdzana była specjalnymi dodatkowymi pomiarami.

W zastosowanej metodzie pomiaru przewodności cieplnej metali przy założeniu stałości współczynnika przejmowania ciepła wzdłuż długości pręta dla obu próbek i niezależności  $\lambda$  od temperatury (w pewnym wybranym zakresie temperatur) można określić stosunek przewodności cieplnej próbki badanej  $\lambda$  i wzorcowej  $\lambda_0$  z zależności:

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = \left\{ \frac{\ln \left[ \frac{\vartheta_{ow} + \vartheta_{02}}{2\vartheta_{01}} + \sqrt{\left( \frac{\vartheta_{ow} + \vartheta_{02}}{2\vartheta_{01}} \right)^2 - 1} \right]}{\ln \left[ \frac{\vartheta_w + \vartheta_2}{2\vartheta_1} + \sqrt{\left( \frac{\vartheta_w + \vartheta_2}{2\vartheta_1} \right)^2 - 1} \right]} \right\}^2, \quad (3)$$

gdzie  $\vartheta$  jest różnicą temperatur między temperaturą mierzona  $t$  w danym punkcie pręta wzorcowego i badanego (oznaczenia odpowiednich temperatur na rys.3) a temperaturą otoczenia  $t_f$  lub bezpośrednio z rozkładu temperatury w pręcie o skończonej długości

$$\frac{t - t_f}{t_w - t_f} = \frac{\cosh \left[ \sqrt{\frac{\alpha P}{\lambda F}} (L - x) \right]}{\cosh \left[ \sqrt{\frac{\alpha P}{\lambda F}} L \right]}. \quad (4)$$

Do opracowania wyników pomiarów zastosowano bardziej dokładne metody obliczeń uwzględniające wpływ zmienności  $\alpha$  wzdłuż długości pręta w danym zakresie temperatur oraz zmienność przewodności cieplnej z temperaturą.

Dla przeprowadzonej serii 14 pomiarów w różnych zakresach temperatur wykonano obliczenia posługując się wzorem (4); otrzymane wyniki oznaczono "metoda obliczeń I".

W drugim sposobie obliczeń dzieląc pręt na pewną skończoną liczbę odcinków (10 lub 20) można z układu równań różnicow-

wych dla próbki wzorcowej o znanej zależności  $\lambda(t)$  wyznaczyć lokalne wartości współczynnika przejmowania ciepła (i porównać je z wartościami obliczonymi na drodze teoretycznej z zależności  $Nu = f(GrPr)$  dla konwekcji swobodnej z uwzględnieniem wpływu promieniowania). Rozwiązując metodą kolejnych przybliżeń układ równań różnicowych dla próbki badanej, można otrzymać poszukiwaną zależność  $\lambda(t)$ . Tego rodzaju obliczenia wykonano dla kilku wybranych pomiarów. Uzyskano w ten sposób znacznie większą niż za pomocą wzoru (3) lub (4) dokładność wyznaczenia zależności przewodności cieplnej od temperatury. Wyniki obliczeń oznaczono "metoda obliczeń II".

### 5. Pomiar przewodności cieplnej metodą $\psi$

Metoda  $\psi$  jest metodą zespołową opartą na teorii stanu uporządkowanego i polega na przeprowadzeniu dwóch odrębnych pomiarów przy użyciu tej samej próbki badanego materiału. Podstawą metody jest możliwość zrealizowania dla metali założenia  $\psi = 1$  (liczba  $\psi$  charakteryzuje nierównomierność pola temperatury w ciele). Powyższe założenie może być spełnione dość dokładnie w przypadku ochładzania próbki w termostacie powietrznym w warunkach konwekcji swobodnej przy małym współczynniku  $\alpha$  [5, 6].

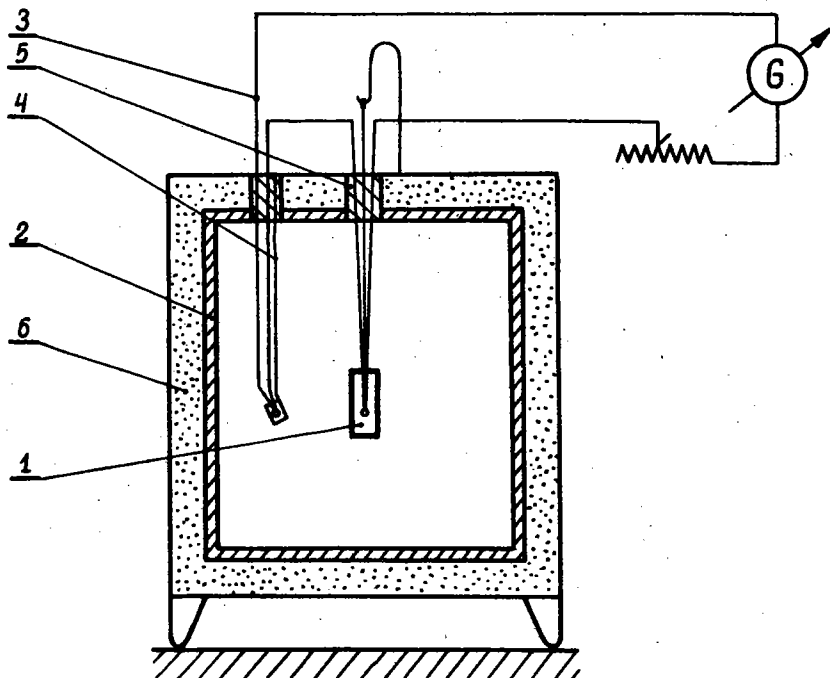
Dla badanej próbki stali liczba  $\psi$  była równa 0,9995. Schemat termostatu powietrznego przedstawiono na rys. 4. Ścianki termostatu wykonane były z alupolu o grubości 10 mm. Powierzchnia wewnętrzna termostatu wynosiła  $3,22 \text{ m}^2$  a jego pojemność cieplna  $C = 68,7 \text{ kJ/K}$ . Temperatury ścianek termostatu były mierzone 4, a temperatura powietrza 3. termoelementami (nie pokazanymi na rys.4).

Przed pomiarem badana próbka o wymiarach  $\emptyset 38 \times 100 \text{ mm}$  była ogrzewana (lub ochładzana) o kilka  $^{\circ}\text{C}$  powyżej temperatury termostatu; temperatura termostatu w czasie pomiaru wynosiła  $21 \div 22^{\circ}\text{C}$ .

W przeprowadzanych badaniach wyznaczano współczynnik przejmowania ciepła  $\alpha$  oraz tempo chłodzenia

$$m = - \frac{\partial \psi}{\partial \tau} \cdot \psi \quad (5)$$

Różnica temperatur  $\psi$  między próbką badaną a otaczającym powietrzem w termostacie mierzona była termoelementem różni-



Rys.4. Schemat termostatu powietrznego: 1 - próbka badana, 2 - zbiornik spawany z alupolu, 3 - termoelement różnicowy do mierzenia tempa chłodzenia, 4 - pręt z ekranem chroniącym wolny koniec termoelementu, 5 - warstwa gąbki tłumiąca ewentualne wahania ciała, 6 - izolacja cieplna

cowym miedź-konstantan ( $\varnothing 0,1 \text{ mm}$ ) oraz galwanometrem lusterkowym o czułości  $33 \cdot 10^{-9} \text{ A/działkę}$  i oporze wewnętrznym  $27 \Omega$ . Czas mierzono stoperem.

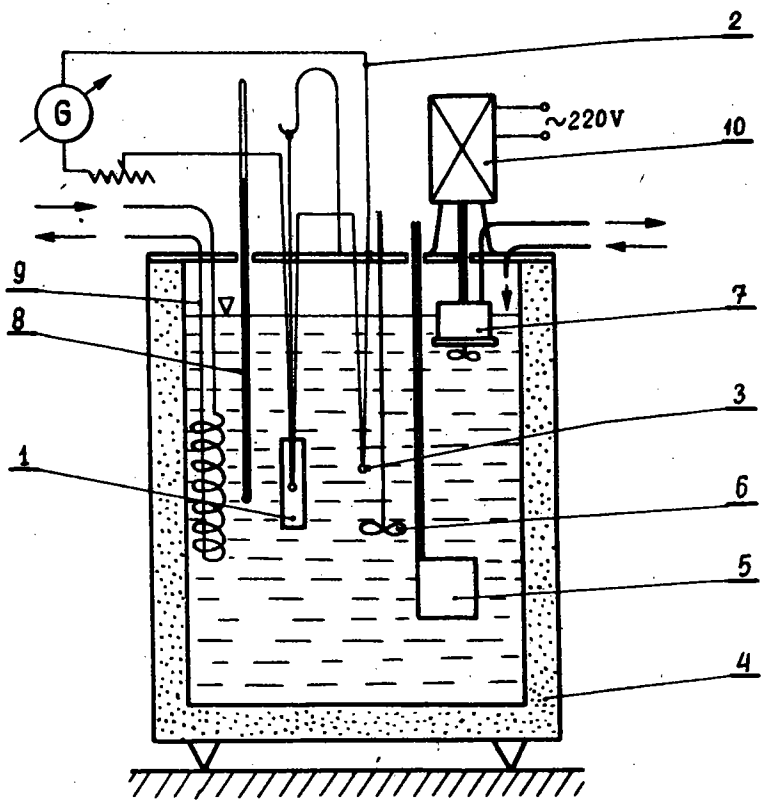
Współczynnik  $\alpha$  określano przez osobny pomiar tempa chłodzenia kalorymetru -  $\alpha$  wykonanego z miedzi o znanych właściwościach cieplnych, tych samych wymiarach, kształcie i stanie powierzchni, co badana próbka ze stali.

Wartość  $\alpha$  obliczano ze wzoru

$$\alpha = \frac{m}{\psi} \frac{C}{S} . \quad (6)$$

Wykonano serię pomiarów tempa chłodzenia na przemian kalorymetru -  $\alpha$  i próbki badanej. Czas jednego pomiaru wynosił około 5 godzin.

Drugi pomiar w metodzie  $\psi$  polegał na intensywnym ochładzaniu w termostacie wodnym w warunkach konwekcji wymuszonej



Rys.5. Schemat termostatu wodnego: 1 - próbka badana, 2 - termoelement różnicowy do mierzenia tempa chłodzenia, 3 - wolny koniec termoelementu, 4 - zbiornik termostatu z izolacją cieplną, 5 - grzejnik elektryczny, 6 - mieszadło, 7 - pompa, 8 - termometr kontrolny, 9 - węzownica wody chłodzącej, 10 - silnik elektryczny

próbki badanej i próbki wzorcowej (kalorymetr -  $\alpha$ ) i pomiarze tempa chłodzenia obu ciał.

Schemat termostatu wodnego przedstawiono na rys.5.

Z pomiaru tempa chłodzenia kalorymetru -  $\alpha$  przeprowadzanego identycznie jak w pomiarze poprzednim można znaleźć wartość liczby podobieństwa

$$M = \frac{m K}{a} . \quad (7)$$

Odczytując z tablic [8] dla otrzymanej liczby  $M$  wartość liczby

$$H = \frac{\alpha}{\lambda} \frac{K S}{V}, \quad (8)$$

obliczano współczynnik przejmowania ciepła  $\alpha$ .

Z pomiaru tempa chłodzenia badanej próbki stalowej wyznaczano liczbę podobieństwa  $\psi$  z zależności

$$\psi = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \frac{m_2}{m_1}, \quad (9)$$

gdzie:

$\alpha_1$  i  $m_1$  odnoszą się do pomiarów w termostacie powietrznym,

$\alpha_2$  i  $m_2$  odnoszą się do pomiarów w termostacie wodnym.

Znajdując z tablic [8] liczbę podobieństwa  $H$ , ze wzoru (8) obliczano poszukiwaną wartość przewodności cieplnej  $\lambda$  badanej próbki.

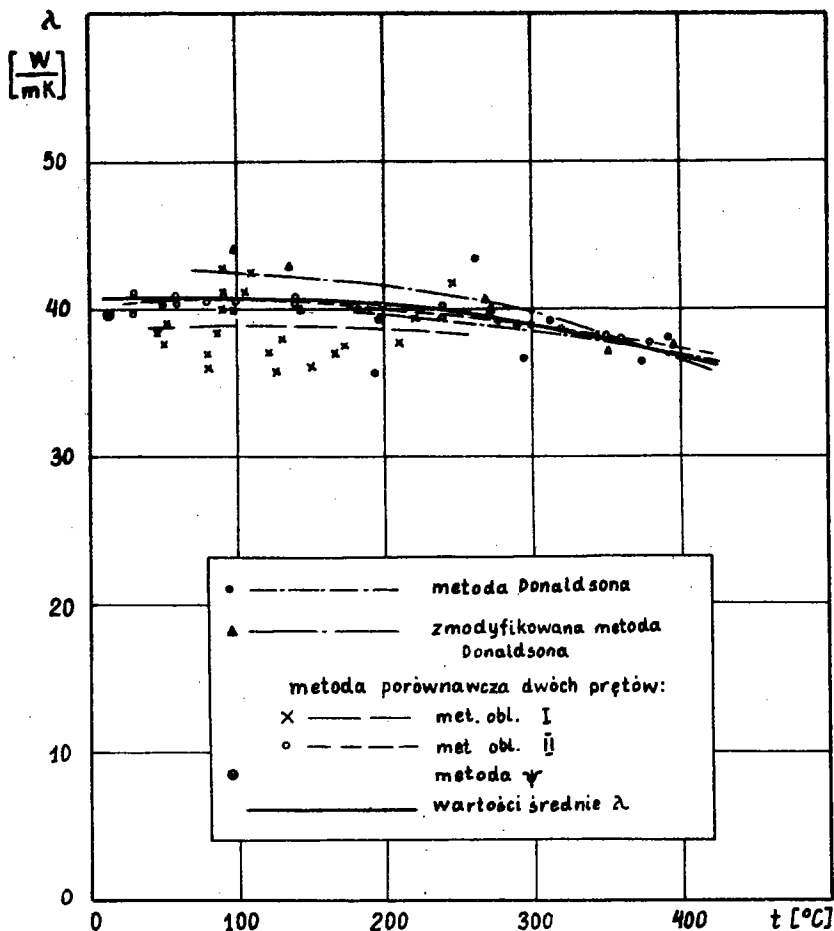
Pomiary w termostacie wodnym przeprowadzono w temperaturze  $12^\circ\text{C}$ . Czas jednego pomiaru wynosił około 1 min.

## 6. Wyniki badań

Wyniki pomiarów przewodności cieplnej wszystkimi metodami przedstawiono w formie wykresu  $\lambda(t)$  na rys.6. Pokazano przykładowy rozrzut punktów pomiarowych i wartości średnie przewodności cieplnej dla każdej metody.

Wartości błędów systematycznych obliczone teoretycznie są najczęściej mniejsze od rzeczywistych błędów systematycznych, które mogły być oszacowane przez zastosowanie w przeprowadzonych badaniach kilku metod pomiarowych. Błędy systematyczne i przypadkowe pomiarów wykonanych aparatami opartymi na metodzie Donaldsona, zmodyfikowanej metodzie Donaldsona i metodzie porównawczej dwóch prętów ochładzanych konwekcyjnie w powietrzu, rosną w miarę zmniejszania się gradientów temperatury (to znaczy przy średniej temperaturze pomiaru bliskiej tempe-

raturze otoczenia); między innymi dlatego wykonano dodatkowy pomiar metodą  $\psi$ .



Rys.6. Zależność przewodności cieplnej stali NC6 od temperatury, otrzymana na podstawie wyników pomiarów czterema metodami (linie przerywane - wartości średnie  $\lambda(t)$  dla poszczególnych metod; linia ciągła - wartości średnie  $\lambda(t)$  dla wszystkich metod)

Wartość uśrednioną przewodności cieplnej badanego gatunku stali w zależności od temperatury na podstawie wszystkich pomiarów przedstawiono również na rys.6; przy jej wyznaczeniu uwzględniono dokładność wyników otrzymanych różnymi metodami w różnych zakresach temperatur. Całkowity błąd wartości średniej nie powinien przekraczać  $\pm 9\%$ .

Powtarzalność wyników dla tej samej próbki przy jednym założeniu próbki do aparatu i zamocowaniu termoelementów była dobra we wszystkich metodach. Oczywiście taka powtarzalność wyników nie mogła być podstawą do oceny dokładności danej metody, ponieważ błędy przypadkowe wzrastały przy zmianie próbek, zmianie zamocowania termoelementów, ponownym założeniu próbki itp. Szczególnie niekorzystną rolę pod tym względem odgrywały w metodzie Donaldsona zmiany termicznego oporu kontaktowego między poszczególnymi elementami układu pomiarowego wywołane nie tylko przez montaż i demontaż aparatu, ale również przez odkształcenia części składowych aparatu na skutek występujących w nich naprężeń termicznych.

Znaczna długotrwałość pomiaru w metodzie Donaldsona przy dużej wielkości aparatu była poważną niedogodnością; jakkolwiek modyfikacja tej metody. (rozd.3) pozwoliła zmniejszyć wymiary aparatu, to jednak całkowity czas pojedynczego pomiaru rzędu 9 godzin wydaje się ciągle jeszcze zbyt długi. Również wadą tych metod był dość skomplikowany i długotrwały montaż aparatu przy zmianie próbki.

Względnie krótkotrwały pomiar w porównawczej metodzie prętowej wymagał jednakże - w celu uzyskania większej dokładności wyników - stosowania do obliczeń bardzo pracochłonnej metody kolejnych przybliżeń.

Najdokładniejszą i najwygodniejszą okazała się metoda  $\psi$ ; jednakże zastosowanie jej w wyższych temperaturach związane byłoby ze znacznymi trudnościami wynikającymi z konieczności ochładzania próbek w ciekłych metalach w termostatach o znacznej pojemności cieplnej.

Przedstawione badania miały charakter studyjny; zastosowane metody Donaldsona i metoda porównawcza dwóch prętów oraz zbudowane aparaty nie mogą być zdaniem autorów uważane w pełni za zadawalające.

Przeprowadzone badania wykazały, że stosowanie pojedynczej metody (i jednej aparatury) do wyznaczania przewodności cieplnej określonego rodzaju stopu metalowego nie jest celowe i może okazać się niepewne; właściwe wydaje się stosowanie badań krzyżowych różnymi metodami.



## WYKAZ OZNACZEŃ

- a - dyfuzyjność cieplna  
 c - ciepło właściwe  
 C - pojemność cieplna  
 F - pole przekroju  
 H - liczba podobieństwa  
 K - współczynnik kształtu  
 L - długość  
 M - liczba podobieństwa  
 m - tempo chłodzenia  
 P - obwód  
 Q - ilość ciepła  
 S - powierzchnia  
 t - temperatura  
 $t_f$  - temperatura ośrodka  
 $t_w$  - temperatura podstawy żebra  
 V - objętość  
 x - współrzędna  
 $\alpha$  - współczynnik przejmowania ciepła  
 $\delta$  - odległość między punktami odpowiadającymi różnicy temperatur  $\Delta t$   
 $\vartheta = t - t_f$  różnica temperatur  
 $\lambda$  - przewodność cieplna  
 $\psi$  - liczba podobieństwa  
 $\tau$  - czas  
 indeks o - odnosi się do próbki wzorcowej

## BIBLIOGRAFIA

- [1] C z i r k i n W.S.: Tęplotępowodność przemysłennych matieriałów. Maszgiz, Moskwa 1957.  
 [2] C z i r k i n W.S.: Tęplotępowodność przemysłennych matieriałów. Maszgiz, Moskwa 1962.  
 [3] C z i r k i n W.S.: Tęplotęfizyczneskije swojstwa matieriałów ja-  
 diernoj techniki. Atomizdat, 1968.

- [4] C z u d n o w s k i j A.F.: Tęplofizyczne charakterystyki dispersyjnych materiałów. GIFML, Moskwa 1962.
- [5] G o g ó ł W.: Teoria stanu uporządkowanego i możliwości jej zastosowania. Mechanika teoretyczna i stosowana, z.1. Warszawa 1966.
- [6] G o g ó ł W.: Uogólniona metoda wyznaczania własności cieplnych ciał stałych na podstawie teorii stanu uporządkowanego. Archiwum Budowy Maszyn, z.2. Warszawa 1961.
- [7] G o l d s m i t h A., W a t e r m a n E., H i r s c h o r n M.: Handbook of thermophysical properties of solids materials. Macmillan Company. New York 1961.
- [8] K o n d r a t j e w G.M.: Tęplowyje izmierenija. Maszgiz. Moskwa 1957.
- [9] R a ż n j e w i ć K.: Tablice cieplne z wykresami. WNT. Warszawa 1966.
- [10] S t a n i s z e w s k i B.: Wymiana ciepła - podstawy teoretyczne. PWN. Warszawa 1963.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ СТАЛИ

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

Представлено применение четырёх методов измерения коэффициента теплопроводности стали в пределе температур от 20 до 400°C (293 ÷ 673 K):

- Дональдсона,
- модифицированный Дональдсона,
- сравнительный двух стержней охлаждаемых в воздухе,
- $\psi$ , основанный на теории регулярного теплового режима.

Описано экспериментальные установки для определения теплопроводности. Указано результаты измерений и рассмотрено применимость представленных методов.

## MEASUREMENTS OF THE THERMAL CONDUCTIVITY OF STEEL

## S u m m a r y

The application has been presented in this work, of four methods for the measurement of steel thermal conductivity within the temperature range of  $20 \div 400^{\circ}\text{C}$  ( $293 \div 673 \text{ K}$ ): of the Donaldson method, the modified Donaldson method, the comparative method involving two bars subjected to convection in the air, and of the  $\psi$  method based on the theory of the thermal regular regime.

A description has been included herein, of equipment developed for the determination of the thermal conductivity. The results of the measurements have been quoted, and the applicability of the methods involved has been discussed.

Rękopis dostarczono we wrześniu 1972 r.