

mgr inż. Elżbieta Gogół
doc. dr Wiesław Gogół

Instytut Techniki Ciepłej
Politechniki Warszawskiej

UKŁAD POMIAROWY DO WYZNACZANIA PRZEWODNOŚCI CIEPLNEJ STALI

W pracy przedstawiono zasadę działania i opis budowy układu do pomiaru przewodności cieplnej ciał stałych składającego się z aparatu firmy Dynatech Corp., układu do regulacji ciśnienia wody chłodzącej, układu służącego do usuwania izolacji cieplnej oraz układu próżniowego.

Układ pomiarowy może być między innymi wykorzystywany do badań przewodności cieplnej w funkcji temperatury różnych rodzajów stali.

WSTĘP

Rozwój wielu dziedzin gospodarki narodowej (energetyka, aparatura chemiczna, chłodnictwo, elektronika) związany jest ściśle z prawidłowym projektowaniem szeregu odpowiedzialnych elementów konstrukcyjnych maszyn i urządzeń, poprzedzonym odpowiednimi obliczeniami pól temperatur oraz (w pewnych przypadkach) naprężeń termicznych. Powodzenie w uzyskaniu nowoczesnej i jednocześnie trwałej konstrukcji uwarunkowane jest znajomością oprócz właściwości mechanicznych materiałów konstrukcyjnych (a zwłaszcza metali) również ich właściwości cieplnych, a przede wszystkim przewodności cieplnej.

Dostępne w chwili obecnej dane literaturowe dotyczą prawie wyłącznie materiałów produkowanych w ZSRR, USA oraz częściowo w Anglii, Francji i RFN. W krajach tych działają od

wielu lat duże ośrodki naukowe specjalizujące się w określaniu właściwości cieplnych (np. National Bureau of Standards, Thermophysical Properties Research Center itp.) w szerokim zakresie temperatur, wyposażone w nowoczesną aparaturę pomiarową.

Korzystanie z tych danych literaturowych w odniesieniu do krajowych materiałów konstrukcyjnych, szczególnie w przypadku stosowania do obliczeń dokładnych nowoczesnych metod matematycznych nie jest prawidłowe, gdyż na przewodność cieplną znaczny wpływ mają niewielkie domieszki lub zanieczyszczenia, różnice w obróbce cieplnej oraz zawsze istniejące różnice w procesie technologicznym zmieniające jej wartość od kilku do kilkudziesięciu procent.

W Polsce badania przewodności cieplnej metali prowadzone były sporadycznie, najczęściej jako wynik konkretnego zamówienia i wykorzystywane były prawie wyłącznie w pracach naukowych dotyczących głównie zagadnień wymiany ciepła.

Biorąc pod uwagę stale rosnące zapotrzebowanie przemysłu, wieloletnie doświadczenie Instytutu Techniki Ciepłej PW w wyznaczaniu przewodności cieplnej różnorodnych materiałów oraz brak w kraju innego ośrodka specjalizującego się w podobnych badaniach, podjęto w Pracowni Przewodzenia Ciepła ITC, prace dotyczące wyznaczania przewodności cieplnej wybranych gatunków stali krajowych, traktując te stale jako najczęściej stosowane i jedne z najważniejszych materiałów konstrukcyjnych.

Badania przewodności cieplnej stali wykonywane były w Pracowni Przewodzenia Ciepła od r. 1965; niektóre z uzyskanych wyników dotyczących metodyki pomiarów przedstawiono w pracy [2].

W r. 1973 zakupiony został aparat do pomiaru przewodności cieplnej ciał stałych firmy Dynatech Corporation; stanowić on będzie główny element układu pomiarowego przeznaczonego do badania przewodności cieplnej stali.

Dodatkowe oprzyrządowanie i wyposażenie aparatu, umożliwiające wykonywanie pomiarów, wchodzące w skład stanowiska badawczego, zaprojektowane i wykonane w ITC w okresie od 1973 do 76 r. (częściowo w ramach prac własnych Pracowni Przewodzenia Ciepła), składa się z układu do regulacji ciśnienia wo-

dy chłodzącej, układu służącego do usuwania proszkowej izolacji cieplnej po zakończonym pomiarze oraz częściowo opracowanego układu próżniowego.

Celem niniejszej pracy jest krótkie i ogólne przedstawienie zagadnień związanych z opracowaniem i uruchomieniem kompleksowego układu pomiarowego mogącego służyć do systematycznych badań przewodności cieplnej stali.

1. OPIS APARATU DO POMIARU PRZEWODNOŚCI CIEPLNEJ FIRMY DYNATECH

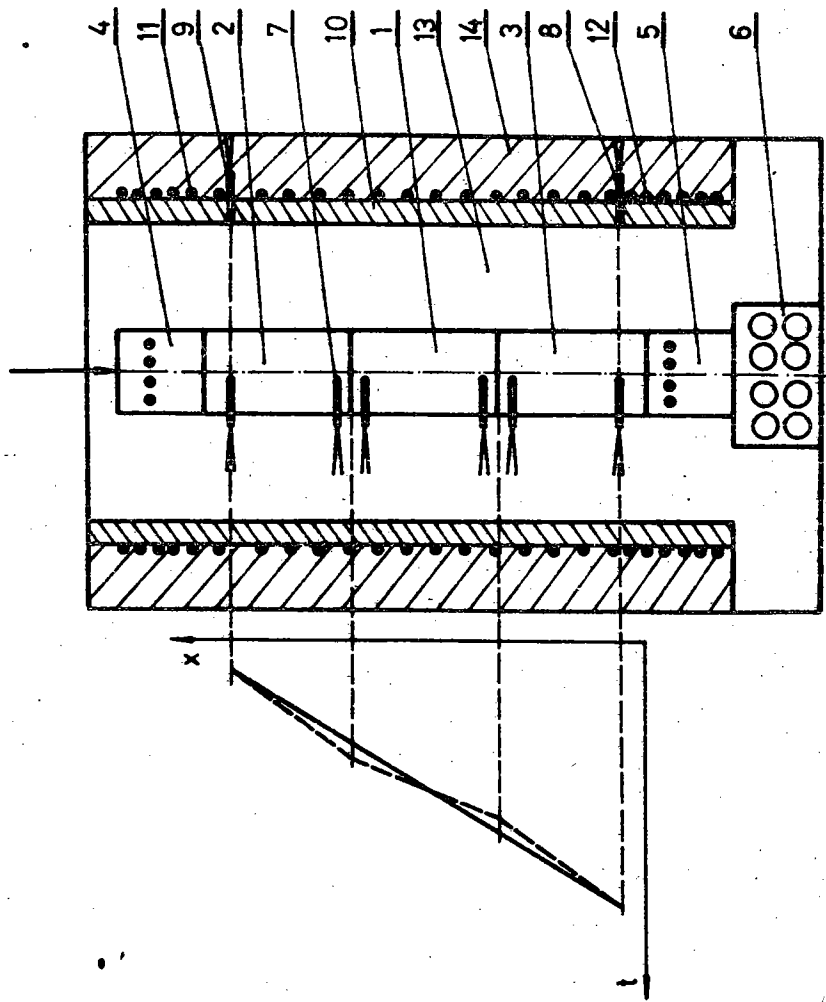
Zasada działania aparatu Thermal Conductivity Instruments - Model TCFCM - N20 [3] oparta jest na jednowymiarowym przewodzeniu ciepła w stanie ustalonym przez układ złożony z próbki badanej oraz dwóch próbek wzorcowych o znanej przewodności cieplnej. Sama zasada pomiaru znana jest od dawna; zalety opisywanego aparatu wynikają przede wszystkim ze zręcznych rozwiązań konstrukcyjnych, nowoczesnej technologii wykonania oraz zastosowania unikalnych elementów pomiarowych [6], [7], [8], [9].

Dobór długości próbki badanej oraz rodzaju próbek wzorcowych uzależniony jest od przewidywanej przewodności cieplnej materiału badanego i powinien zapewnić porównywalne różnice temperatury na każdej z prosek.

W przypadku pomiarów przewodności cieplnej różnych gatunków stali używane będą próbki wzorcowe z żelaza armco i z inconelu 702. Przewodność cieplna próbek wzorcowych w funkcji temperatury wyznaczana była niezależnie w kilku laboratoriach, (np. dla inconelu 702 - w NBS w USA, NRC w Kanadzie i NPL w Anglii).

Zastosowanie metody porównawczej pozwala uniknąć kłopotliwego pomiaru ilości ciepła przewodzonego przez próbkę badaną, natomiast wymaga ścisłego spełnienia warunku jednakowej gęstości strumienia wzdłuż stosu pomiarowego (rys.1).

Praktyczne osiągnięcie tego warunku możliwe jest w przypadku umieszczenia próbki badanej (1) i próbek wzorcowych



Rys. 1. Uproszczony schemat podstawowego elementu układu termicznego aparatu do pomiaru przewodności cieplnej: (1) próbka badana; (2) (3) próbki wzorcowe; (4) grzejnik główny; (5) grzejnik pomocniczy; (6) chłodnica; (7) termoelementy; (8) termoelement kontrolny sterujący pracą dolnego grzejnika ochronnego; (9) termoelement kontrolny sterujący pracą górnego grzejnika ochronnego; (10) pierścienie ochronny; (11) górny grzejnik ochronny; (12) dolny grzejnik ochronny; (13) izolacja cieplna; (14) izolacja cieplna. --- rozkład temperatury w pierścieniu ochronnym, --- rozkład temperatury w stosie pomiarowym.

U w a g a : Na schemacie nie zaznaczono wszystkich termoelementów

(2 i 3) o jednakowych przekrojach poprzecznych (średnica 3/4") w dobrym kontakcie ze sobą oraz z grzejnikami (4) i (5) i chłodnicą (6). Dobry kontakt zapewniony jest dzięki właściwej obróbce powierzchni czołowych próbek i grzejników oraz wywarciu znacznego nacisku na stos pomiarowy za pomocą śruby i układu sprężynującego. Istotne znaczenie w uzyskaniu jednakowego strumienia przewodzonego przez próbki wzorcowe i próbkę badaną ma również wyeliminowanie w maksymalnym stopniu strat bocznych.

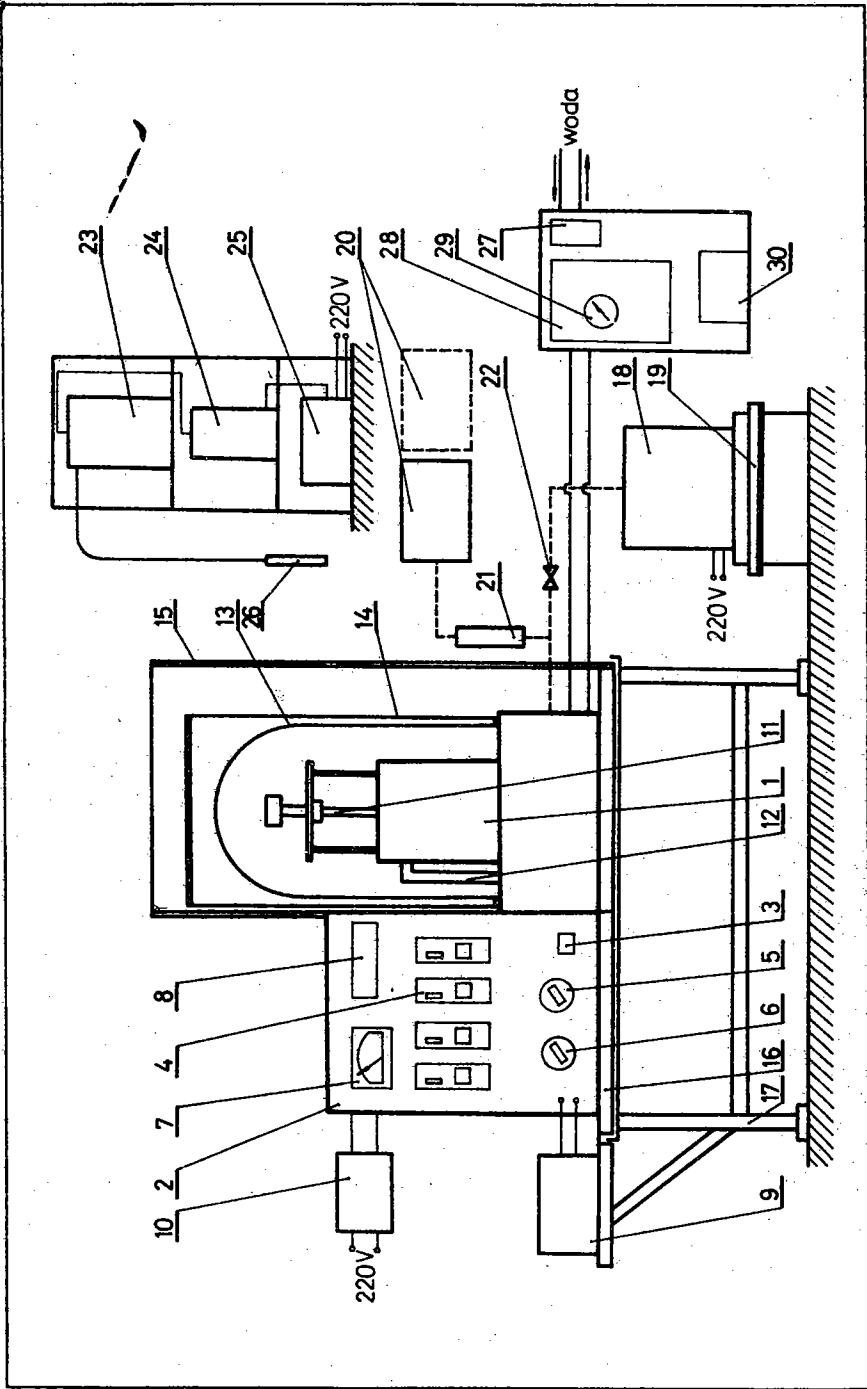
Gradient temperatury w układzie próbek wywoływany jest za pomocą dwóch grzejników: głównego (4) i pomocniczego (5). Bloki grzejników wykonane są z niklu.

Rozkład temperatury w próbkach badanej i wzorcowych przedstawiony na rys.1 mierzony jest 6 termoelementami chromel - alumel (7) umieszczonymi bezpośrednio w próbkach i odizolowanymi od nich za pomocą osłonek ceramicznych.

W próbkach wzorcowych przewidziane są dodatkowe termoelementy kontrolne, mające za zadanie przekazywać sygnały do odpowiednich automatycznych regulatorów mocy (Electromax Control Mark III firmy Leeds and Northrup) grzejników głównego i pomocniczego.

Najmniejsze straty boczne uzyskano w przypadku zastosowania pierścienia ochronnego (10) o średnicy wewnętrznej 3", w którym wywoływany zostaje liniowy rozkład temperatury za pomocą układu dwóch grzejników ochronnych, górnego (11) i dolnego (12). Moc grzejników ochronnych podobnie jak grzejników głównego i pomocniczego regulowana jest automatycznie za pomocą 2 osobnych regulatorów sterowanych sygnałami przekazywanymi przez termoelementy kontrolne (8) i (9) umocowane w pierścieniu ochronnym.

Dolny grzejnik ochronny sterowany jest jednym termoelementem kontrolnym umieszczonym dokładnie na tym samym poziomie co termoelement kontrolny grzejnika pomocniczego. Górny grzejnik ochronny sterowany może być jednym z pięciu termoelementów, dobieranym w zależności od wysokości próbki badanej w taki sposób aby znajdował się on na jednym poziomie z termoelementem kontrolnym grzejnika głównego. System ten pozwala w łatwy sposób ustalać jednakową temperaturę odpowiednich grzejników



Rys.2. Ogólny schemat stanowiska do badania przewodności cieplnej: (1) układ termiczny aparatu, (2) układ elektryczny zasilania i regulacji, (3) klawisz włączenia aparatu, (4) regulatory automatyczne mocy 4 podstawowych grzejników, (5) przełącznik 5 termoelementów kontrolnych górnego grzejnika ochronnego, (6) przełącznik 6 termoelementów stosu, (7) wskaźnik kontroli najwyższej temperatury, (8) miliwoltomierz cyfrowy, (9) potencjometr, (10) układ zabezpieczający, (11) sruba dociskowa, (12) przewody doprowadzające wodę do chłodnicy pomocniczej, (13) klosz próżniowy, (14) osłona antyimplozyjna prętowa, (15) osłona antyimplozyjna z plek-si, (16) płyta stożu tłumiąca drgania, (17) konstrukcja metalowa stożu, (18) pompa próżniowa obrotowa, (19) podstawa antywibracyjna pompy, (20) próżniomierz lub układ próżniomierzy, (21) głowica próżniomierza, (22) zawór, (23) cyklon, (24) filtr, (25) wentylator, (26) końcówka zasysająca, (27) filtr wodny z pomiarem temperatury wody na wlocie, (28) upustowy układ regulacji ciśnienia wody, (29) manometr, (30) ultratermostat

i otrzymywać najbardziej zbliżony rozkład temperatury w stosie pomiarowym i pierścieniu ochronnym, a tym samym najmniejsze straty promienicowe

Przestrzeń pomiędzy układem pomiarowym i pierścieniem ochronnym wypełniana jest izolacją cieplną (ziemia okrzemkowa o odpowiedniej przewodności cieplnej, gęstości i granulacji).

Pierścień ochronny z układem grzejników zamocowany w cylindrycznej obudowie metalowej wypełnionej izolacją cieplną, której zewnętrzna powierzchnia chłodzona jest wodą (przepływającą w układzie szeregowym lub równoległym z chłodnicą głównej aparatu), stanowi ruchomą (podnoszoną i opuszczaną) osłonę stosu pomiarowego, umożliwiającą wykonywanie pomiarów oraz wymianę próbki badanej.

Ciepło przewodzenia wzdłuż stosu pomiarowego odbierane jest w chłodnicy miedzianej, umieszczonej na płycie podstawy aparatu, chłodzonej wodą z sieci wodociągowej, przepływającą pod ciśnieniem 2,1 at.

W przypadku wykonywania pomiarów w temperaturach ujemnych, możliwe jest zastosowanie do chłodzenia aparatu ciekłego azotu lub specjalnego agregatu chłodniczego; wiązałoby się to jednak z koniecznością zbudowania dodatkowego oprzyrządowania. W przypadku wykonywania pomiarów w temperaturach podwyższonych i wysokich, zachodzi potrzeba pracy w obecności gazu obojętnego lub też wyposażenia aparatu w układ próżniowy, pozwalający na uzyskanie odpowiedniej próżni. Bardziej szczegółowy opis przewidzianego układu próżniowego podano w rozdziale 4.

Ogólny schemat układu do pomiaru przewodności cieplnej przedstawiono na rys.2, na którym omówiony powyżej układ termiczny aparatu (1) zaznaczony został w sposób bardzo uproszczony.

Zasilanie aparatu prądem zmiennym o napięciu 220 V i natężeniu 15 A odbywa się przez bezpiecznikowy układ zabezpieczający (10) oraz wysoko sprawny transformator firmy General Electric wbudowany w aparat. Z chwilą włączenia aparatu rozpoczynają pracę wszystkie elementy układu elektrycznego (2), których zadaniem jest regulacja mocy grzejników, utrzymywanie

stałej temperatury zimnych końców termoelementów, rejestracja wskazań termoelementów oraz zabezpieczenie układu termicznego przed przegrzaniem.

Cztery regulatory automatyczne mocy grzejników (4) ustawione uprzednio na przewidywane temperatury odbierają sygnały przekazywane przez termoelementy kontrolne grzejników, porównują ich wskazania z temperaturami ustalonymi w eksperymencie i regulują odpowiednio (w dość skomplikowany sposób) moce poszczególnych grzejników.

Wskazania termoelementów umieszczonych w stosie pomiarowym i służących do wyznaczania rozkładu temperatury, mogą być kolejno odczytywane na dwuzakresowym ($\pm 1,9999$ mV i $\pm 19,999$ mV) milivoltomierzu cyfrowym (8) firmy Newport Laboratories Inc. (dokładność wskazań 0,01%).

Do pomiaru wskazań termoelementów używany jest również precyzyjny potencjometr (9) firmy Leeds and Northrup podłączony do odpowiednich zacisków aparatu. Przewidziana jest także możliwość zastosowania rejestratorów o ciągłej rejestracji temperatury.

Zimne końce termoelementów utrzymywane są w stałej temperaturze (0°C) za pomocą automatycznego "układu punktu lodu" firmy Acromag.

Aparat wyposażony został również w dodatkowy układ zabezpieczający, kontrolujący za pomocą termoelementu chromel - alu-mel podłączonego do specjalnego miernika (7) najwyższą temperaturę osiąganą w stosie pomiarowym (w miejscu wybranym dowolnie przez eksperymentatora). Z chwilą osiągnięcia zaplanowanej temperatury (np. ograniczonej przemianą fazową materiału badanego) układ zasilania grzejników zostaje automatycznie wyłączony; wyłączenie układu zasilania następuje również w przypadku przekroczenia w jakimkolwiek punkcie stosu pomiarowego temperatury 1100°C .

Po uzyskaniu w układzie stanu równowagi termicznej, przewodność cieplna próbki badanej określana jest z prostej zależności

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

gdzie:

q - strumień cieplny,

Δx - odległość między termoelementami,

Δt - różnica temperatury,

F - przekrój poprzeczny próbki.

Zachowanie stałego strumienia wzdłuż stosu pomiarowego prowadzi do warunku

$$\left(\lambda \frac{\Delta t}{\Delta x}\right) \text{ próbki badanej} = \left(\lambda \frac{\Delta t}{\Delta x}\right) \text{ wzorca.}$$

Zapewnienie maksymalnej dokładności uzyskiwanych wyników osiągane jest przez umieszczenie próbki badanej pomiędzy 2 identycznymi próbkami wzorcowymi.

Wówczas

$$\lambda_{\text{próbki badanej}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta x}{\Delta t}\right)_{\text{próbki badanej}} \left[\left(\lambda \frac{\Delta t}{\Delta x}\right)_{\text{wzorca górnego}} + \left(\lambda \frac{\Delta t}{\Delta x}\right)_{\text{wzorca dolnego}} \right]$$

lub bezpośrednio ze wskazań termoelementów w mV

$$\lambda_{\text{próbki badanej}} = \frac{1}{2} \Delta x_{\text{próbki badanej}} \left[\left(\frac{\lambda}{\Delta x}\right)_{\text{wzorca górnego}} \left(\frac{\Delta emf_{\text{wz. górn.}}}{\Delta emf_{\text{pr. bad.}}}\right) + \left(\frac{\lambda}{\Delta x}\right)_{\text{wzorca dolnego}} \left(\frac{\Delta emf_{\text{wz. doln.}}}{\Delta emf_{\text{pr. bad.}}}\right) \right],$$

gdzie

Δemf oznacza różnicę siły elektromotorycznej w mV wg wskazań miernika, do którego podłączone są termoelementy.

Przewodność cieplna próbek wzorcowych przyjmowana jest dla ich temperatury średniej w danym pomiarze.

Opisany aparat przewidziany jest do wyznaczania przewodności cieplnej w granicach od $0,2 \div 100$ W/mK w zakresie temperatur od -180°C do 1100°C . Aparat ten nadaje się zatem między innymi do pomiarów przewodności cieplnej różnych gatunków stali. Dokładność uzyskiwanych wyników wg danych producenta, nie powinna być mniejsza niż $5 \div 10\%$ (przy czym większa wartość błędu odpowiada wysokim temperaturom).

Czas wykonywania pomiaru jest długi. Przygotowanie stanowiska do badań, polegające między innymi na zdjęciu osłon antyimplozyjnych, klosza próżniowego, usunięciu poprzedniej próbki i założeniu nowej próbki badanej, montażu stosu pomiarowego, umocowaniu termoelementów, zasypaniu ziemią okrzemkową przestrzeni pomiędzy stosem i pierścieniem ochronnym, sprawdzeniu układu elektrycznego i termoelementów, zajmuje ok. 8 ÷ 12 godz.

Długość pomiaru od momentu włączenia aparatu zależy w istotny sposób od przewodności cieplnej próbki badanej oraz od średniej temperatury pomiaru. W przypadku wykonywania pomiarów w temperaturach zbliżonych do pokojowych, czas pomiaru wynosi najmniej 8 godz., w temperaturach wysokich czas pomiaru znacznie się wydłuża, tym bardziej, że konieczne jest wówczas uruchomienie układu próżniowego. Bardzo kłopotliwe jest również wychładzanie wszystkich elementów aparatu po zakończonym pomiarze do odpowiednio niskiej temperatury.

2. OPIS UKŁADU DO REGULACJI CIŚNIENIA WODY CHŁODZĄCEJ

Warunkiem prawidłowego i bezawaryjnego działania opisanego aparatu do pomiaru przewodności cieplnej jest między innymi zapewnienie stałego ciśnienia wody zasilającej układ chłodzenia aparatu, składający się z chłodnicy głównej, w której odbierane jest ciepło przewodzone przez stos pomiarowy oraz chłodnicy pomocniczej chłodzącej osłonę zewnętrzną stosu.

Uzyskanie zalecanego przez producenta ciśnienia wody wynoszącego 2,1 at przy dużych wahaniami ciśnienia w sieci miejskiej (od 2,5 do 3,5 at) w Warszawie w zależności od pory dnia, wymagało opracowania i zbudowania odpowiedniego układu regulacyjnego, który jednocześnie zapewniałby możliwość precyzyjnej regulacji znacznych wydatków wody o stałej temperaturze oraz charakteryzowałby się prostą budową i jak największą niezawodnością działania.

Rozważano szereg koncepcji takich układów, które spełniałyby wymienione warunki; między innymi układ hydrostatyczny

z przelewem pozwalający na uzyskanie żadanego ciśnienia z dużą dokładnością, jak również układ z zamkniętym obiegiem wody ochładzanej za pomocą wymienników ciepła. Jednakże w pierwszym z tych układów konieczne byłoby zbudowanie odpowiednich zbiorników na wysokości przeszło 20 m od poziomu umieszczenia aparatu, w drugim wymienników ciepła chłodzonych wodą z sieci wodociągowej oraz zastosowania dodatkowej pompy i trudnego do zrealizowania układu regulacji ciśnienia. Z obydwu wymienionych systemów regulacyjnych zrezygnowano między innymi ze względu na znaczne wymiary i ciężar przewidywanych konstrukcji i związane z tym trudności zarówno techniczne jak i lokalowe.

Po rozważeniu szeregu wariantów, za najwłaściwszy uznano układ upustowy (rys.2), w którym wykorzystano stałość temperatury wody w sieci wodociągowej przy zapewnieniu dostatecznie dużego wydatku wody.

Stała temperatura wody chłodzącej ma istotne znaczenie, gdyż nawet niewielkie jej zmiany oddziałują na rozkład temperatur w stosie pomiarowym aparatu i zakłócają stan równowagi termicznej; tym samym mogą być przyczyną mniejszej dokładności uzyskiwanych wyników mierzonej przewodności cieplnej, lub znacznego wydłużenia czasu trwania pomiaru.

Zastosowany system kilku kolejnych upustów, zapewnia bardzo prostą i dokładną regulację zarówno ciśnienia jak i wydatku wody, a całość układu ma stosunkowo niewielkie wymiary.

Do pomiaru ciśnienia wody zastosowano manometr klasy 0,5 (29). Układ wyposażony został w filtr wodny z termometrem (27) zabezpieczający przed przedostawaniem się zanieczyszczeń z sieci miejskiej do układu chłodzenia.

W konstrukcji opracowanego układu przewidziano dodatkowo możliwość częściowego ochłodzenia aparatu w obiegu zamkniętym destylatem z ultratermostatu (30); rozwiązanie takie pozwala zabezpieczyć aparat przed uszkodzeniem w przypadku nagłej przerwy w dopływie wody z sieci.

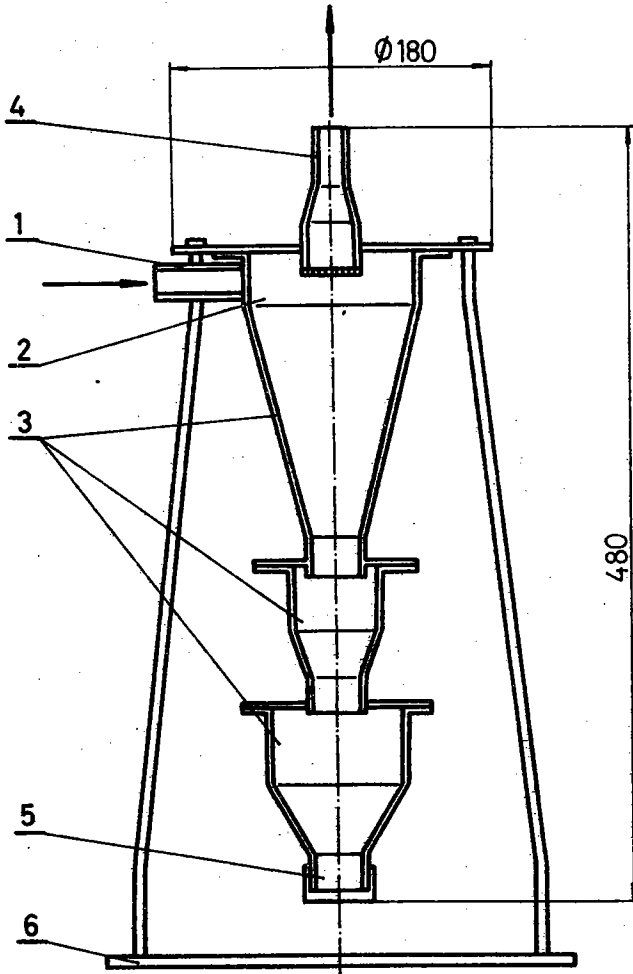
System regulacyjny przystosowany został zarówno do zasilania chłodnicy głównej aparatu oraz chłodnicy osłony stosu termicznego w układzie szeregowym jak i równoległym.

3. UKŁAD DO USUWANIA IZOLACJI CIEPLNEJ

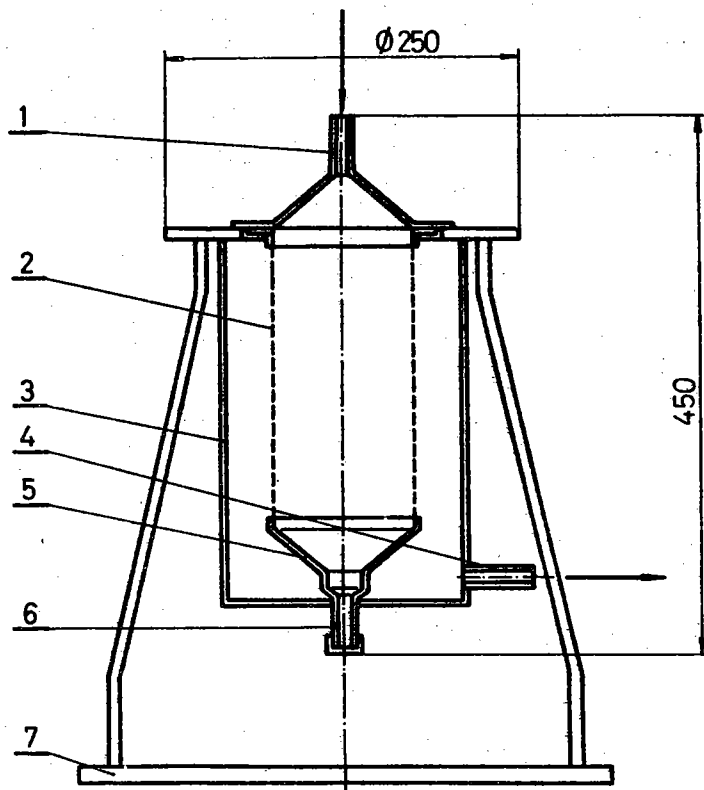
Przestrzeń pomiędzy stosem pomiarowym i pierścieniem ochronnym aparatu wypełniona jest, w celu zmniejszenia strat bocznych, proszkową izolacją cieplną odporną na wysoką temperaturę. Jest nią ziemia okrzemkowa o specjalnie dobranych właściwościach (gęstości, granulacji i przewodności cieplnej) zapewniających dokładne wypełnienie całej przestrzeni, utrudnione przez obecność w tym obszarze termoelementów oraz przewodów zasilania grzejników głównego i pomocniczego. Każdorazowa zmiana próbki badanej wymaga usunięcia ziemi okrzemkowej; po podniesieniu osłony aparatu (wraz z pierścieniem ochronnym) zsypuje się ona na płytę dolną aparatu, na której znajdują się wszystkie podłączenia termoelementów i grzejników. Dokładne usunięcie ziemi okrzemkowej spomiędzy dużej ilości cienkich i delikatnych przewodów (bez ich uszkodzenia), możliwe jest wyłącznie metodą jej zasysania. Z tego względu okazało się konieczne zaprojektowanie specjalnego układu odpylającego (rys.2), zaopatrzonego w urządzenie wychytujące zasysaną ziemię okrzemkową, aby istniała możliwość wielokrotnego jej użycia. Dodatkową trudność stanowiło zachowanie maksymalnej czystości ziemi okrzemkowej, tzn. uniknięcia jej kontaktu z jakimkolwiek materiałem palnym lub materiałami, które po utlenieniu się mogą przewodzić prąd elektryczny.

Wymagało to zaprojektowania i zbudowania specjalnego cyklonu (23) o oryginalnej konstrukcji oraz filtru (24) pracujących w układzie szeregowym [5]. Ze względu na sposób zasysania ziemi okrzemkowej z płyty aparatu, cyklon pracuje przy dużej i bardzo zmiennej koncentracji pyłu; stąd konieczność zastosowania jego niekonwencjonalnej konstrukcji (rys.3).

Przewód zasysający ziemię okrzemkową (1) umieszczony jest jak w zwykłych odpylaczach stycznie do ścianki cylindrycznej części wlotowej (2), zapewniając wirowy ruch strumienia, natomiast do wychwytywania pyłu zastosowano trzy stożkowe elementy (3), w których następuje wytworzenie podwójnego zawirowania umożliwiającego wytrącenie ziemi okrzemkowej na ścian-



Rys.3. Schemat cyklonu: (1) wlot, (2) cylindryczna komora wlotowa, (3) stożkowe komory cyklonu, (4) wylot, (5) króciec do usuwania ziemi okrężkowej, (6) podstawa z trzema wspornikami



Rys.4. Schemat filtra: (1) wlot, (2) układ odpylający złożony z dwóch siatek metalowych i umieszczonej między nimi tkaniny filtracyjnej, (3) obudowa filtra, (4) wylot czystego powietrza, (5) zbiornik ziemi okrzemkowej, (6) króciec do usuwania ziemi okrzemkowej, (7) podstawa z trzema wspornikami

kach cyklonu. Przewód połączony z filtrem lub bezpośrednio z wentylatorem, znajduje się w górnej części cyklonu. Ziemia okrzemkowa zbiera się w najniższym zbiorniku i może być z niego usuwana przez odpowiedni króciec (5).

Cyklon wykonany został ze stali odpornej na ścieranie.

Schematycznie konstrukcję filtra przedstawiono na rys.4. Wlot filtra (1) znajduje się w górnej, stożkowej jego części łączącej się bezpośrednio z cylindryczną komorą oddzieloną od obudowy filtra dwoma warstwami specjalnych siatek (2) wykonanych z cienkiej blachy, z wyciętymi w niej kwadratowymi otworami; pomiędzy siatki zakładana jest warstwa tkaniny filtracyjnej. Odsysanie powietrza następuje w dolnej części filtra z przestrzeni pomiędzy siatką a obudową.

Usuwanie pozostałości ziemi okrzemkowej zbierającej się w stożkowym zbiorniku (5) umieszczonym w dolnej części filtra może odbywać się przez odpowiedni króciec (6).

W trakcie prób skuteczności działania zaprojektowanego układu okazało się, że sprawność cyklonu jest tak duża, że praktycznie rzadko zachodzi konieczność dodatkowego stosowania filtra. Wielokrotne próby zasysania tej samej próbki ziemi okrzemkowej nie spowodowały zmian w gładkości wewnętrznej powierzchni cyklonu, jak również w granulacji i czystości ziemi okrzemkowej.

W przypadku niezastosowania opisanego układu odpylającego, niezbędne byłoby stałe importowanie dużych ilości ziemi okrzemkowej o specjalnie dobranych właściwościach.

4. UKŁAD PRÓŻNIOWY

Wykonywanie pomiarów przewodności cieplnej w wysokich temperaturach, możliwe jest wyłącznie w przypadku zastosowania układu próżniowego, pozwalającego na osiągnięcie próżni zabezpieczającej wszystkie elementy aparatu przed utlenieniem [4].

Aparat wyposażony jest w kłosz próżniowy z pyreksu ustawiany na specjalnie oszlifowanej płycie podstawy stosu ter-

micznego oraz przewod umożliwiający podłączenie układu próżniowego. Z uwagi na możliwość nierównomiernego nagrzewania się klosza, należało zbudować odpowiednie osłony antyimplozyjne: osłonę wewnętrzną z prętów metalowych, i osłonę zewnętrzną (nie połączoną bezpośrednio z aparatem) o specjalnej konstrukcji z płyt z metapleksu, o grubościach 8, 10 i 16 mm; płyty osłaniają całkowicie układ termiczny aparatu i umocowane są do ramy stołu, stanowiącego podstawę aparatu.

Konstrukcja stołu powinna zapewniać jak największe wyeliminowanie wstrząsów zewnętrznych. W tym celu płyta stołu, na której ustawiony jest aparat, nie ma sztywnego połączenia z ramą metalową, natomiast opiera się ona na odpowiedniej konstrukcji z elementów gumowych i elastycznych, tłumiących drgania.

Z tego również względu połączenie układu próżniowego z aparatem, wykonano za pomocą odcinka próżniowego przewodu elastycznego.

Wstępne próby uruchomienia aparatu w celu sprawdzenia jego działania w wysokich temperaturach, wykonano przy użyciu polskiej pompy próżniowej, zaworu szklanego i typowego próżniomierza.

W projektowanym układzie próżniowym (rys.2), przewidziano zastosowanie pompy próżniowej obrotowej (18) ES 330 (próżnia do $5 \cdot 10^{-3}$ tora) firmy Edwards ustawionej na podstawie przeciwwibracyjnej (19), zaworów (22) ZOE-25 i ZMN-25 A oraz próżniomierzy (20) PN - 01 (zakres pomiaru: $5 \cdot 10^{-2} \div 50$ torów) i PN - 21 (zakres pomiaru: $1 \cdot 10^{-3} \div 5 \cdot 10^{-1}$ tora) lub innych odpowiednich próżniomierzy zaopatrzonych w głowice metalowe (21) typu GN-01 i GN-43.

Połączenia poszczególnych elementów układu próżniowego przewidziano z rur ze stali 1H18 N9T spawanych w argonie, uszczelnianych za pomocą odpowiednich pierścieni gumowych i wkładek teflonowych.

Zdaniem autorów przewidziany układ próżniowy wymaga jeszcze dopracowania i prób niezawodności.

5 ZAKOŃCZENIE

Oprzyrządowanie i uruchomienie stanowiska do badania przewodności cieplnej ciał stałych w szerokim zakresie temperatur, wymagało wieloletnich przygotowań, polegających między innymi na odpowiedniej adaptacji osobnego pomieszczenia nie narażonego na znaczne zmiany temperatury (brak nasłonecznienia, właściwa wentylacja itp.) i zabezpieczonego przed oddziaływaniem czynników powodujących korozję oraz zgromadzeniu specjalnej aparatury.

Ilustrację stopnia komplikacji i pracochłonności wykonania opisanego układu pomiarowego może stanowić porównanie wielkości powierzchni (ok. 20 m²) całkowicie zajmowanej przez ten układ do wymiarów próbki badanej wynoszących ok. $\phi 20 \times 30$ mm.

Uruchomienie samego aparatu TCFCM - N20 oraz zbudowanie dodatkowego wyposażenia i oprzyrządowania wymagało pokonania szeregu trudności technicznych; jednakże dzięki temu obsługa aparatu będzie łatwiejsza, a pomiary mogą być przeprowadzone w sposób poprawny i względnie szybki.

Utrzymanie przedstawionego układu pomiarowego w stanie dobrej sprawności technicznej jest bardzo pracochłonne; wymaga ciągłej konserwacji wszystkich zespołów oraz konieczności korzystania z elementów lub materiałów importowanych, np. podzespołów elektronicznych, próbek wzorcowych, drutów na termoelementy, ceramik, bezpieczników, baterii i grzejników.

Przygotowanie układu do badań przewodności cieplnej różnych gatunków stali (zakres λ stali od 10 ÷ 60 W/mK) w temperaturach umiarkowanych i powyższych polegało między innymi na przeprowadzeniu wstępnych pomiarów sprawdzających. Badano w temperaturach umiarkowanych próbki wzorcowe (specjalnie w tym celu sprowadzane z USA) z żelaza armco i inconelu 702 oraz żelazo armco produkcji francuskiej firmy Armco; dla materiałów tych uzyskano zupełnie zadowalające wyniki.

BIBLIOGRAFIA

- [1] C z i r k i n W.S.: Tęplotęprowodność przemysłowych materiałów. MASZGIZ, Moskwa 1962.
- [2] D o m a ń s k i R., G o g ó ł E., G o g ó ł W.: Pomiary przewodności cieplnej stali. Biuletyn Inf.Instytut. Techniki Ciepłej, Nr 39, Warszawa 1973.
- [3] G o g ó ł W.: Aparat TCFCM - N2O do pomiaru przewodności cieplnej ciał stałych (w druku).
- [4] G r o s z k o w s k i J.: Technika wysokiej próżni. WNT, Warszawa 1972.
- [5] J u d a J.: Pomiary zapylenia i technika odpylania. WNT, Warszawa 1968.
- [6] M o r r i s R.G., H u s t J. G.: Thermal Conductivity Measurements of Silicon from 30 to 425°C. Physical Review, Vol. 124, No 5, 1961.
- [7] S t u c k e s A.B., C h a s m a r R. P.: Measurement of the Thermal Conductivity of Semiconductors. Report of the Meeting on Semiconductors, Physical Society, 1956.
- [8] V a s i l o s T., K i n g e r y W.D.: Thermal Conductivity: XI. Conductivity of Some Refractory Carbides and Nitrides. J.Amer.Ceram.Soc., Vol. 37, No 9, 1954.
- [9] T a y R.P.: Thermal Conductivity. Academic Press, London 1969.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ СТАЛИ

К р а т к о е с о д е р ж а н и е

В работе описывается принцип действия и конструкция установки, предназначенной для измерения теплопроводности твердых тел. Установка включает аппарат фирмы Динатех Корп., систему регулирования давления охлаждающей воды, систему удаления термической изоляции и вакуумную систему. Измерительная установка может быть использована для исследования теплопроводности разных типов стали в зависимости от температуры.

EXPERIMENTAL ARRANGEMENT FOR DETERMINING THERMAL CONDUCTIVITY OF STEEL

S u m m a r y

The article presents principle of operation and construction description of an experimental arrangement for measuring thermal conductivity of solids. It consists of the Dynatech Corp. apparatus, control system of the cooling water pressure, thermal insulation removal systems and a vacuum system.

The experimental arrangement may be used, among others, for investigation of the thermal conductivity temperature dependence of different kinds of steel.

U w a g a :

Praca wykonana została częściowo w r. 1976 w ramach problemu węzłowego 05. 1. 8 - 05. 12 01.4 pt. "Wytrzymałość i optymalizacja konstrukcji maszynowych i budowlanych" - koordynowanego przez Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk.

Rękopis dostarczony w grudniu 1976 r.