



Marcin Madej*, Jan Leżański, Tadeusz Telejko

Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Poland

* Corresponding author. E-mail: meydey@onet.pl

Otrzymano (Received) 08.02.2008

PRZEWODNOŚĆ CIEPLNA KOMPOZYTÓW W-Ag, Mo-Ag, Fe-Ag

Czynnikami mającymi decydujący wpływ na wybór materiału na styki elektryczne są: napięcie powstawania łuku, odporność na szepianie w łuku elektrycznym, rodzaj prądu (stały lub zmienny), niski opór elektryczny styku, dobra przewodność elektryczna, dobra przewodność cieplna, odporność na erozję i odporność na korozję. Powyższe wymagania odnośnie do materiałów na styki wysokoprądowe mogą zapewnić kompozyty powstałe w wyniku kombinacji składników wysokotopliwych, jak wolfram lub molibden, a w niektórych przypadkach żelazo oraz składników dobrze przewodzących prąd i ciepło, jak srebro lub miedź. Z proszków wolframu, molibdenu i żelaza prowadzono w temperaturze $T_i = 1200^\circ\text{C}$ w czasie $t_i = 60$ min w atmosferze wodorowej. Do oznaczenia przewodności cieplnej kompozytów W-40%Ag, Mo-40%Ag, Fe-40%Ag wytworzonych metodą infiltracji zastosowano metodę wykorzystującą rozwiązania współczynnika odwrotnego przewodzenia ciepła. Metoda wymaga eksperymentalnego wyznaczenia pola temperatury w wybranych punktach próbki podczas jej nagrzewania lub chłodzenia. Po założeniu postaci funkcji, opisującej zależność przewodności cieplnej od temperatury, wyznacza się jej współczynniki, minimalizując uprzednio zdefiniowaną normę błędów, określającą zbieżność pól temperatury: otrzymanego w wyniku eksperymentu i na podstawie obliczeń optymalizacyjnych. Stanowisko pomiarowe zaprojektowano w taki sposób, by spełniać wymagania dotyczące założeń, które zostały przyjęte na etapie budowy modelu matematycznego procesu. Próbkę badanego materiału stanowi pręt o przekroju prostokątnym o wymiarach około $4 \times 4 \times 40$ mm. W równych odległościach od siebie nawiercono otwory o średnicy 0,5 mm w taki sposób, by ich końce znajdowały się w osi próbki. W otworach umieszczono termoelementy płaszczyznowe typu K o średnicy zewnętrznej płaszcza 0,5 mm, które służyły do pomiaru temperatury. Próbkę z czujnikami temperatury wsunęto do kwarcowej rury pokrytej od wewnątrz i na zewnątrz złotem. Rurę zaizolowano na zewnątrz kilkumilimetrową warstwą włóknistego materiału izolacyjnego. Źródło ciepła stanowi lampa łukowa o regulowanej mocy, której promieniowanie kierowane jest za pomocą układu zwierciadeł na powierzchni czołową próbkę. Przeprowadzono pomiary przewodności próbek wykonanych z kompozytów W-40%Ag, Mo-40%Ag oraz Fe-40%Ag. Dla każdej z próbek wykonano po kilka serii pomiarowych. Temperaturę rejestrowano z krokiem równym 0,02 s. W opracowaniu przedstawiono metodykę i wyniki badań przewodności cieplnej infiltrowanych kompozytów W-Ag, Mo-Ag w zakresie temperatur od temperatury pokojowej do $700+720^\circ\text{C}$, a kompozytów Fe-Ag w zakresie do 950°C . Stwierdzono istotny wpływ rodzaju składnika umacniającego i temperatury pomiaru na przewodność cieplną kompozytów. Uzyskano dużą zgodność wyników pomiarów i obliczeń w kolejnych seriach pomiarowych.

Słowa kluczowe: proszek, spiek, infiltracja, kompozyt, przewodność cieplna

THE THERMAL CONDUCTIVITY OF COMPOSITES W-Ag, Mo-Ag, Fe-Ag

To solve the heat conduction equation we need to know geometry of the conducting body, its thermo-physical properties, the distribution of internal heat sources or sinks (if existing) as well as the initial and boundary conditions. The accuracy of the determination of those unknown quantities strongly influence the result of final temperature field calculations. The heat conduction equation should also take into consideration the heat effect of the phase transformation if the heating or cooling of steel is analyzed. Therefore, the determination of latent heat of phase transformation and thermal properties of the material are of great importance. Thermal conductivity can be measured in any apparatus which supplies the specified boundary condition to a particular solution of heat conduction equation in Cartesian, cylindrical or spherical coordinates. The thermal diffusivity can be therefore evaluated from this method if the temperature measurements inside the body are provided. Next, the thermal conductivity λ can be calculated when the density ρ and the heat capacity c_p are known. Since the temperature in the body can vary with time, the methods based on this method belong to the non-stationary ones. Some of those methods have been described in literature. The presented methods of thermal conductivity determination have been based on the solutions, which assume that the thermo-physical parameters do not depend on temperature. It is impossible to obtain a closed form solution to the heat conduction equation if the thermal diffusivity varies with temperature, even for the one-dimensional case. Those methods are therefore limited to narrow temperature intervals, approaching zero. Thus, many experimental tests must be carried out for evaluation of the influence of temperature on the thermal diffusivity or conductivity. The development of numerical methods and computational techniques has stimulated the applications of inverse methods to problems which can be governed by differential equations, including heat conduction. If the boundary conditions for the direct solution of heat conduction problem are unknown, the measurements of temperatures in a sample renders it possible to evaluate the heat conduction by using an inverse technique. The method proposed in the paper allows simultaneous determination of the thermal conductivity. To present the base of the method the following conduction problem is considered that the cylindrical steel sample is uniformly heated at the front surface. The inverse procedure can be performed in the following

steps: accomplishment of the temperature measurements in the selected points of the sample during heating or cooling, determination of the thermal conductivity $\lambda(t)$ and the heat generation qv . The circumferential surface of the sample can be thermally insulated. The method involves some experimental tests and several steps of calculations. In the first test, the sample is heated at the front surface to the temperature above the phase transformation and temperatures in selected points inside the body are measured. The test bench should be designed in the way which gives one-dimensional heat conduction in the body. As a result of an experimental test the temperature field in the sample is obtained. The same experiment must be performed during cooling process of the sample. The heated up cylindrical sample is suddenly cooled at the front surface to the temperature below the phase transformations. Data from these tests are necessary to solve the inverse problem with the use of some additional information including specific heat, density, thermocouple location, etc. Attempts have been made to describe the influence additions powders: tungsten, molybdenum and iron on the thermal conductivity of silver infiltrated composites. The physical and mechanical properties of the investigated composites the thermal conductivities of composites W+40%Ag, Mo+40%Ag and Fe+40%Ag are presented and from the analysis of the obtained results it may be concluded that the thermal conductivity is mainly affected by the used powders (tungsten, molybdenum, iron) and volume of silver and the porosity level.

Keywords: powder, sintered material, infiltration, composites, thermal conductivity

WSTĘP

Czynnikami mającymi decydujący wpływ na wybór materiału na styki elektryczne są: napięcie powstawania łuku, odporność na szepianie w łuku elektrycznym, rodzaj prądu (stały lub zmienny), niski opór elektryczny styku, dobra przewodność elektryczna, dobra przewodność cieplna, odporność na erozję i odporność na korozję [1, 2].

Powyższe wymagania odnośnie do materiałów na styki wysokoprądowe mogą zapewnić kompozyty powstałe w wyniku kombinacji składników wysokotopliwych, jak wolfram lub molibden, a w niektórych przypadkach żelazo oraz składników dobrze przewodzących prąd i ciepło, jak srebro lub miedź [1-8]. Kompozyty przeznaczone na styki wysokoprądowe powinny odznaczać się drobnopiękistą strukturą o równomiernym rozmieszczeniu składników, dużą gęstością względną oraz dobrą spójnością mechaniczną. Często stosowaną metodą wytwarzania takich kompozytów jest infiltracja [8, 9].

Celem niniejszego opracowania jest przedstawienie metodyki oraz wyników badań przewodności cieplnej infiltrowanych kompozytów: W-40%Ag, Mo-40%Ag, Fe-40%Ag z uwzględnieniem wpływu temperatury. Do badań przewodności cieplnej zastosowano metodę wykorzystującą rozwiązanie współczynnikowego problemu odwrotnego przewodzenia ciepła (Inverse Heat Conduction Problem, JHCP) [10].

METODYKA BADAŃ PRZEWODNOŚCI CIEPLNEJ

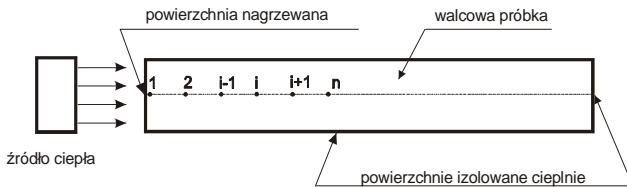
Do oznaczenia przewodności cieplnej kompozytów W-40%Ag, Mo-40%Ag, Fe-40%Ag, wytworzonych metodą infiltracji, zastosowano metodę wykorzystującą rozwiązanie współczynnikowego problemu odwrotnego przewodzenia ciepła. Metoda wymaga eksperymentalnego wyznaczenia pola temperatury w wybranych punktach próbki podczas jej nagrzewania lub chłodzenia. Po założeniu postaci funkcji, opisującej zależność przewodności cieplnej od temperatury, wyznacza się jej

współczynniki, minimalizując uprzednio zdefiniowaną normę błędu, określającą zbieżność pól temperatury: otrzymanego w wyniku eksperymentu i na podstawie obliczeń optymalizacyjnych. Niezbędna jest zatem budowa modelu matematycznego procesu opisującego wymianę ciepła na drodze przewodzenia i pozwalającego na określenie temperatury w dowolnej chwili i miejscu rozważanego obszaru. Charakterystyczną cechą metody jest możliwość oznaczenia przewodności cieplnej ciała w szerokim przedziale temperatury po przeprowadzeniu pojedynczego doświadczenia.

Stanowisko pomiarowe zaprojektowano w taki sposób, by spełniać wymagania dotyczące założeń, które zostały przyjęte na etapie budowy modelu matematycznego procesu. Dotyczy to przede wszystkim jednokierunkowości przepływu ciepła w próbce, co pozwala na znaczne uproszczenie równania przewodzenia ciepła oraz ogranicza ilość danych wejściowych modelu, stanowiących warunki jednoznaczności rozwiązania. Ten wymóg realizuje się najczęściej, rozważając walcową lub prostopadłościenną próbkę o dużej smukłości (stosunek długości do wymiarów przekroju poprzecznego) nagrzewaną przez jedną z powierzchni czołowych i izolowaną na pozostałych powierzchniach bocznych. Przewodzenie ciepła w jednym wymiarze, wzdłuż osi próbki, zachodzi wtedy, gdy strumień ciepła padającego na nagrzewane czoło walca ma taką samą gęstość w każdym jej punkcie w dowolnej chwili procesu nagrzewania. Każdy przekrój prostopadły do osi próbki stanowi wówczas powierzchnię izotermiczną.

Do rozwiązania równania przewodzenia ciepła konieczna jest znajomość zmian warunku brzegowego jedynie na nagrzewanej powierzchni. Przewodzenie ciepła w pozostałych kierunkach można ograniczyć, zmniejszając czas wykonania eksperymentu oraz stosując izolacje cieplne, lecz z uwagi na niestacjonarność procesu nie da się go całkowicie wyeliminować. Skrócenie czasu wymaga szybkiego nagrzania próbki, co wiąże się z uzyskaniem znacznych współczynników wymiany ciepła pomiędzy źródłem ciepła a nagrzewaną

powierzchnią, np. na drodze promieniowania. Miejsca pomiaru temperatury powinny znajdować się w osi próbki. Wymaga to zastosowania czujników stykowych umieszczonych w wykonanych w tym celu otworach. Ideowy schemat stanowiska pomiarowego spełniającego przedstawione powyżej wymagania pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat stanowiska do wyznaczania pola temperatury w nagrzewanej próbce; 1, 2, ..., $i-1$, i , $i+1$, ..., n - punkty pomiaru temperatury

Fig. 1. The scheme of study stand to appointing the field of temperatures in the heated up sample; 1, 2, ..., $i-1$, i , $i+1$, ..., n - points of the thermometry

Opracowano model matematyczny procesu nagrzewania próbki zgodny z realizowanym na stanowisku pomiarowym eksperymentem. Model matematyczny rozwiązano numerycznie z wykorzystaniem metody elementów skończonych MES.

W wyniku pomiarów wykonanych podczas nagrzewania za pomocą K czujników otrzymuje się przebieg temperatury w j -tych punktach objętości próbki; $j = 1, \dots, K$. Temperatury przyjmują wartości z przedziału $[t_0, t_{\max}]$. Rejestrację pomiarów wykonuje się z krokiem czasowym

$$\Delta \tau_{exp} = \tau_{i+1} - \tau_i; \tau_{i+1}, \tau_i \in [\tau_0, \tau_m]; i = 1, \dots, L$$

gdzie τ_m oznacza czas trwania eksperymentu. Na każdym poziomie czasu τ_i otrzymuje się zbiór wartości temperatury w miejscach umieszczenia czujników pomiarowych $\{t_{ij}^{exp}\}$.

Funkcję celu zdefiniowano jako normę kwadratową

$$E[\lambda(t)] = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^K [t_{ij}^{exp} - t_{ij}^{inv}]^2 \quad \text{dla } \tau \in [0, \tau_m] \quad (1)$$

gdzie t_{ij}^{exp} jest wynikiem pomiaru temperatury, a t_{ij}^{inv} - odpowiadającym mu wynikiem obliczeń numerycznych.

Normę błędów minimalizowano, stosując gradientową metodę zmiennej metryki BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno). Założono, że zależność wiążąca przewodność cieplną z temperaturą może być opisana wielomianem drugiego stopnia

$$\lambda(t) = \sum_{i=0}^n b_i t^i \quad \text{przy } n = 2 \quad (2)$$

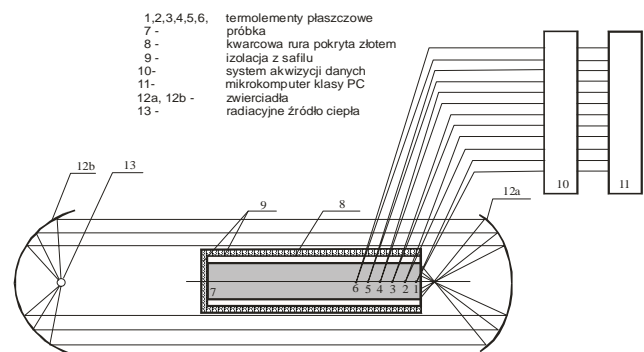
Niewiadomymi są współczynniki b_i , których określenie rozwiązuje problem optymalizacyjny i pozwala na wyznaczenie funkcji wiążącej przewodność cieplną badanego materiału z temperaturą.

Do celów porównania wyników oznaczeń zdefiniowano parametr określający dokładność przybliżenia pola temperatury po zakończeniu obliczeń odwrotnych w postaci średniej różnicy Δt pomiędzy wartościami temperatur zmierzonych i obliczonych numerycznie

$$\Delta t = \frac{1}{KL} \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^K |t_{ij}^{exp} - t_{ij}^{inv}| \quad (3)$$

STANOWISKO POMIAROWE

Zastosowane podczas badań stanowisko pomiarowe przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat stanowiska pomiarowego

Fig. 2. The scheme of the measuring post

Próbkę badanego materiału 7 stanowi pręt o przekroju prostokątnym o wymiarach około $4 \times 4 \times 40$ mm. W równych odległościach od siebie nawiercono otwory o średnicy 0,5 mm oznaczone jako 1, 2, 3, 4, 5, 6 w taki sposób, by ich końce znajdowały się w osi próbki. Oś pierwszego z otworów znajduje się w odległości 1,5 mm od płaszczyzny powierzchni czołowej próbki. Następne były nawiercane w odstępach co 2 mm, licząc od powierzchni nagrzewanej próbki, na kolejnych ścianach bocznych w taki sposób, by nie tworzyły jednej płaszczyzny. W otworach umieszczono termoelementy płaszczone typu K o średnicy zewnętrznej płaszcza 0,5 mm, które służyły do pomiaru temperatury. Próbkę z czujnikami temperatury wsunęto do kwarcowej rury 8 pokrytej od wewnątrz i na zewnątrz złotem. Rurę zaizolowano na zewnątrz kilkumilimetrową warstwą włóknistego materiału izolacyjnego 9.

Źródło ciepła stanowi lampa łukowa 13 o regulowanej mocy, której promieniowanie kierowane jest za pomocą układu zwierciadeł 12a i 12b na powierzchnię czołową próbki. Tylne, nieogrzewana podstawa próbki posiada także izolację cieplną z materiału włóknistego. Pomiar i rejestrację wyników wykonywano z wykorzystaniem systemu akwizycji danych 10, za pomocą

aparatu o handlowej nazwie SPIDER 8, produkcji niemieckiej firmy Hottinger Baldwin Messtechnik o klasie dokładności 0.2. Układ pomiarowy urządzenia współpracuje z komputerem 11.

Regulowana moc zasilania lampy łukowej pozwala na dostosowane szybkości nagrzewania powierzchni czołowej próbki, stosownie do badanego materiału, tak aby nie następowało jego nadtopienie.

Wskazania czujnika położonego najbliżej powierzchni czołowej (1) stanowiły warunek brzegowy do obliczeń odwrotnych.

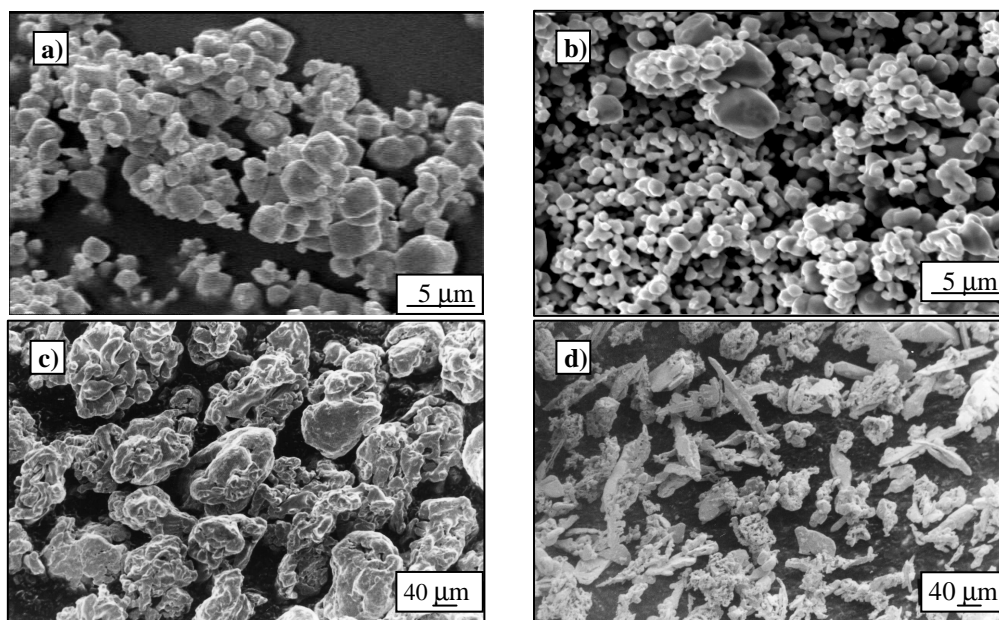
MATERIAŁY STOSOWANE DO BADAŃ

Do wytwarzania infiltrowanych kompozytów stosowano elektrolityczny proszek srebra oraz jako składnik

umacniający zredukowane proszki wolframu, molibdenu i żelaza. Morfologię stosowanych proszków zamieszczono na rysunku 3, a ich wybrane właściwości przedstawiono w tabeli 1.

Z proszków wolframu, molibdenu i żelaza metodą prasowania na stałą wysokość i spiekania w temperaturze $T = 1100^{\circ}\text{C}$ w czasie $t = 60$ minut w atmosferze wodorowej wytwarzano porowate kształtki o wymiarach $40 \times 4 \times 4$ mm, które po badaniu właściwości fizycznych poddano infiltracji srebrem sposobem nakładkowym.

Infiltrację kształtek o porowatości 40% z proszków wolframu, molibdenu i żelaza prowadzono w temperaturze $T_i = 1200^{\circ}\text{C}$ w czasie $t_i = 60$ min w atmosferze wodorowej. Właściwości infiltrowanych kompozytów zamieszczono w tabeli 2.



Rys. 3. Kształt i morfologia cząstek proszków stosowanych do badań: a) proszek wolframu; b) proszek molibdenu; c) proszek żelaza, d) proszku srebra
Fig. 3. SEM micrographs of the starting powders: a) tungsten powder; b) molybdenum powder; c) iron powder; d) silver powder

TABELA 1. Właściwości proszków stosowanych do wytwarzania kompozytów
TABLE 1. Selected physical properties of the starting powders to producing composites

Rodzaj proszku	Zakres wielkości cząstek proszku μm	Średnia wielkość cząstek wg Fishera d_F μm	Powierzchnia właściwa wg Fishera S_g cm^2/g	Gęstość nasypowa d_n g/cm^3 %	Gęstość nasypowa z usadem d_{nu} g/cm^3	Sypkość $\text{s}/50 \text{ g}$	Zgęszczalność przy 600 MPa $\rho_p^{(600)}$ g/cm^3	Gęstość teoretyczna d g/cm^3	Strata wodorowa %
Ag	0÷63	3,28	1740	1,53 14,59	2,08	60	9,76	10,49	0,161
W	0÷10	3,10	1005	2,82 14,54	4,11	nie sypie się	12,54	19,39	0,093
Mo	0÷10	3,10	1865	1,64 16,08	2,36	nie sypie się	7,21	10,20	0,074
Fe	0÷160	5,10	1495	2,0 25,45	2,45	31	6,21	7,86	0,159

TABELA 2. Właściwości infiltrowanych kompozytów W-40%Ag, Mo-40%Ag, Fe-40%Ag

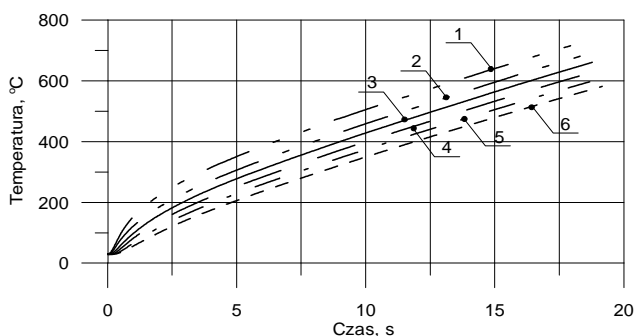
TABLE 2. The properties of the infiltrated composites: W-40%Ag, Mo-40%Ag, Fe-40%Ag

Rodzaj kompozytu	Stożek wypełnienia kapilar %	Gęstość względna g/cm ³	Twardość HB	Wytrzymałość na zginanie MPa	Przewodność elektryczna* %
W-40%Ag	79,25	95,33	236	603,2	37,5
Mo-40%Ag	75,81	93,64	130	782,4	35,5
Fe-40%Ag	88,36	96,16	81,3	538,8	36,8

* przewodność elektryczną kompozytów obliczono w % jako iloraz przewodności kompozytów i czystego srebra.

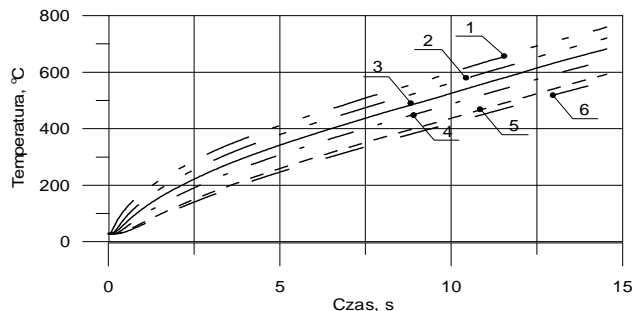
WYNIKI POMIARÓW I OBLICZEŃ

Przeprowadzono pomiary przewodności próbek wykonanych z kompozytów W-40%Ag, Mo-40%Ag oraz Fe-40%Ag. Dla każdej z próbek wykonano po kilka serii pomiarowych. Temperaturę rejestrowano z krokiem równym 0,02 s. W wyniku eksperymentu otrzymano zmienne w czasie pole temperatury w punktach umieszczenia czujników termoelektrycznych, które stanowiły podstawę obliczeń odwrotnych. Przykładowe rysunki z naniesionymi odczytami wyników pomiarowych przedstawiono na rysunkach 4-6.



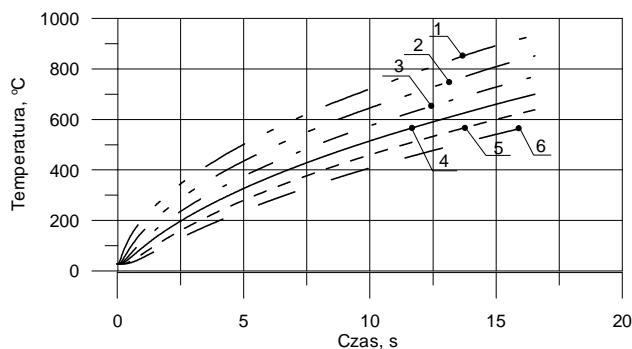
Rys. 4. Przebieg zmian temperatury w punktach umiejscowienia termoelementów w próbce W-40%Ag; oznaczenia zgodnie z rys. 2

Fig. 4. Route of changes in the temperature in points of situating thermoelements in the sample W-40%Ag; of marking according to Fig. 2



Rys. 5. Przebieg zmian temperatury w punktach umiejscowienia termoelementów w próbce Mo-40%Ag; oznaczenia zgodnie z rys. 2

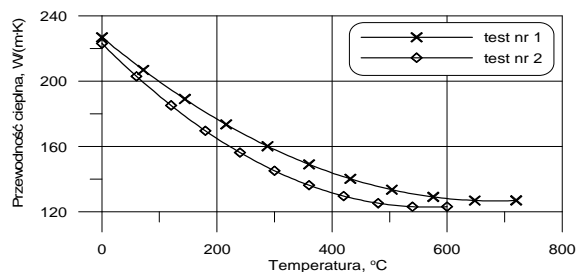
Fig. 5. Route of changes in the temperature in points of situating thermoelements in the sample Mo-40%Ag; of marking according to Fig. 2



Rys. 6. Przebieg zmian temperatury w punktach umiejscowienia termoelementów w próbce Fe-40%Ag; oznaczenia zgodnie z rys. 2

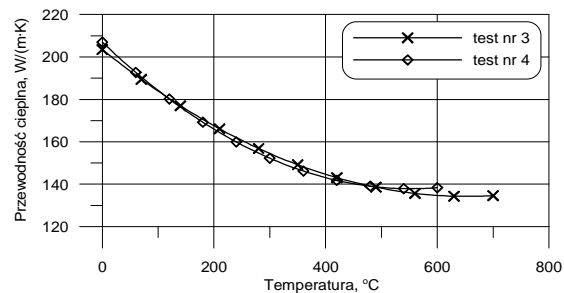
Fig. 6. Route of changes in the temperature in points of situating thermoelements in the sample Fe-40%Ag; of marking according to Fig. 2

Wyniki obliczeń współczynników wielomianu dla poszczególnych testów przedstawiono na rysunkach 7-9 oraz w tabeli 3.



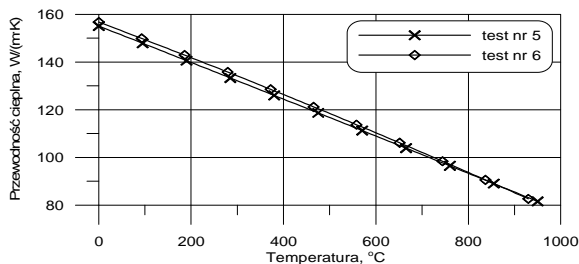
Rys. 7. Zależność przewodności cieplnej kompozytu W-40%Ag od temperatury

Fig. 7. Thermal conductivity dependence on temperature for W-40%Ag composites



Rys. 8. Zależność przewodności cieplnej kompozytu Mo-40%Ag od temperatury

Fig. 8. Thermal conductivity dependence on temperature for Mo-40%Ag composites



Rys. 9. Zależność przewodności cieplnej kompozytu Fe-40%Ag od temperatury

Fig. 9. Thermal conductivity dependence on temperature for Fe-40%Ag composites

TABELA 3. Przykładowe wyniki oznaczenia przewodności cieplnej kompozytów na osnowie srebra

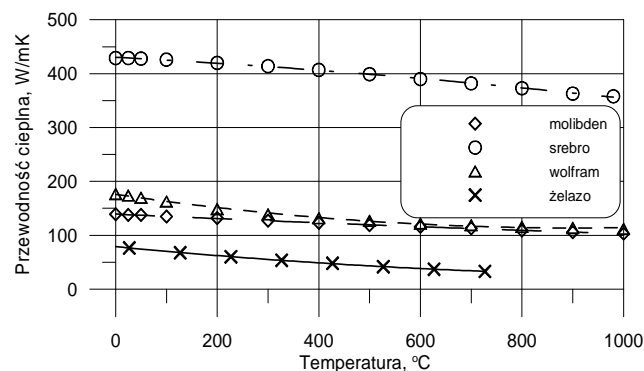
TABLE 3. Some examples of thermal conductivities silver based composites

Rodzaj kompozytu	W-40%Ag		Mo-40%Ag		Fe-40%Ag	
Nr testu	1	2	3	4	5	6
Temperatury oznaczenia, °C	0÷720	0÷710	0÷700	0÷600	0÷950	0÷930
b_0	226,862	222,993	203,478	206,958	155,076	156,761
$b_1 \cdot 10^3$	-293,429	-352,428	-222,998	-250,499	-75,894	-73,149
$b_2 \cdot 10^3$	224,927	320,303	172,293	227,019	-1,603	-7,083
Δt , °C	2,548	3,162	1,131	0,906	1,835	2,115

OMÓWIENIE WYNIKÓW

W dostępnej literaturze brak jest danych dotyczących przewodności cieplnej kompozytów srebra z innymi metalami. Dostępne są jedynie bardzo sporadyczne wartości odnoszące się do temperatury pokojowej. Badania miały na celu uzupełnienie widocznej luki w tym zakresie i pozwoliły na wyznaczenie współczynnika przewodzenia ciepła badanych kompozytów srebra z trzema metalami: wolframem, molibdenem i żelazem. Dzięki zastosowanej metodzie, oznaczenia wykorzystującej rozwiązanie problemu odwrotnego przewodzenia ciepła, możliwe było oznaczenie współczynnika przewodzenia ciepła w szerokim zakresie temperatury. Najwyższe wartości przewodności cieplnej zaobserwowano dla kompozytu W-40%Ag. Na podstawie zaprezentowanych wyników obliczeń testów można stwierdzić, że wielkość ta wynosi ponad 220 W/(m·K) w temperaturze pokojowej. Ze wzrostem temperatury obserwuje się spadek przewodności cieplnej do wartości około 125÷130 W/(m·K) w temperaturze 600÷700°C. Nieco mniejsze wartości otrzymano dla kompozytów Mo-40%Ag. W temperaturach bliskich temperaturze pokojowej ich przewodność cieplna niewiele przekracza 200 W/(m·K), obniżając się do wartości około 135÷140 W/(m·K) w temperaturach 600÷700°C. Znacznie niższa jest przewodność cieplna stopu Fe-40%Ag. W temperaturze pokojowej wynosi ona około 155 W/(m·K), opadając ze wzrostem temperatury do około 80 W/(m·K) w temperaturach ponad 900°C. Wykonane serie eksperymentów i wielokrotne obliczenia wykazały powtarzalność wyników oznaczenia dla poszczególnych stopów. W większości przypadków uzyskano dużą zgodność pola temperatury otrzymanego na podstawie eksperymentów z polem temperatury stanowiącym wynik numerycznych obliczeń optymalizacyjnych. Największa wartość średniej różnicy Δt liczonej z zależności (3) pomiędzy wartościami temperatur zmierzonych i obliczonych numerycznie dla za-

prezentowanych testów wystąpiła dla kompozytu W-40%Ag (test nr 2) i wyniosła 3,162 K. W pozostałych przypadkach parametr ten osiągał niższe wartości, nawet poniżej 1 K (test nr 4), co potwierdza dużą dokładność otrzymanych wyników oznaczenia. Przewodność cieplna kompozytów jest niższa od przewodności cieplnej srebra, która według danych literaturowych wynosi od około 430 W/(m·K) w temperaturze 0°C do około 360 W/(m·K) w temperaturze 980°C. Jest ona jednak wyższa od przewodności cieplnej składników umacniających, tworzących kompozyt ze srebrem (rys. 10).



Rys. 10. Przewodność cieplna czystych pierwiastków tworzących badane kompozyty. Punkty reprezentują dane eksperymentalne, linie aproksymacje obliczone metodą najmniejszych kwadratów

Fig. 10. Thermal conductivities of clean elements forming tested composites. Points are representing experimental data, approximations were calculated for the rope with the method of smallest squares

Można zatem zauważyć addytywność własności, jaką jest przewodność cieplna badanych kompozytów na osnowie srebra. Dla każdego kompozytu zawiera się ona pomiędzy wartościami charakterystycznymi dla czystych składników.

W związku z powyższym przeprowadzono obliczenia przewodności cieplnej kompozytów według reguły mieszanin, zgodnie ze wzorem

$$\tau_o = \tau_x \cdot V_x + \tau_{Ag} \cdot V_{Ag} \quad (4)$$

gdzie:

- τ_o - obliczona przewodność kompozytu;
- τ_x - przewodność składnika umacniającego x (W, Mo, Fe),
- V_x - ułamek objętościowy składnika umacniającego x (W, Mo, Fe) w kompozycie,
- τ_{Ag} - przewodność srebra,
- V_{Ag} - ułamek objętościowy srebra w kompozycie.

W tabeli 4 przedstawiono wartości liczbowe przewodności cieplnej składników i uformowanych z nich kompozytów w temperaturze pokojowej: oznaczone doświadczalnie τ_d i obliczone τ_o oraz iloraz τ_d/τ_o , wyrażony w procentach.

TABELA 4. Właściwości infiltrowanych kompozytów W-40%Ag, Mo-40%Ag, Fe-40%Ag
 TABLE 4. The properties of as infiltrated composites W-40%Ag, Mo-40%Ag, Fe-40%Ag

Rodzaj materiału	Przewodność cieplna doświadczalna τ_d W/m · K	Przewodność cieplna obliczona τ_o W/m · K	$\tau_d / \tau_o \cdot 100$ %
Ag	430	-	-
W W-40%Ag	174 220	- 276,4	- 79,59
Mo Mo-40% Ag	138 200	- 254,8	- 8,49
Fe Fe-40% Ag	80,2 155	- 220,12	- 70,42

Wyniki badań eksperymentalnych przewodności cieplnej kompozytów są mniejsze o około 20÷30% od wyników przewodności cieplnej obliczonej na podstawie reguły mieszanin.

WNIOSKI

- W wyniku infiltracji ciekłego srebra do spiekanych, porowatych kształtek z wolframu, molibdenu i żelaza uzyskano infiltrowane kompozyty W-40%Ag, Mo-40%Ag, Fe-40%Ag o porowatości wynoszącej odpowiednio: 4,67; 6,36 i 3,84%.
- Przewodność cieplna infiltrowanych kompozytów W-40%Ag, Mo-40%Ag, Fe-40%Ag maleje w kolejności ich prezentacji i jest tym większa, im większa przewodność składnika umacniającego kompozyt, a występujące różnice porowatości nie zmieniają tej kolejności.
- Przewodność cieplna wszystkich badanych grup kompozytów maleje ze wzrostem temperatury, ale spadek przewodności jest większy w kompozytach W-40%Ag i Mo-40%Ag niż w kompozytach Fe-40%Ag.
- Uzyskano dużą zgodność wyników badań przewodności kompozytów w kolejnych seriach pomiarowych, co potwierdza wysoki stopień dokładności uzyskanych wyników i świadczy o dużych zaletach i przydatności stosowanej metodyki badań.

- Doświadczalnie oznaczona przewodność cieplna kompozytów jest około 20÷30% mniejsza od przewodności cieplnej obliczonej według reguły mieszanin.

Podziękowania

Praca wykonana w ramach badań statutowych, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego, umowa nr 11.11.110.788.

LITERATURA

- [1] Kothari N.C., Factors affecting tungsten-copper and tungsten-silver electrical contact materials, Powder Metallurgy International 1982, 14, 3.
- [2] Schaft W., Wieters K-P., Powder Metallurgy Processing and Materials (EPMA 1997).
- [3] Stolarz S., Materiały na styki elektryczne, WNT, Warszawa 1968.
- [4] Krjačko L.A., Materiały kompozytowe na styki i elektrody, Poroškovaja Matallurgia 1995, 78.
- [5] Leung C.H., Lee A., A comparission of reignition properties of several Ag/W, Ag/WC and Ag/Mo electrical contact materials, IEEE Trans. Comp. Hybrids Manuf. Technolgy 1986, 9, 1.
- [6] Ziya A., Yilmaz K., Ovecoğlu M.L., Switching performance of W-Ag electrical conatcts fabricated by mechanical alloying, International Journal of Powder Metallurgy 2000, 36, 8.
- [7] Leung C.H., Lee A., A comparission of reignition properties of several Ag/W, Ag/WC and Ag/Mo electrical contact materials, IEEE Trans. Comp. Hybrids Manuf. Technolgy 1986, 9, 1.
- [8] Gacek S., Frydrych J., Stolarz S., Properties of tungsten compacts and sintered parts intended for infiltration with silver, Powder Metallurgy International 1981, 13, 1.
- [9] Leżański J., Infiltracja cieczy w porowatych materiałach, Metalurgia i Odlewnictwo 1988, nr 118.
- [10] Telejko T., Oznaczanie przewodności cieplnej ciała stałego z wykorzystaniem rozwiązania zagadnienia odwrotnego przewodzenia ciepła, Rozprawy Monografie, nr 140, Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne, Kraków 2005.
- [11] Tajima M., Umeyama Y., Latent heats of phase transformations in iron and steels, High Temp. High Pressure 2002, 34, 91-97.
- [12] Krielaart G.P., et al., Analysis of phase transformation in Fe-C alloys using differential scanning calorimetry, J. Mater. Sci. 1996, 31, 1501-1508.
- [13] Parker W.J. et al., Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity, and thermal conductivity, J. Appl. Phys. 1961, 32, 1679-1684.