



Badania dyfuzyjności cieplnej materiału fazy wiążącej spieku 90W-7Ni-3Fe

JANUSZ TERPIŁOWSKI, ANDRZEJ JAROSŁAW PANAS,
TOMASZ MAJEWSKI

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechatroniki,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań dyfuzyjności cieplnej stopu 53Ni-23Fe-24W, stanowiącego fazę wiążącą metalu ciężkiego (spieku ciężkiego) 90W-7Ni-3Fe. Pomiary wykonano, korzystając ze zmodyfikowanej metody impulsowej. Zakres temperatury badań obejmował przedział od temperatury pokojowej do około 1100 K. Na podstawie uzyskanych danych pomiarowych opracowano temperaturową charakterystykę dyfuzyjności cieplnej badanego spieku. Prezentowane wyniki są częścią programu badań właściwości termofizycznych spieków wolframowych i stanowią uzupełnienie do wcześniej publikowanych wyników badań rozszerzalności liniowej stopu 53Ni-23Fe-24W.

Słowa kluczowe: dyfuzyjność cieplna, właściwości termofizyczne, ciężkie spieki wolframu, rdzenie amunicji podkalibrowej

Symbole UKD: 620.17

1. Wprowadzenie

Zastosowanie metali ciężkich, m.in. w amunicji podkalibrowej przeciwpancernej, osłonach radiacyjnych, balansach układów żyroskopowych itp., wiąże się z ich specyficznymi właściwościami mechanicznymi. Ta specyfika to połączenie dużej plastyczności z dużymi wartościami gęstości i wytrzymałością oraz łatwością obróbki mechanicznej, a także odpornością na korozję [1, 2, 3].

Przedmiotem badań w niniejszej pracy, jak również w już opublikowanej pracy [4], jest stop 53Ni-23Fe-24W, stanowiący fazę wiążącą metalu ciężkiego 90W-7Ni-3Fe. Celem badań było określenie wybranych parametrów termofizycznych z uwzględnieniem ich zależności od temperatury. Potrzeba przeprowadzenia

badania właściwości cieplno-fizycznych tego stopu była uwarunkowana głównie koniecznością optymalizacji procesów jego wytwarzania. Analiza procesów zachodzących podczas spiekania oraz modelowanie numeryczne i matematyczne zjawisk cząstkowych wymagają uzupełnienia danych literaturowych, dotyczących temperaturowych charakterystyk wybranych parametrów termofizycznych. Niemniej istotne są również względy czysto poznawcze, zarówno z punktu widzenia diagnostyki materiałowej, jak i ze względu na potencjalną możliwość poszerzenia wiedzy dotyczącej modelowania struktur kompozytowych.

Program badań stopu 53Ni-23Fe-24W obejmował pomiary dylatometryczne i grawimetryczne, których wyniki zostały zamieszczone w pracy [4]. W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań dyfuzyjności cieplnej stopu 53Ni-23Fe-24W, a w następnej będą prezentowane wyniki badań mikrokalorymetrycznych.

2. Dyfuzyjność cieplna. Metoda i metodyka badań

Dyfuzyjność cieplna a jest parametrem termofizycznym, który określa, jak „dobrym przewodnikiem ciepła” jest dany materiał w warunkach nieustalanej wymiany ciepła. Im większa jest wartość a danego materiału, tym jest on lepszym przewodnikiem ciepła.

We współczesnej technice różnorodność wykorzystywanych materiałów jest ogromna, a zakres zmian dyfuzyjności cieplnej typowych materiałów konstrukcyjnych zmienia się od 10^{-7} m²/s dla polimetakrylanu metylu (PMM), aż do około 10^{-3} m²/s dla polikrystalicznych grafitów. Z przewodnością cieplną λ , gęstością ρ i ciepłem właściwym c_p dyfuzyjność cieplna jest związana zależnością: $\lambda = a\rho c_p$.

Aktualnie, w przypadku ciał stałych, pomiar dyfuzyjności cieplnej odbywa się najczęściej metodami impulsowymi [5, 6, 7], a najpopularniejszą metodą określania tej wielkości jest klasyczna impulsowa metoda Parkera [8] i jej mutacje [7, 10, 11, 13].

W niniejszej pracy do pomiaru dyfuzyjności cieplnej stopu 53Ni-23Fe-24W zastosowano opracowaną w WAT zmodyfikowaną metodę impulsową [10], która jest ulepszoną wersją metody Parkera i polega na:

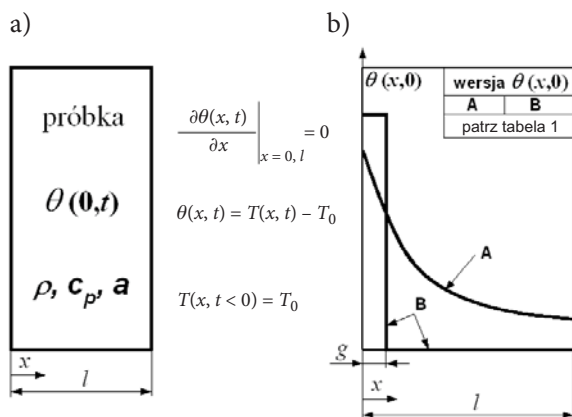
- wytworzeniu na powierzchni czołowej płaskorównoległej, adiabatycznej próbki powierzchniowego źródła ciepła (lampa błyskowa, laser impulsowy) i rejestracji (poczynając od tego momentu) zmian różnicy temperatury $\Delta\Theta(t) = T_1(t) - T_2(t)$ między przednią a tylną powierzchnią badanej próbki;
- uzyskaniu rozwiązania teoretycznego problemu w postaci zmiany różnicy temperatury na skrajnych powierzchniach próbki $\Delta\Theta(t) = T_1(t) - T_2(t)$;
- identyfikacji odpowiedniej krzywej ze zbioru będącego rozwiązaniem teoretycznym problemu z krzywą eksperymentalną, przy czym parametrem

podlegającym zmianie w procesie identyfikacji jest poszukiwana wartość dyfuzyjności cieplnej.

Przedstawione w [14, 15] wyniki badań porównawczych wyznaczania dyfuzyjności cieplnej zmodyfikowaną metodą impulsową i klasyczną metodą Parkera dowiodły, że ta pierwsza metoda zapewnia znacznie większą dokładność pomiarów. Całkowity błąd pomiaru — uwzględniający wpływ strat ciepła z obu powierzchni próbki, błąd pomiaru jej grubości i fluktuacje sygnału pomiarowego z tytułu szumów termicznych i zewnętrznych zakłóceń elektromagnetycznych — został oszacowany jako mniejszy od 3% w przypadku zmodyfikowanej metody impulsowej i wynoszący około 10% dla klasycznej metody Parkera.

2.1. Opis metody pomiaru

W przypadku materiałów zarówno nieprzezroczystych, jak i półprzezroczystych dla impulsu promieniowania laserowego może być zastosowany zmodyfikowany model wymiany ciepła pokazany na rysunku 1.



Rys. 1. Model wymiany ciepła w nieprzezroczystych i półprzezroczystych dla promieniowania laserowego próbkach: a) układ współrzędnych i warunki brzegowe; b) warunki początkowe (A — próbka półprzezroczysta, B — próbka nieprzezroczysta)

Teoretyczny rozkład temperatury $\Theta(x, t) = T(x, t) - T_0$ w próbce ($0 < x \leq l$), przy założeniu, że w chwili $t = 0$ próbka absorbuje energię impulsu laserowego o gęstości powierzchniowej I_0 , otrzymuje się poprzez rozwiązanie równania Fouriera:

$$a \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} = \frac{\partial \Theta}{\partial t} \quad (1)$$

przy warunkach brzegowych:

$$\frac{\partial \Theta(0,t)}{\partial x} = \frac{\partial \Theta(l,t)}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

i warunku początkowym $\Theta(x, t = 0)$ wewnątrz próbki po strzale z lasera. W zależności od tego, czy badana próbka jest półprzezroczysta, czy też nieprzezroczysta dla impulsu promieniowania laserowego, warunek początkowy może mieć postacie pokazane na rysunku 1b), a którego postacie analityczne przedstawiono również w tabeli 1.

TABELA 1

Warunek początkowy $\Theta(x, 0)$ w zależności od wartości monochromatycznych współczynników transmisji $\alpha(\lambda)$ i odbicia $r(\lambda)$ dla długości fali λ promieniowania impulsu laserowego materiału badanej próbki [10]

Wersja A (próbka półprzezroczysta)	Wersja B (próbka nieprzezroczysta)
$\Theta(x, 0) = \left(\frac{\alpha I_0}{\rho c_p} \right) \frac{e^{-\alpha x} + r e^{-2\alpha l} e^{\alpha x}}{1 - (r e^{-\alpha l})^2}$	$\Theta(x, 0) = \begin{cases} = I_0 / (\rho c_p g), & \text{dla } 0 \leq x \leq g \ll l \\ = 0, & \text{dla } g < x \leq l \end{cases}$

Ogólne rozwiązanie jednowymiarowego równania Fouriera (1) z warunkami brzegowymi (2) i znanym początkowym rozkładzie temperatury $\Theta(x, 0)$ zostało podane przez Carlsława i Jaegera [9] w postaci:

$$\Theta(x, t) = \frac{1}{l} \int_0^l \Theta(x', 0) dx' + \frac{2}{l} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-n^2 \frac{t}{\tau}} \cos \frac{n\pi x}{l} \int_0^l \Theta(x', 0) \cos \frac{n\pi x'}{l} dx', \quad (3)$$

gdzie:

$$\tau = l^2 / (\pi^2 a) \quad (4)$$

jest czasem charakterystycznym.

Dyfuzyjność cieplną a określa się na podstawie pomiaru różnicy temperatury $\Delta \Theta(t)$ między skrajnymi powierzchniami ($x = 0, x = l$) płaskorównoległej i adiabatycznej próbki, po strzale z lasera w jej powierzchnię czołową. Zgodnie z rozwiązaniem teoretycznym problemu (3) jest:

$$\begin{aligned}\Delta\Theta(t) &= \Theta(0,t) - \Theta(l,t) = \\ &= \frac{2}{l} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-n^2 \frac{t}{\tau}} [1 - (-1)^n] \int_0^l \Theta(x',0) \cos \frac{n\pi x'}{l} dx' = \\ &= \frac{4}{l} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-(2n-1)^2 \frac{t}{\tau}} \int_0^l \Theta(x',0) \cos \frac{(2n-1)\pi x'}{l} dx'.\end{aligned}\quad (5)$$

Po pominięciu w szeregu (5) wyrazów o $n > 1$, otrzymuje się:

$$\Delta\Theta(t) = \frac{4}{l} \left[\int_0^l \Theta(x',0) \cos \frac{\pi x'}{l} dx' \right] e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (6)$$

Błąd, jaki się popełnia z tytułu zastąpienia (5) przez (6) nie przekracza 1%, jeżeli $t/\tau > 0,58$.

Aby określić dyfuzyjność cieplną a na podstawie zarejestrowanych w trakcie eksperymentu przebiegów zmian różnicy temperatury $\Delta\Theta(t)$, należy wziąć pod uwagę tylko ten ich fragment, który jest opisany równaniem (6) i wyznaczyć optymalne wartości czasu charakterystycznego τ i przyrostu temperatury Θ'_{∞} . W tym celu należy:

- zlogarytmować teoretyczną zależność (6), w wyniku czego, otrzymujemy:

$$y = \ln \Delta\Theta(t) = \ln 4\Theta'_{\infty} - \frac{t}{\tau}, \quad (7)$$

gdzie:

$$\Theta'_{\infty} = \frac{1}{l} \left[\int_0^l \Theta(x',0) \cos \frac{\pi x'}{l} dx' \right] \quad (8)$$

jest przyrostem temperatury próbki po ustaniu procesu przejściowego związanego z oddziaływaniem na nią impulsu promieniowania laserowego;

- zlogarytmować (punkt po punkcie) przebieg eksperymentalny $\Delta\Theta(t)$, a następnie wybrać na osi czasu takie wartości t_1 i t_2 , aby leżały one w liniowym zakresie zmian funkcji $y = \ln \Delta\Theta(t)$. Obliczony metodą najmniejszych kwadratów współczynnik kierunkowy prostej poprowadzonej przez te punkty ($t_1 \leq t \leq t_2$) jest równy τ^{-1} , a przecięcie się tej prostej z osią rzędnych pozwala wyznaczyć, daną przez (8), wartość Θ'_{∞} ;
- sprawdzić, czy jest spełnione kryterium:

$$\left[\sum_{t_1 \leq t_i \leq t_2} (\Delta\Theta(t_i) - \Delta\Theta'(t_i))^2 \right]^{0,5} = \text{minimum} \quad (9)$$

odpowiadające minimum pierwiastka kwadratowego z sum kwadratów dyskretnych wartości różnic temperatury między skrajnymi powierzchniami próbki (krok po kroku) — teoretyczną $\Delta\Theta(t_i)$ i eksperymentalną $\Delta\Theta'(t_i)$. W zależności (9) dla każdej dyskretniej wartości czasu t_i wartość $\Delta\Theta(t_i)$ oblicza się z zależności (5) na podstawie powyżej określonych eksperymentalnie wartości τ i Θ'_∞ , a $\Delta\Theta'(t_i)$ przyjmuje się bezpośrednio z eksperymentu. Minimum wartości wyrażenia (9) poszukuje się ze względu na położenia t_1 i t_2 na osi odciętych oraz poziomu odniesienia sygnału $\Delta\Theta'(t)$. Procedurę jak wyżej powtarza się ze zmianą wartości tych parametrów. Proces ten zatrzymuje się wówczas, kiedy zostanie osiągnięta satysfakcjonująca zgodność między krzywą teoretyczną $\Delta\Theta(t)$ a uzyskaną na drodze eksperymentu $\Delta\Theta'(t)$;

- wyznaczona wartość τ pozwala obliczyć dyfuzyjność cieplną z zależności:

$$a = \frac{l^2}{\pi^2 \tau}. \quad (10)$$

Jeżeli badana próbka jest nieprzezroczysta dla promieniowania laserowego, czyli gdy $al \rightarrow \infty$, to wtedy zależność (5) przyjmuje postać

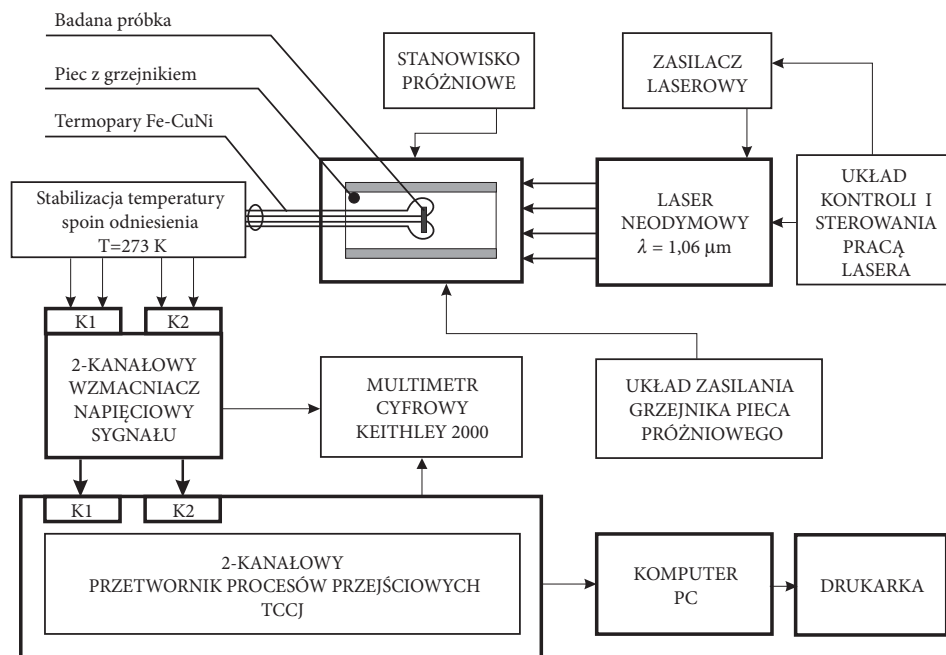
$$\Delta\Theta(t) = 4\Theta_\infty \sum_{n=1}^{\infty} e^{-(2n-1)^2 \frac{t}{\tau}}, \quad (11)$$

przy czym Θ_∞ jest przyrostem temperatury w objętości badanej próbki po wyrównaniu temperatury na jej skrajnych powierzchniach. Zależność (11) otrzymuje się również po podstawieniu do (6) typowego dla klasycznej metody impulsowej określania dyfuzyjności cieplnej [8], rozkładu temperatury początkowej (rys. 1b — wariant B, tab. 1) w adiabatycznej próbce.

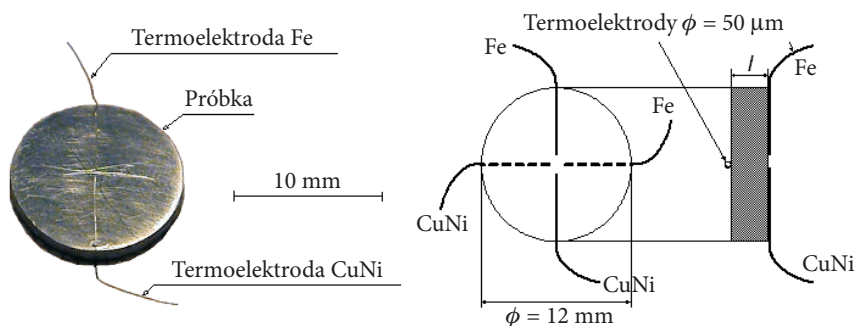
2.2. Stanowisko badawcze i warunki poprawnego przeprowadzenia eksperymentu

Schemat blokowy stanowiska do pomiaru dyfuzyjności cieplnej jest pokazany na rysunku 2. Specjalna konstrukcja trzymaka próbki oraz utrzymywana w piecu próżnia 10^{-4} Pa mają na celu minimalizację strat ciepła do otoczenia przez konwekcję i przewodzenie.

Jako impulsowe źródło ciepła zastosowano laser neodymowy. Czas trwania impulsu laserowego jest mniejszy od 1 ms, a jego energię można zmieniać w zakresie $5 \div 15$ J, przy średnicy wiązki promieniowania około 14 mm. Do pomiaru temperatury próbki przed strzałem i po strzale z lasera stosuje się odpowiednie termoelementy, których gorące spoiny są zgrzane do czołowej i tylnej powierzchni próbki.



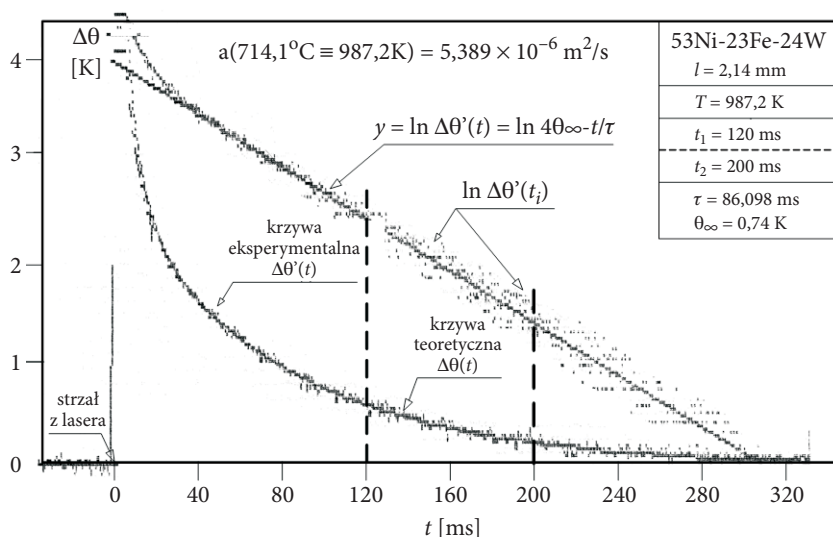
Rys. 2. Schemat blokowy stanowiska do pomiaru dyfuzyjności cieplnej ciał stałych



Rys. 3. Widok ogólny badanej próbki wraz ze zgrzanymi do jej powierzchni czołowej termoelektrodami oraz jej wymiary gabarytowe

Widok ogólny przykładowej próbki wraz ze zgrzanymi do jej powierzchni termoelektrodami, niezbędnymi do pomiaru ustalonej temperatury próbki tuż przed strzałem z lasera w jej powierzchnię czołową oraz zmiany różnicy temperatury na jej skrajnych powierzchniach tuż po strzale z lasera pokazano na rysunku 3. Do pomiaru temperatury zastosowano w tym przypadku termoelementy typu J (Fe-CuNi).

Wyznaczanie wartości dyfuzyjności cieplnej badanej próbki następuje w wyniku procesu identyfikacji odpowiedniej krzywej ze zbioru rozwiązań teoretycznych z przebiegiem doświadczalnym, przy wykorzystaniu odpowiedniego programu na komputer PC. Przykładowy wydruk wyniku procesu identyfikacji pokazano na rysunku 4.



Rys. 4. Przykładowy wydruk wyniku procesu identyfikacji krzywej eksperymentalnej z jedną z krzywych należących do zbioru (11) rozwiązań teoretycznych problemu

4. Wyniki i opracowanie wyników badań

Dyfuzyjność cieplną stopu 53Ni-23Fe-24W badano dla pojedynczej próbki wykonanej w Instytucie Techniki Uzbrojenia WAT, metodą opisaną w publikacji [4]. Próbka miała kształt walca o grubości $l = 2,14 \text{ mm}$ i średnicy $d = 12 \text{ mm}$. Pomiarów wykonano na stanowisku pomiarowym przedstawionym na rysunku 2.

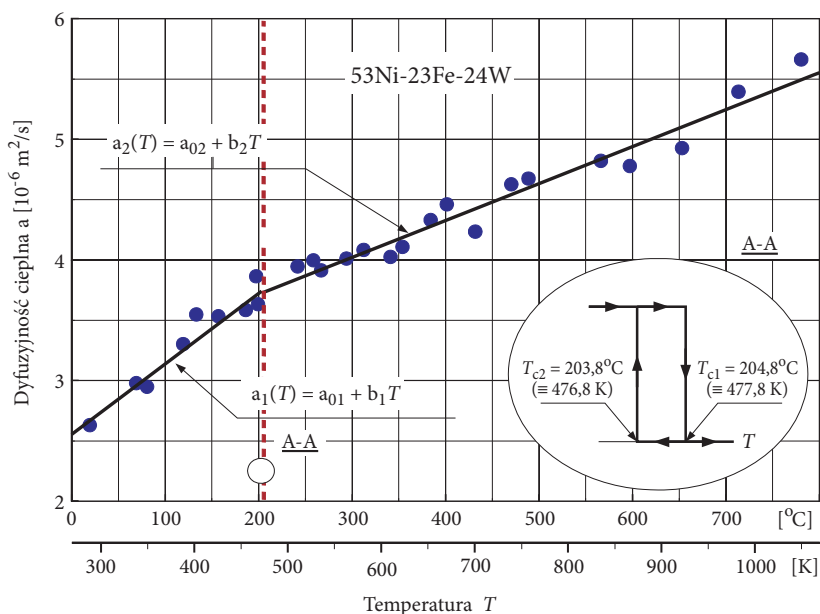
Wyniki badań dyfuzyjności cieplnej stopu 53Ni-23Fe-24W w przedziale temperatury od pokojowej do około 1100 K przedstawiono w tabeli 2 i na rysunku 5.

Przebieg zmian charakterystyki $a(T)$ aproksymowano za pomocą dwóch odcinków prostych również pokazanych na rysunku 5a, ich postaci analityczne zamieszczono w tabeli 3.

TABELA 2

Wyniki badań dyfuzyjności cieplnej stopu 53Ni-23Fe-24W

T [°C]	T [K]	a [$10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$]	T [°C]	T [K]	a [$10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$]
20,05	293,05	2,626	313,01	586,01	4,079
69,62	342,62	2,974	341,87	614,87	4,020
81,17	354,17	2,945	354,49	627,49	4,104
119,98	392,98	3,298	384,78	657,78	4,326
133,93	406,93	3,543	402,07	675,07	4,456
157,69	430,69	3,528	432,48	705,48	4,229
186,99	459,99	3,580	471,07	744,07	4,622
198,06	471,06	3,860	489,49	762,49	4,669
200,06	473,06	3,628	566,88	839,88	4,817
242,42	515,42	3,941	597,82	870,82	4,774
259,22	532,22	3,992	653,68	926,68	4,923
267,53	540,53	3,909	714,10	987,10	5,389
294,79	567,79	4,007	781,34	1054,34	5,657



Rys. 5. Wyniki badań dyfuzyjności cieplnej stopu 53Ni-23Fe-24W wraz z ich aproksymacją za pomocą dwóch odcinków prostej dla $T < \bar{T}_c$ i $T > \bar{T}_c$ ($\bar{T}_c = 0,5(T_{c1} + T_{c2})$), a wartości a_{0i} oraz b_i podano w tabeli 3) oraz wyniki badań położenia i szerokości pętli histerezy (rys. 6)

TABELA 3

Równania odcinków prostych aproksymujących przebieg zmian dyfuzyjności cieplnej stopu 53Ni-23Fe-24W

$a_i(T) = a_{0i} + b_i T$	
Skala Kelwina	Skala Celsjusza
$a_1[T(K)] = [0,8901 + 6,047 \cdot 10^{-3} T(K)] \cdot 10^{-6}$ dla $273 \text{ K} \leq T \leq \bar{T}_c = 477,4 \text{ K}$	$a_1[T(^{\circ}\text{C})] = [2,5418 + 6,047 \cdot 10^{-3} T(^{\circ}\text{C})] \cdot 10^{-6}$ dla $0^{\circ}\text{C} \leq T \leq \bar{T}_c = 204,3^{\circ}\text{C}$
$a_2[T(K)] = [2,316 + 3,061 \cdot 10^{-3} T(K)] \cdot 10^{-6}$ dla $\bar{T}_c = 477,4 \text{ K} \leq T \leq 1073 \text{ K}$	$a_2[T(^{\circ}\text{C})] = [3,1521 + 3,061 \cdot 10^{-3} T(^{\circ}\text{C})] \cdot 10^{-6}$ dla $\bar{T}_c = 204,3^{\circ}\text{C} \leq T \leq 800^{\circ}\text{C}$

Temperaturę próbki i różnicę temperatury na skrajnych powierzchniach próbki po strzale z lasera mierzono termoelementami Fe-CuNi (typ J).

Błąd, jaki się popełnia przy pomiarze dyfuzyjności cieplnej zmodyfikowaną metodą impulsową szacowano na podstawie zależności (10) i jest on równy:

$$\left| \frac{\Delta a}{a} \right| = 2 \left| \frac{\Delta l}{l} \right| + \left| \frac{\Delta \tau}{\tau} \right|, \quad (12)$$

gdzie: Δl — błąd pomiaru grubości próbki;

$\Delta \tau$ — błąd związany z wyznaczeniem czasu charakterystycznego.

W zależności (12), $|\Delta \tau / \tau|$ jest sumą błędów:

$$\left| \frac{\Delta \tau}{\tau} \right| = \left| \frac{\Delta \tau'}{\tau} \right| + \left| \frac{\Delta \tau_l}{\tau} \right|, \quad (13)$$

gdzie: $\Delta \tau'$ — błąd średni kwadratowy określania czasu charakterystycznego τ' w przedziale czasu $t_1 \div t_2$;

$\Delta \tau_l$ — błąd wyznaczania czasu charakterystycznego τ związany ze stratami ciepła z obu powierzchni badanej próbki.

Błąd pomiaru związany z pomiarem grubości próbki zależy od grubości próbki i został oszacowany jako równy $2|\Delta l / l| \cong 0,95 \cdot 10^{-2}$, przy czym przyjęto, że $l = 2,14 \text{ mm}$ i $\Delta l = 10^{-2} \text{ mm}$. Natomiast składnik błędu względnego $|\Delta \tau / \tau|$ dopełnianego z tytułu określenia czasu charakterystycznego τ określa się jako sumę:

— składnika $|\Delta \tau' / \tau|$, związanego z fluktuacjami sygnału pomiarowego w przedziale czasu $t_1 \div t_2$ i wyznacza się go drogą obróbki numerycznej

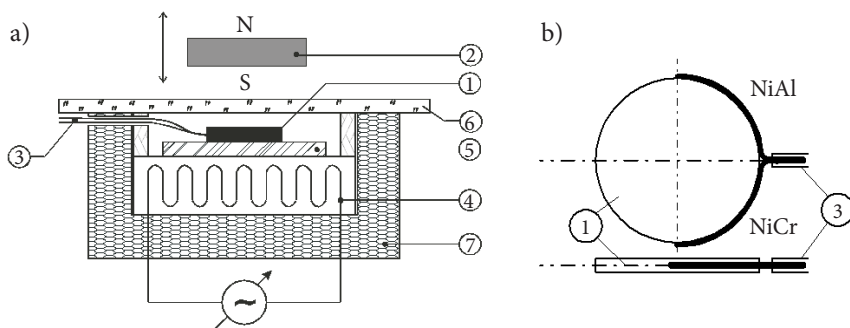
sygnału $\Delta\Theta'(t)$ zarejestrowanego w pamięci przetwornika procesów przejściowych. Błąd ten podczas wszystkich pomiarów był mniejszy od $|\Delta\tau / \tau| \leq 0,25 \cdot 10^{-2}$;

- oraz drugiego składnika błędu $|\Delta\tau_i / \tau|$ określania czasu charakterystycznego τ , popełnianego z tytułu strat ciepła z obu powierzchni badanej próbki. Na podstawie [14, 15] oszacowano, że jest mniejszy od 10^{-2} .

Przy starannej realizacji eksperymentu, a w tym przypadku miało to miejsce, podczas wszystkich pomiarów, całkowity błąd $|\Delta a / a|$ wyznaczania dyfuzyjności cieplnej został oszacowany jako mniejszy od 3%.

Ponieważ przed badaniami dyfuzyjności cieplnej stwierdzono, że próbka jest materiałem ferromagnetycznym, należało się spodziewać wystąpienia przejścia fazowego II rodzaju w punkcie Curie. Niestety w przyjętym do badań zakresie temperatury (od pokojowej do około 1100 K) i przy wybranych dyskretnych wartościach temperatury, w których dokonywano pomiarów dyfuzyjności cieplnej nie udało się go bezpośrednio zidentyfikować. Natomiast dokonano próby zgrubnej lokalizacji tego przejścia fazowego,

Wstępne badania położenia punktu Curie w funkcji temperatury $T_C(T)$ przeprowadzono na stanowisku pomiarowym jak na rysunku 6 [16]. Do badań użyto tej samej próbki co w badaniach dyfuzyjności cieplnej ($\varphi = 12$ mm, grubość — 2,14 mm). Temperaturę próbki mierzono termoelementami NiCr-NiAl, których termoelektrody zgrzano elektrycznie z boczną powierzchnią badanej próbki (rys. 6b). Temperaturę Curie T_C identyfikowano drogą próbkowania stanu próbki (ferromagnetyk lub paramagnetyk) za pomocą magnesu \odot , w trakcie kolejnych cykli jej grzania i chłodzenia. Z wstępnego badania położenia punktu Curie stopu 53Ni-23Fe-24W otrzymano, że $T_{C1}(T\uparrow) = 204,8^\circ\text{C} (\equiv 477,8\text{ K})$ oraz $T_{C2}(T\downarrow) = 203,8^\circ\text{C} (\equiv 476,8\text{ K})$, co pokazano na rysunku 5.



Rys. 6. Stanowisko laboratoryjne do badań położenia punktu Curie T_C stopów Fe-Ni: a) schemat stanowiska; b) lokalizacja termoelektrod na bocznej powierzchni próbki. **Objaśnienia:** 1 — badana próbka, 2 — magnes, 3 — termoelement, 4 — grzejnik, 5 — płytka miedziana (1,3 mm), 6 — płytka szklana (1 mm), 7 — izolacja

5. Podsumowanie i wnioski

Do wyznaczania dyfuzyjności cieplnej trójskładnikowego stopu 53Ni-23Fe-24W wykorzystano opracowaną w WAT zmodyfikowaną metodę impulsową, rozszerzając zakres jej praktycznych zastosowań na materiały ferromagnetyczne.

Na podstawie przeprowadzonych badań dyfuzyjności cieplnej stopu 53Ni-23Fe-24W można stwierdzić, że w przedziale temperatury od pokojowej do około 1100 K:

- dyfuzyjność cieplna tego stopu rośnie ze wzrostem temperatury od około $2,5 \cdot 10^{-6}$ m²/s do około $5,6 \cdot 10^{-6}$ m²/s, a jej charakterystyka temperaturowa może być aproksymowana za pomocą dwóch odcinków prostych, o różnym nachyleniu, przecinających się w punkcie Curie, pokazanych na rysunku 5;
- na podstawie wyznaczonych eksperymentalnie dyskretnych wartości dyfuzyjności cieplnej $a(T_i)$, w przyjętym do badań zakresie temperatury, nie było możliwym bezpośrednio zlokalizowanie punktu Curie (T_C), mimo iż przed badaniami dyfuzyjności cieplnej stwierdzono, że próbka jest ferromagnetykiem. Dopiero dodatkowe, niezależne badania, umożliwiły lokalizację tego przejścia, w postaci bardzo wąskiej pętli histerezy, tj. $T_{C1}(T \uparrow) = 204,8^\circ\text{C}$ ($\equiv 477,8$ K) i $T_{C2}(T \downarrow) = 203,8^\circ\text{C}$ ($\equiv 476,8$ K);
- nieregularny przebieg charakterystyki dyfuzyjności cieplnej badanego materiału jest odzwierciedleniem aktualnej struktury materiału próbki, która zależy od tego, co się działo z próbką przed pomiarem (historia cieplna próbki) oraz, być może, niezidentyfikowanych przejść fazowych innych niż przejście w punkcie Curie.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2006-2010 jako projekt badawczy rozwojowy nr R 00 024 02.

Artykuł wpłynął do redakcji 24.10.2008 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w lutym 2009 r.

LITERATURA

- [1] A. UPADHYAYA, *Materials Chemistry and Physics*, 67, 2001, 101-110.
- [2] Y. YANG, H. LIANXI, W. ERDE, *Materials Science and Engineering A*, 435-436, 2006, 620-624.
- [3] E. FORTUNA, K. SIKORSKI, K. J. KURZYDŁOWSKI, *Materials Characterization*, 52, 2004, 323-329.
- [4] A. J. PANAS, J. TERPIŁOWSKI, T. MAJEWSKI, *Badania rozszerzalności liniowej materiału fazy wiążącej spieku 90W-7Ni-3Fe*, Biul. WAT, vol. 57, 3, 2008, 361-380.
- [5] F. RIGHINI, A. CEZAIYLIYAN, *Pulse method of thermal diffusivity measurement* (a review), High Temp.-High Pres, 5, 1973, 481-501.

- [6] R. E. TAYLOR, K. D. MAGLIĆ, III. *Thermal diffusivity measurement methods*, in: Compendium of Thermophysical Property Measurement Method, ed. Maglić K. D., Plenum Press, New York, 1984, 299-336.
- [7] L. VOZÁR, W. HOHENAUER, *Flash method of measuring the thermal diffusivity* (a review), Proceedings — 16th European Conference on Thermophysical Properties, Imperial College, London, 2002, (CD), 1-25.
- [8] W. J. PARKER, R. J. JENKINS, C. P. BUTLER, G. L. ABBOT, *Flash method of determining thermal diffusivity heat capacity and thermal conductivity*, Journal of Appl. Phys., 32, 1961, 1679-1685.
- [9] H. S. CARSLAW, I. C. JAEGER, *Conduction of Heat in Solids*, Oxford University Press, Oxford, 1959, 18-20, 28, 32-33, 97-108.
- [10] J. TERPIŁOWSKI, *A pulse method for determining the thermal diffusivity of solids by measuring the temperature difference between the extreme surfaces of the sample*, Journal of Technical Physics, 25, 3-4, 1984, 429-439.
- [11] J. TERPIŁOWSKI, *A modified flash method for determination of thermal diffusivity in solids*, Archives of Thermodynamics, 24, 1, 2003, 59-80.
- [12] J. TERPIŁOWSKI, *A modified flash method for determination of thermal diffusivity in semitransparent solids exposed to laser radiation*, Archives of Thermodynamics, 25, 2, 2004, 39-68.
- [13] A. J. PANAS, S. CUDZIŁO, J. TERPIŁOWSKI, *Investigation of the thermophysical properties of metal-politetrafluoroethylene Pyrotechnic Compositions*, High Temperature-High Pressure, 34, 2002, 691-698.
- [14] J. TERPIŁOWSKI, J. PIOTROWSKA-WORONIAK, G. WORONIAK, *Porównanie klasycznej i zmodyfikowanej metody impulsowej do wyznaczania dyfuzyjności cieplnej metali na przykładzie żelaza elektrolitycznego; część I. Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*, 1, 2007, 17-21.
- [15] J. TERPIŁOWSKI, J. PIOTROWSKA-WORONIAK, G. WORONIAK, *Porównanie klasycznej i zmodyfikowanej metody impulsowej do wyznaczania dyfuzyjności cieplnej metali na przykładzie żelaza elektrolitycznego; część II. Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*, 2, 2007, 15-19.
- [16] J. TERPIŁOWSKI, G. WORONIAK, *Zastosowanie zmodyfikowanej metody impulsowej do badań dyfuzyjności cieplnej inwarowych stopów Fe-Ni*, Termodynamika w nauce i gospodarce, t. 2, 455-460, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.

J. TERPIŁOWSKI, A. J. PANAS, T. MAJEWSKI

Thermal diffusivity investigation of matrix phase of 90W-7Ni-3Fe sintered alloy

Abstract. The paper presents the results of thermal diffusivity investigations of 53Ni-23Fe-24W alloy. The alloy is a matrix phase of a 90W-7Ni-3Fe tungsten heavy alloy (WHA) fabricated by liquid phase sintering. A modified pulse method was used for measurement. The temperature range was between room temperature and 1100 K. The measurement data was the basis to determine the temperature characteristic of the thermal diffusivity of the investigated alloy. The presented results are part of a tungsten heavy alloys thermophysical properties research program. They complement results of previous studies of linear expansion of 53Ni-23Fe-24W alloy.

Keywords: thermal diffusivity, thermophysical properties, tungsten heavy alloys, cores of subcaliber ammunition

Universal Decimal Classification: 620.17

