

Wykorzystanie wirtualnych przyrządów pomiarowych w badaniach dylatometrycznych z dużą rozdzielczością termiczną

W pracy przedstawiono problemy związane z automatyzacją dylatometru interferencyjnego do badań rozszerzalności liniowej ciał stałych z dużą rozdzielczością termiczną. Automatyzacji dokonano w oparciu o zastosowanie kontrolera systemowego z kartą interfejsu IEEE488. Do kontroli zarówno pomiarów dylatometrycznych, jak i badań pomocniczych, użyte zostały przyrządy wirtualne. Programy przyrządów wirtualnych napisano wykorzystując pakiet oprogramowania LabWindows. Dzięki wprowadzonym zmianom istotnie wzrosły możliwości badawcze układu. Ilustrują je zamieszczone przykładowe wyniki dylatometrycznej analizy termicznej.

The high thermal resolution dilatometric investigations with the use of virtual instruments

An automation of the laser interferometry apparatus for the high thermal resolution investigations of the coefficient of the linear thermal expansion of solids is described. In the automatic data acquisition and processing subsystem a PC controller with the IEEE488 interface board was utilised. An integrated hardware and software solution based on a concept of a virtual software architecture was applied to automate both the interferometric dilatometer and the auxiliary apparatus functions. Virtual instruments were created with the use of a LabWindows package. Test results of a dilatometric thermal analysis are presented to illustrate the apparatus performance.

1. WPROWADZENIE

Dokonany w ostatnich latach przełom w badaniach doświadczalnych związany z powszechnym wykorzystaniem systemów mikroprocesorowych do kontrolowania procesów pomiarowych nie zawsze znajduje odbicie w postaci napływu nowych, dokładniejszych danych dotyczących poszczególnych właściwości termofizycznych. Stoi to w wyraźnej sprzeczności z rosnącymi wymaganiami jakie stawiane są przez rozwój nowych technologii, czy też postęp prac teoretycznych. Opisana sytuacja zaznacza się również i w dziedzinie badań rozszerzalności cieplnej ciał stałych, o czym może świadczyć porównanie najnowszych ofert wiodących firm

produkujących przyrządy dylatometryczne, bądź nawet konkretnych ofert pomiarowych jak np. [18] i [19], ze stanem rzeczy przedstawionym w [3], [5] lub [6]. Nieliczne publikacje, dotyczące w szczególności pomiarów o wysokiej rozdzielczości termicznej takie jak [2], [8-14], zaliczyć należy do wyjątków. Ostatnie z wymienionych dotyczą systematycznych prac prowadzonych w Zakładzie Napędów Lotniczych i Termodynamiki WAT mających na celu nie tylko poprawę dokładności, ale i otrzymanie jakościowo nowych rezultatów, związanych właśnie z wysoką rozdzielczością termiczną. Jednym z warunków uzyskania wysokiej rozdzielczości termicznej jest automatyzacja procesu pomiarowego, w tym głównie automatyzacja procesu gromadzenia danych pomiarowych.

2. ROZDZIELCZOŚĆ TERMICZNA W BADANIACH ROZSZERZALNOŚCI LINIOWEJ METODĄ INTERFERENCYJNĄ

Zjawisko rozszerzalności cieplnej ciała stałego można opisać poprzez określenie zależności od temperatury, czyli tzw. charakterystyki termicznej, jednego z dwóch parametrów [17], a mianowicie wydłużenia względnego

$$\varepsilon \equiv \frac{l(T) - l(T_0)}{l(T_0)} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (1)$$

gdzie l jest długością badanej próbki, a T temperaturą, bądź rozszerzalności liniowej odniesionej do długości początkowej¹ badanej próbki l_0 w temperaturze odniesienia T_0

$$\alpha^*(T) \equiv \frac{1}{l(T_0)} \left(\frac{dl}{dT} \right)_p = \frac{1}{l_0} \left(\frac{dl}{dT} \right)_p \quad (2)$$

Wielkością dokładniej charakteryzującą właściwości termofizyczne badanego materiału, lecz zarazem trudniejszą do uzyskania w doświadczeniu, jest druga z wyżej wymienionych [9]. W praktyce eksperymentalnej nie ma bowiem możliwości bezpośredniego wyznaczenia pochodnej długości po temperaturze. Względny natury metodycznej stwarzają konieczność zastąpienia pochodnej we wzorze (2) jej przybliżeniem różnicowym i w rezultacie otrzymuje się średnią wartość rozszerzalności liniowej

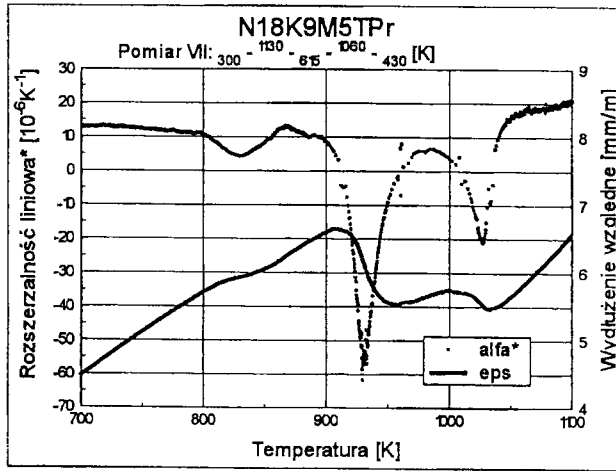
$$\bar{\alpha}^*(T) = \alpha^* \Big|_{T - \frac{\Delta T}{2}}^{T + \frac{\Delta T}{2}} = \frac{1}{l_0} \frac{\Delta l}{\Delta T} \quad (3)$$

w przedziale temperatury o szerokości ΔT . Różnica pomiędzy wartością wyznaczoną w eksperymencie (3), a wartością rzeczywistą (2), zależy zarówno od przebiegu funkcji $\alpha^*(T)$, jak i wartości ΔT . Skalę problemu, teoretycznie dyskutowanego np. w [9], ilustrują rysunki 1 ÷ 3. Na rys. 1 przedstawiono rzeczywiste wyniki badań charakterystyk termicznych rozszerzalności liniowej i wydłużenia względnego stali maraging o symbolu N18K9M5TPr. Rys. 2 obrazuje rezultat obliczeń wartości średnich rozszerzalności co 20 i 100 K oraz krzywą uzyskaną w wyniku różniczkowania wielomianu 5-go stopnia, którym aproksymowano wydłużenie względne w przedziale od 700 do 1100 K (por. [9] i [17]). Na rys. 3 porównano bezpośrednie wyniki wysokorozdzielczych termicznie pomiarów z wynikami obliczeń o rozdzielczości 20 K. Porównania dokonano w okolicy przejścia fazowego I-go rodzaju przy grzaniu. Analiza wykresów wykazuje, że dla wiernego odtworzenia charakterystyki termicznej rozszerzalności liniowej, szczególnie w obszarach gwałtownych jej zmian, koniecznym staje się

¹ W dalszej części wielkość ta będzie nazywana rozszerzalnością liniową.

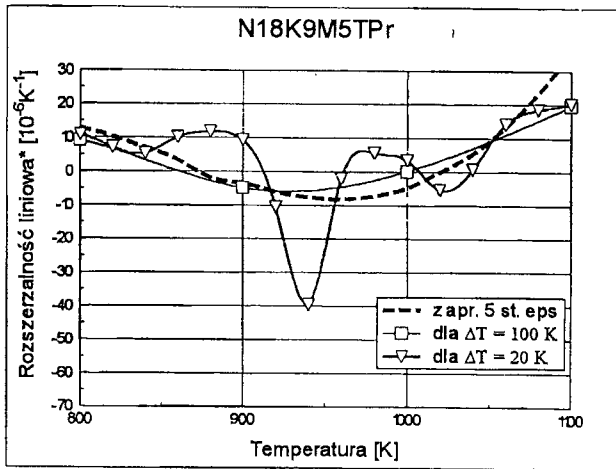
Rys. 1.

Wyniki badań charakterystyk termicznych rozszerzalności liniowej i wydłużenia względnego stopu maraging N18K9M5TPr w okolicy przejścia fazowego I-go rodzaju. Przemiana zachodzi przy grzaniu próbki w obszarze od ok. 800 do ok. 1100 K. W kulminacyjnej fazie objawia się wystąpieniem ujemnych wartości rozszerzalności, co odpowiada zmniejszeniu długości.



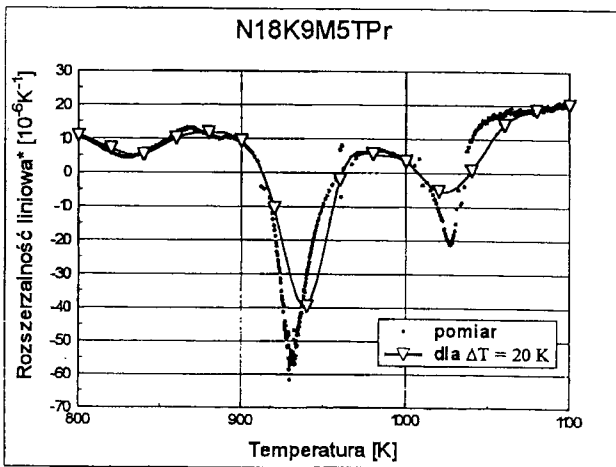
Rys. 2.

Rozszerzalność liniowa dla próbki j.w. na podstawie opracowania wyników badań wydłużenia względnego: linia przerywana odpowiada różniczkowaniu wielomianu aproksymującego wydłużenie z zakresu od 800 do 1100 K; punkty to wartości średnie rozszerzalności (połączono je linią odpowiadającą funkcji gętkiej wykorzystując standardową procedurę programu graficznego).



Rys. 3.

Porównanie uśrednionych wartości rozszerzalności liniowej badanej próbki (wartości reprezentatywne dla najczęściej stosowanej metody opracowania wyników badań dylatometrycznych) z wynikami pomiarów wysokorozdzielczych termicznie. Pomiary wykonano przy użyciu dylatomtru interferencyjnego opisywanego w niniejszej pracy.



maksymalne zmniejszenie przedziału uśredniania ΔT , czyli zwiększenie tzw. rozdzielczości termicznej.

Jedną z metod pomiaru rozszerzalności liniowej jest metoda, w której do określania przyrostów długości badanej próbki wykorzystuje się interferencję światła spójnego. Cechuje się ona wieloma zaletami, wśród których najważniejsze to absolutny charakter pomiaru i możliwość prowadzenia badań w szerokim zakresie temperatury (por. [1], [3], [5], [9]). Interferencyjny pomiar przyrostów długości sprowadza się do rejestracji i opracowania pseudosinusoidalnego sygnału interferometrycznego. Charakter pseudosinusoidalnej zależności, wraz z właściwościami zastosowanego algorytmu opracowania danych, stanowi o możliwej do uzyskania rozdzielczości termicznej. Jak wykazano w [10] rozdzielczość termiczna, a przede wszystkim dokładność określenia przyrostów długości, jest bezpośrednio uzależniona od częstości i dokładności próbkowania sygnału interferometrycznego. Bardzo duże wymagania są nałożone również na dokładność rejestracji i opracowania sygnału termoelektrycznego (por. [11]). Wyżej wymienione czynniki decydują o specyfice wysokorozdzielczych termicznie interferencyjnych badań rozszerzalności liniowej, szczególnie w odniesieniu do tzw. dylatometrycznej analizy termicznej [12-14], na którą to specyfikę składają się:

- konieczność zapisu bardzo dużej ilości danych, uwarunkowana przede wszystkim potrzebami rejestracji sygnału interferometrycznego w odstępach nawet i poniżej 5 ms [14],
- konieczność rejestracji napięć termoelektrycznych z rozdzielczością co najmniej 100 nV,
- konieczność zapewnienia możliwości wykonywania pomiarów zarówno szybkich, kilkuminutowych, jak i długotrwałych, kilku a nawet kilkunastodniowych.

Przy tego typu wymaganiach przeprowadzenie badań charakterystyk termicznych rozszerzalności liniowej bez automatyzacji procesu gromadzenia danych i bez automatycznej kontroli procesu pomiarowego nie jest praktycznie możliwe. Automatyzacja stwarza również możliwości znacznego uproszczenia obsługi układu pomiarowego.

3. AUTOMATYZACJA UKŁADÓW POMIAROWYCH

Dokładne badania charakterystyk termicznych rozszerzalności liniowej wymagają odpowiedniego przygotowania czujników termometrycznych [11], [14]. W związku z powyższym automatyczne systemy kontroli pomiaru oraz gromadzenia, i wstępного opracowania danych pomiarowych wprowadzone zostały zarówno w układzie dylatometru interferencyjnego, jak i w układzie do skalowania termoelementów. Automatyzację wyżej wymienionych stanowisk badawczych oparto na:

- wykorzystaniu kontrolera systemowego z kartami przetworników (interfejsów) i urządzeniami pomocniczymi,
- wykorzystaniu wirtualnych przyrządów pomiarowych,
- wykorzystaniu własnych algorytmów przetwarzania i opracowania danych pomiarowych.

Rolę kontrolera systemowego w układzie automatycznej kontroli pomiaru spełnia komputer osobisty (por. rys. 4 i 6) wyposażony w kartę interfejsu szeregowo-równoległego NI-IEEE488.2 firmy National Instruments oraz standardowe łącze RS232. Do magistrali IEEE488 (GPIB) podłączane są liniowo w systemie rozłożonym (por. [7]) wszystkie przyrządy pomiarowe, w danym przypadku multimetry cyfrowe. Jednostka centralna jest zatem wykorzystywana zarówno w badaniach dylatometrycznych, jak i przy pomiarach skalujących. Modułowe zestawienie układu kontroli pomiarów wpływa zarówno na zmniejszenie kosztów jak i zwiększenie dokładności prowadzonych badań, ze względu chociażby na możliwość

zastosowania tych samych przyrządów pomiarowych. Do komputera może być dołączony również moduł sterujący regulatora temperatury CN3800. Wykorzystuje się w tym przypadku łącze transmisji szeregowej RS232. Urządzeniem pomocniczym jest drukarka. Istnieje także możliwość podłączenia plotera, a ostatnio podjęto prace mające na celu w pierwszej fazie umożliwienie przekazywania danych bezpośrednio do sieci intra- i internetowej, a później stworzenie możliwości dozorowania przeprowadzanych pomiarów poprzez sieć komputerową.

O tym jakie funkcje komputer ma w danej chwili spełniać decyduje oprogramowanie w postaci tzw. przyrządów wirtualnych. Przyrządy wirtualne to przyrządy tworzone programowo w oparciu o wykorzystanie funkcji pomiarowych urządzeń rzeczywistych, które są dołączone do jednej z magistral. Jednocześnie wykorzystuje się możliwości przetwarzania danych przez procesor komputera². Zastosowanie przyrządów wirtualnych ułatwia obsługę układów badawczych, gdyż pozwala na przeniesienie wszelkich czynności operatora z poszczególnych urządzeń rzeczywistych na urządzenia wejścia-wyjścia komputera. Możliwa jest także programowa zmiana i rozszerzenie funkcji przyrządów rzeczywistych, ograniczenie czynności operatorskich, ograniczenie ilości rejestrowanych danych do ilości całkowicie niezbędnej, jednym słowem daleko idąca optymalizacja procesu pomiarowego.

Do tworzenia programów przyrządów wirtualnych są stosowane pakiety specjalistycznego oprogramowania systemowego. W danym przypadku wykorzystano pakiet LabWindows firmy National Instruments. Zakład Napędów Lotniczych i Termodynamiki dysponuje jeszcze pakietami HP VEE firmy Hewlett Packard i Test Point firmy Keithley. O wyborze przesądziły zarówno względy pełnej kompatybilności oprogramowania i oprzyrządowania (karta interfejsu IEEE 488), jak i preferencje osobiste. W odczuciu autora niniejszego opracowania, a zarazem autora programów, posługiwanie się pakietami LabWindows (DOS i CVI) wymaga wprowadzie większego zaawansowania i większego wkładu pracy na wstępie, ale za to umożliwia większy stopień ingerencji w tworzone moduły programowe i ułatwia możliwości wkomponowania własnych procedur.

Wykorzystanie własnych algorytmów opracowania danych pomiarowych stanowi trzeci element automatyzacji dylatometru interferencyjnego. Dokładne ich omówienie wykracza jednak poza ramy niniejszego opracowania. Niektóre szczegóły z tym problemem związane przedyskutowano w pracach [10] i [14].

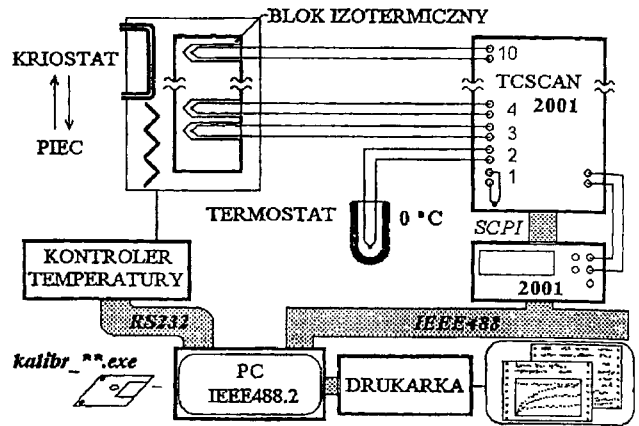
3.1. Stanowisko do określania charakterystyk czujników termometrycznych

Schemat blokowy stanowiska do określania charakterystyk napięciowych czujników termometrycznych, w danym przypadku głównie termoelementów, przedstawiono na rys. 4. Oprócz kontrolera systemowego, regulatora temperatury, pieca z blokiem izotermicznym i termostatu w skład układu wchodzi dwa urządzenia spełniające najwyższe wymagania metrologiczne. Są to multimetr cyfrowy 2001 z kartą przełącznika dziesięciokanałowego TCSCAN 2001, oba firmy Keithley. Jednym z najważniejszych parametrów charakteryzujących multimetr jest jego rozdzielczość, podawana jako ilość cyfr dla najniższego zakresu pomiarowego 200 mV (pełna skala ± 210 mV). W danym przypadku wynosi ona 7 1/2 cyfry, co oznacza możliwość pomiaru napięcia stałego z zakresu od -0.3 do 0.3 V z dokładnością do $10 \text{ nV} = 10^{-8}$ V. Dokładność i rozdzielczość jest zupełnie wystarczająca nawet

² Jest to definicja znacznie uproszczona na potrzeby niniejszego opracowania. W dokładnych rozważaniach należałoby uwzględnić rolę, jaką spełniają integralne mikroprocesory urządzeń pomiarowych, czy też mikroprocesory kart interfejsów, a w bardziej zaawansowanych systemach takich jak PXI i VXI, mikroprocesory urządzeń pośredniczących.

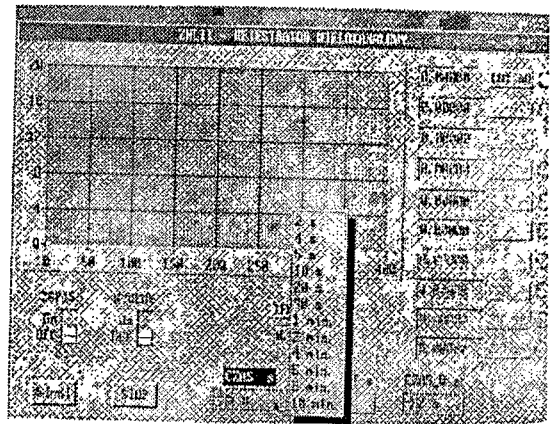
Rys. 4.

Schemat blokowy stanowiska do określania charakterystyk napięciowych czujników termometrycznych do badań właściwości termofizycznych z dużą rozdzielczością termiczną. W układzie automatycznej kontroli wykorzystano interfejsy IEEE488 i RS232.



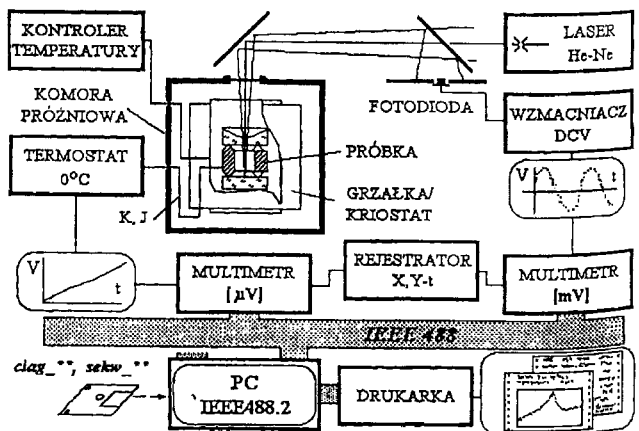
Rys. 5.

Widok panelu wirtualnego rejestratora sygnałów niskonapięciowych (*kalibr.exe*), który jest wykorzystywany w układzie z rys. 4. Na ilustracji widać rozwiniętą „wstęgę” zmiany czasu odstępu pomiędzy kolejnymi sekwencjami skanowania kanałów pomiarowych.



Rys. 6.

Schemat blokowy dylatometru interferencyjnego do badań charakterystyk termicznych rozszerzalności liniowej i wydłużenia względne ciał stałych w zakresie do 150 do 1370 K. W układzie automatycznej kontroli pomiaru zachowano to samo, co w przypadku z rys. 4, oprzyrządowanie, ze zmienionym oprogramowaniem.



do pomiarów z wykorzystaniem termoelementów o najniższych wartościach współczynników sił termoelektrycznych (np. typu R, S itp.). Przyrząd ma również możliwość kompensacji stałej składowej, która przy badaniach termoelementów nie musi być wykorzystywana, oraz szeroko rozbudowane opcje filtracji i redukcji szumów sygnału. Dziesięciokanałowa karta przełączników TCSCAN 2001 jest dołączana do multimetru. Istnieje możliwość jej zastąpienia przez skaner zewnętrzny 7001, w którym to przypadku ilość kanałów pomiarowych wzrasta do osiemdziesięciu.

Do przeprowadzania pomiarów skalujących wykorzystuje się wirtualny wielokanałowy rejestrator sygnałów niskonapięciowych *kalibr.exe*. Panel przyrządu przedstawia rys. 5. Na ekranie komputera programowo kreowane są elementy, które ułatwiają obsługę i poszerzają możliwości układu. Należą do nich:

- przyciski uruchomienia i zatrzymania programu odpowiednio "START" oraz "STOP";
- monitor służący do zobrazowania rejestrowanych przebiegów napięciowych (rys. 5 - okno z przesuwaną "taśmą" zapisu wyników ostatnich czterystu skanowań w załączonych kanałach pomiarowych);
- przełącznik czasu odstępu pomiędzy poszczególnymi sekwencjami "przechwywania" (skanowania) kanałów pomiarowych "CZAS s";
- przełączniki czasu oczekiwania na ustabilizowanie się sygnału po przełączeniu kanału pomiarowego "CZAS_T s" i "CZAS_V s";
- wyświetlacze ostatnio zarejestrowanych wartości sygnału w danym kanale pomiarowym wraz z "diodą", której zapalenie się sygnalizuje załączenie danego toru pomiarowego (na rys. 5 pomiar w trzecim kanale sygnalizuje włączona "dioda" przy okienku "CH3 mV");
- wyświetlacz wartości temperatury bloku izotermicznego "TEMPERATURA";
- włączniki zapisu wyników pomiaru do zbioru "ZAPIS" i wydruku na drukarce "WYDRUK".

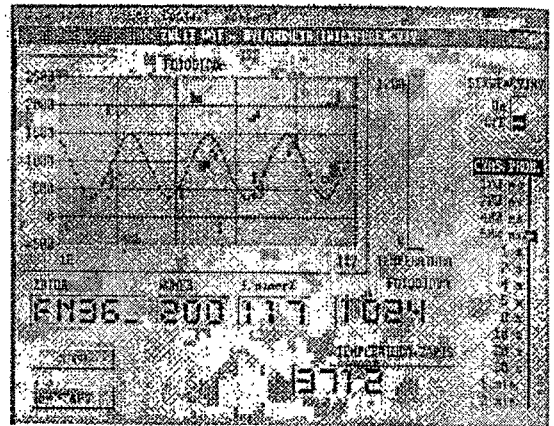
Stanowisko do skalowania termoelementów w prezentowanej wersji pozwala na jednoczesne badanie do 7 czujników termometrycznych. Standardowo podłączane są one do wejść od 4 do 10 (CH4 - CH10) karty TCSCAN 2001. Do wejścia 2 (CH2) podłącza się termoelement wzorcowy, natomiast do wejścia 3 (CH3) końcówki termoelementu kontrolującego temperaturę wnętrza puszki karty. W wersji karty przystosowanej do pomiarów napięć termoelektrycznych pierwszy kanał zablokowany jest przyłączonym na stałe czujnikiem termistorowym, który mierzy temperaturę we wnętrzu puszki. Zebrane dane umożliwiają programowe (softwarowe) "termostatowanie" zimnych końców termoelementów, realizowane przez autonomiczny mikroprocesor multimetru 2001. Wyniki pomiarów, po ustawieniu przełącznika "ZAPIS" w pozycji "On", są zapisywane na bieżąco do pliku w kolejności wyznaczonej numerem kanału.

3.2. Dylatometr interferencyjny wysokiej rozdzielczości

Schemat blokowy stanowiska do badania charakterystyk termicznych rozszerzalności liniowej i wydłużenia względnego ciał stałych przedstawiono na rys. 6. W skład urządzenia wchodzi: interferometr z badaną próbką, który jest umieszczany we wnętrzu komory próżniowej z grzałką lub chłodnicą, regulator temperatury grzałki, termostat "zimnych" końców termoelementów, laser He-Ne, wzmacniacz sygnału fotoelektrycznego, dwa multimetry, rejestrator analogowy i kontroler systemowy. Zasadniczymi urządzeniami pomiarowymi są multimetry. W danym przypadku stosuje się zamiennie multimetry Keithley 196, Keithley 2000 i Keithley 2001. Ich zadanie polega na pomiarze napięć: termoelektrycznego w torze pomiaru temperatury badanej próbki i fotoelektrycznego w torze rejestracji zmian obrazu interferencyjnego. Sygnał termoelektryczny jest w zasadzie sygnałem wolnozmiennym w

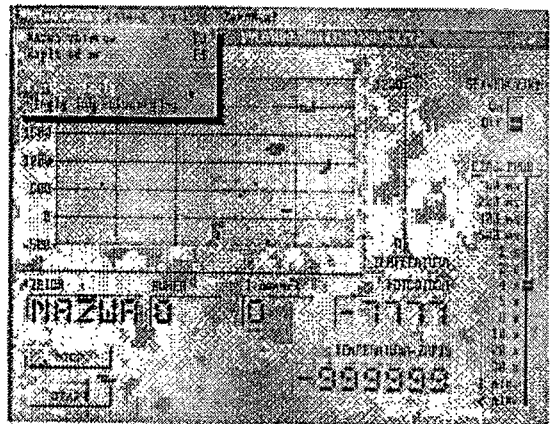
Rys. 7.

Panel ekranowy wirtualnego rejestratora sygnałów dylatometrycznych wolnozmiennych (program *ciag.exe*). W oknie graficznym jest wyświetlany przebieg sygnału fotoelektrycznego w funkcji numeru pomiaru. „Suwak” po prawej stronie służy do zmiany czasu próbkowania sygnałów.



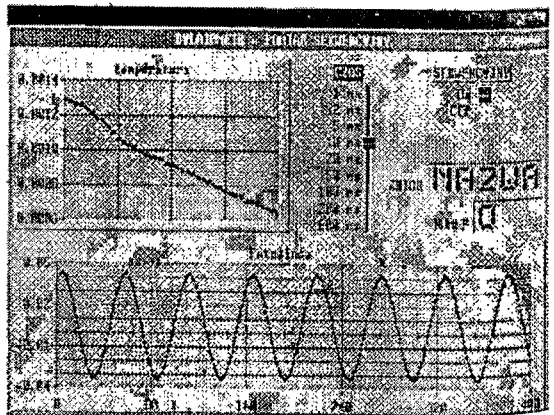
Rys. 8.

Panel ekranowy wirtualnego rejestratora sygnałów dylatometrycznych wolnozmiennych w fazie ustawień początkowych (rozwinięta lista dialogowa).



Rys. 9.

Panel ekranowy wirtualnego rejestratora sygnałów dylatometrycznych szybkozmiennych (program *sekw.exe*). W oknach graficznym wyświetlone są przebiegi sygnałów termoelektrycznego i fotoelektrycznego odpowiadające 4 s rejestracji.



przeciwieństwie do pseudosiusoidalnego sygnału fotoelektryczne, którego częstotliwość może dochodzić do kilkunastu Hz.

Do kontroli procesu pomiarowego oraz składowania danych w trakcie badań dylatometrycznych używane są dwa przyrządy wirtualne. Są to:

- rejestrator sygnałów dylatometrycznych wolnozmiennych kreowany programem *ciag.exe*,
- rejestrator sygnałów dylatometrycznych szybkozmiennych tworzony programem *sekw.exe*.

W większości przypadków wykorzystanie przyrządów wirtualnych ogranicza się do rejestratora sygnałów dylatometrycznych wolnozmiennych. Program *ciag.exe* przenosi wszystkie niezbędne elementy kontroli multimetrów na ekran komputera, steruje procesem próbkowania sygnałów pomiarowych i gromadzenia danych, a także dokonuje zobrazowania informacji (por. rys. 7). Jest to zarazem program nadrzędny, wzbogacony w stosunku do poprzednio omówionego rejestratora wielokanałowego o tzw. listwę z listą dialogową. Za pomocą listy dialogowej można dokonać np. ustawienia parametrów początkowych (rys. 8).

Przy szybkim nagrzewaniu lub chłodzeniu próbek o dużej rozszerzalności możliwa do uzyskania w rejestratorze *ciag.exe* częstość próbkowania sygnału jest niewystarczająca. W takim przypadku uruchamiany jest rejestrator sygnałów dylatometrycznych szybkozmiennych *sekw.exe*. (rys. 9). Pod względem przyrządowym pomiędzy rejestratorami *sekw.exe* oraz *ciag.exe* istnieje pełna kompatybilność - wykorzystywane są te same przyrządy pomiarowe i kontrolne. Całkowicie odmienna jest jednak organizacja procesu próbkowania sygnałów i gromadzenia danych. Program *sekw.exe* pozwala na próbkowanie sygnału fotoelektrycznego w odstępach nawet i co 2 ms (dla programu *ciag.exe* wielkość ta wynosi 200 ms). Dzieje się to jednak kosztem utraty części danych - pomiar realizowany jest sekwencyjnie - oraz znacznej komplikacji ich późniejszego opracowania [14].

4. PRZYKŁADOWE WYNIKI BADAŃ ROZSZERZALNOŚCI LINIOWEJ

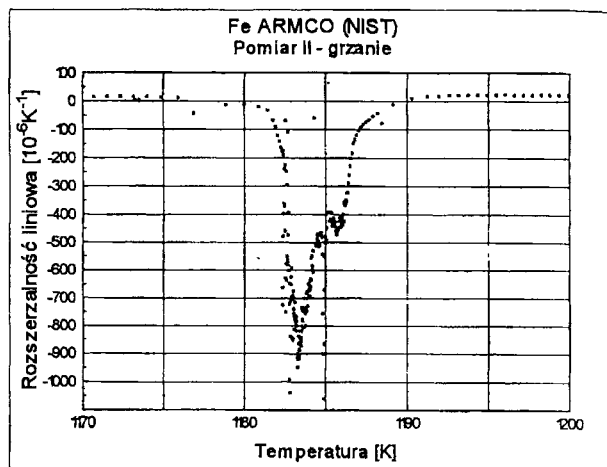
Dzięki wyżej omówionym rozwiązaniom poszerzone zostały w istotnym stopniu możliwości wykonywania badań właściwości termofizycznych z dużą rozdzielczością termiczną. Przyczyniło się do tego głównie umożliwienie rejestracji sygnałów przy pomiarach w warunkach quasidynamicznych (por. [14]). Przytaczanie szczegółowej specyfikacji w niniejszym opracowaniu nie wydaje się być celowym - podano ją w opracowaniach [14] i [16]. O wiele bardziej pogładowe będzie zaprezentowanie przykładowych wyników badań rozszerzalności.

Na rys. 1 przedstawiono wyniki badań charakterystyk termicznych rozszerzalności liniowej i wydłużenia względnego stopu o symbolu N18K9M5TPr. Jest to materiał stosowany w konstrukcjach lotniczych silników turbinowych. Badania potwierdziły występowanie histerezy wydłużenia względnego, która jest uwarunkowana różnicą temperatury przejścia fazowego I-go rodzaju przy grzaniu i przy chłodzeniu. W pomiarach osiągnięto rozdzielczość termiczną w obszarze przemiany fazowej wynoszącą ok. 0.14 K przy grzaniu i 0.08 K przy chłodzeniu. Przy analizie rys. 1 warto zwrócić uwagę na bardzo mały rozrzut wyników badań.

Badania charakterystyk termicznych rozszerzalności liniowej w obszarach przejść fazowych I-go rodzaju w stopach należą do jednych z najtrudniejszych. Naprawdę istotnym osiągnięciem jest jednak wykonanie pomiaru quasidynamicznego w obszarze przejścia fazowego I-go rodzaju w czystym pierwiastku, szczególnie jeżeli przemiana zachodzi w wysokiej temperaturze. Przykład takiego pomiaru, wykonanego za pomocą opisanego powyżej stanowiska interferencyjnego, przedstawiono na rys. 10. Zobrazowano na nim wyniki badań rozszerzalności liniowej czystego żelaza w obszarze przejścia α - γ . Obszar przemiany fazowej

Rys. 10.

Przykładowe wyniki badań rozszerzalności liniowej czystego żelaza (żelazo ARMCO z National Institute of Standards and Technology w USA) w obszarze przejścia fazowego I-go rodzaju α - γ .



charakteryzuje się wystąpieniem bardzo dużych ujemnych wartości rozszerzalności liniowej, przewyższających w liczbach bezwzględnych o dwa rzędy wartość średnią. Maksymalna uzyskana w pomiarze rozdzielczość termiczna wynosi 0,03 K.

5. PODSUMOWANIE

Automatyzacja przedstawionych w niniejszej pracy stanowisk badawczych w decydującym stopniu przyczyniła się do poszerzenia możliwości wykonywania badań właściwości termofizycznych z dużą rozdzielczością termiczną, między innymi poprzez stworzenie możliwości rejestracji sygnałów przy pomiarach w warunkach quasidynamicznych. W efekcie powstał dylatometr interferencyjny do badań charakterystyk termicznych rozszerzalności liniowej, który umożliwia przeprowadzanie dylatometrycznej analizy termicznej. Uzyskiwane wyniki badań mają na tyle jakościowo różny od poprzednich charakter, że stanowią bodziec do postępu prac teoretycznych, zarówno w dziedzinie badań właściwości termofizycznych, jak i termodynamiki ciała stałego.

Istotną rolę w modernizacji odegrały wirtualne przyrządy pomiarowe. Ich zastosowanie nie tylko ułatwia obsługę układów badawczych, ale umożliwia daleko idącą optymalizację procesów pomiarowych. Programowa zmiana, czy też dostosowanie funkcji rzeczywistych przyrządów pomiarowych, tworzenie funkcji nowych, takich jak np. funkcja zobrazowania informacji zamieniająca multimetr w cyfrowy oscyloskop przebiegów wolnozmiennych (rys. 9), to kwestia oczywistych oszczędności. Nie należy jednak zapominać o tym, że wykorzystanie tych samych przyrządów w różnych układach wpływa także na wzrost dokładności pomiarów, co jest uwarunkowane komplementarnością uzyskiwanych odczytów, głównie odczytów wartości pomiarów sygnałów termometrycznych.

W obydwu opisanych stanowiskach kontroler systemowy nadzorujący pomiarami działa w oparciu o kartę interfejsu IEEE488 i dołączone do magistrali GPIB integralne przyrządy rzeczywiste. Tego typu rozwiązanie wydaje się być najbardziej optymalnym dla laboratorium naukowo-badawczego, realizującego również zadania dydaktyczne, jakim jest Laboratorium Termodynamiki Zakładu Napędów Lotniczych i Termodynamiki WAT. Decyduje o tym wszechstronność i możliwość zmiany oprzyrządowania różnych układów, przy jednoczesnej zmianie funkcji, realizowanej przez wykorzystanie różnych przyrządów wirtualnych.

Wszechstronność jest szczególnie istotna z punktu widzenia wykonywanych w Zakładzie badań, mających na celu doskonalenie metod pomiaru właściwości termofizycznych. Istnieją oczywiście alternatywne możliwości zastosowania np. systemów PXI lub VXI (por. np. [15]) z kartami przyrządów, zamiast przyrządów integralnych. Wydają się jednak one być bardziej użytecznymi w przypadku specjalistycznych ośrodków typowo pomiarowych, dużych ośrodków badań specjalizowanych i w przemyśle.

LITERATURA

- [1] W. Bobak, A. J. Panas: Badania rozszerzalności liniowej ciał stałych zmodyfikowaną metodą interferencyjną. Biul. WAT, nr 10 (410), 1986, str. 89-97.
- [2] G. J. Burkhart, C. Meingast: *High-resolution thermal expansion of superconducting fullerenes A_3C_{60} ($A=K,Rb$)*. Phys. Rev. B, v. 54, No 10, 1996, R6865-68.
- [3] R. S. Krishnan, R. Srinivasan, S. Devanarayanan: *Thermal Expansion of Crystals*. Pergamon Press, Oxford, 1979.
- [4] L. Michalski, K. Eckersdorf: *Pomiary temperatury*. WNT, Warszawa 1986.
- [5] K.D. Maglič, A. Cezairliyan and V.E. Peletsky, eds.: *Compendium of Thermophysical Property Measurement Methods*. Plenum Press, New York, 1984.
- [6] S. I. Nowikowa: *Tieplotwoje razsziroenije twiordych tiel*. Nauka, Moskwa, 1974.
- [7] W. Nowakowski i inni: *Systemy interfejsu w miernictwie*. WKiŁ, Warszawa 1987.
- [8] A. J. Panas: *Thermal linear expansion measurement by the interferencial method with the use of the microcomputer for the data accumulation and processing*. IMEKO Symposium on Microcomputers in Temperature and Thermal Measurement, Łódź, 1989, 158-168.
- [9] A. J. Panas: *Pomiary rozszerzalności cieplnej ciał stałych*. Zeszyty Naukowe Pol. Łódzkiej, Nr 606/101, Łódź, 1991, str. 213 ÷ 239.
- [10] A. J. Panas: *Analysis of Selected Components of the Interferometric CLTE Measurement Error by Means of Numerical Simulation*. Journal of Technical Physics, No 3, v. XXXVI, 1995, str. 235-252.
- [11] A. J. Panas: *Badania charakterystyk termicznych właściwości termofizycznych - opracowanie sygnału termicznego*. Mat. IX Sympozjum Wymiany Ciepła i Masy PAN, Augustów, 1995, str. 143-152.
- [12] A. J. Panas: *The High Thermal Resolution Dilatometric Investigation of the Phase Transitions in the Binary Fe-Ni Alloys*. 14th European Conference on Thermophysical Properties, Lyon-Villeurbanne, 1996, p. 218.
- [13] A. J. Panas: *Wide temperature range dilatometric investigations of the phase transitions in solids by laser interferometry*. Proc. of the 6th International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science TEMPMEKO'96, Turyn, 1997.
- [14] A. J. Panas: *Modernizacja i przystosowanie interferencyjnego stanowiska dylatometrycznego do dynamicznych badań charakterystyk termicznych rozszerzalności liniowej w zakresie od 300 do 1400 K*. Sprawozdanie z wykonania projektu badawczego KBN 220/T10/96/11, WAT, Warszawa 1997.

- [15] C. Puls, A. Patel: *PXI - The new PC Platform for Measurement and Automation*. Instrumentation Newsletter, v. 9, no. 4, Winter 1997/1998, 3-4.
- [16] J. Terpiłowski, A. Panas: *Badania własności termofizycznych materiałów konstrukcyjnych silnika*. Sprawozdanie z pracy realizowanej w ramach Projektu Badawczego Zamawianego 041-07 pt. Opracowanie metod i urządzeń do badania trwałości i niezawodności lotniczych silników turbinowych. WAT, Warszawa. 1997.
- [17] G. H. White, R. B. Roberts: *Problems in presenting key values: linear expansivity of copper*. High Temp. - High Press., v. 12, 1980, 311-316.
- [18] *Thermal Properties Advert in Materials World: Measurement of Linear Thermal Expansion by Laser Interferometry; Specific Heat Determination by DSC; Thermal Difusivity Measurements; Thermal Properties of thin films and coatings*. AEA Technology plc, Cheshire, UK, 1997.
- [19] *Thermophysical Properties Research Laboratory WWW Internet Page*. <<http://www.tprl.com/tpri.html>>, 2595 Yeager Rd, West Lafayette, IN.