

**OKREŚLENIE PRZEWODNOŚCI CIEPLNEJ WYBRANYCH
GATUNKÓW ŻELIWA SFEROIDALNEGO ZA POMOCĄ POMIARU
PRZEWODNICTWA TEMPERATUROWEGO METODĄ LASER-FLASH****DETERMINATION OF THERMAL CONDUCTIVITY OF SELECTED
TYPES OF DUCTILE IRON (SPHEROIDAL GRAPHITE/CAST IRON)
BY MEANS OF THERMAL DIFFUSIVITY MEASUREMENTS WITH
LASER-FLASH METHOD**

Andrzej Gazda, Marta Homa

Instytut Odlewnictwa, Centrum Badań Wysokotemperaturowych, ul. Zakopiańska 73,
30-418 Kraków

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki pomiarów przewodnictwa temperaturowego w funkcji temperatury dla dwóch gatunków żeliwa sferoidalnego przy zastosowaniu jednego z najnowocześniejszych zestawów aparaturowych LFA 427 (Laser Flash Apparatus) firmy Netzsch. Do pomiaru ciepła właściwego $c_p(T)$ i gęstości $\rho(T)$ wykorzystano metody dynamicznej analizy termicznej – różnicową kalorymetrię skaningową DSC i technikę dylatometryczną, co pozwoliło na obliczenie współczynników przewodzenia ciepła $\lambda(T)$ za pomocą oprogramowania Netzsch LFA Analysis. Zaobserwowano zmiany nachylenia krzywej zależności przewodnictwa temperaturowego od temperatury oraz gwałtowną zmianę przebiegu przewodności cieplnej $\lambda(T)$ wywołaną przez efekt cieplny, zarejestrowany na krzywej $c_p(T)$. Pozwoliło to na identyfikację procesu dekompozycji struktury ausferytycznej, polegającego na rozpadzie wysokowęglowego austenitu w żeliwie ADI w temperaturze ok. 400°C.

Słowa kluczowe: przewodnictwo temperaturowe, przewodność cieplna, ciepło właściwe, metoda laserowa LF, żeliwo ADI

Abstract

This paper presents the results of measurements of thermal conductivity coefficient as a function of temperature for two species of spheroidal cast iron by using one of the most modern experimental sets LFA 427 (Laser Flash Apparatus) produced by Netzsch Company. In order to measure the specific heat $c_p(T)$ and density $\rho(T)$, two methods of dynamic thermal analysis were used – differential scanning calorimetric DSC and dilatometric technique. Based on results of these measurements the coefficients of thermal conductivity were calculated with the use of Netzsch LFA Analysis software. Changes of slope of thermal diffusivity coefficient curvilinear dependence on temperature were observed, as well as rapid change on thermal conductivity $\lambda(T)$ caused by thermal effect registered on $c_p(T)$ dependence. These observations allowed to identify decomposition process of ausferrite, caused from the disintegration of high-carbon retained austenite in ADI cast iron at approximately 400°C.

Keywords: thermal diffusivity, heat conductivity, specific heat, laser flash method (LFM), austempered ductile iron (ADI)

1. Wstęp

Przewodnictwo cieplne to zdolność substancji do przewodzenia ciepła w warunkach stacjonarnych natomiast przewodnictwo temperaturowe jest parametrem opisującym szybkość zmian temperatury substancji w warunkach niestacjonarnych. Wskaźniki te należą do grupy intensywnych parametrów termodynamicznych charakteryzujących właściwości termofizyczne materiałów. Parametry te są czułe na strukturę i morfologię materiału oraz zależą od zawartości pierwiastków stopowych, a analiza ich w kontekście procesów kształtowania struktury fazowej może znaleźć szerokie zastosowanie w pracach z zakresu inżynierii materiałowej [1, 2]. Przebieg temperaturowy tych parametrów wpływa na możliwości wykorzystania danego materiału konstrukcyjnego pod kątem różnych zastosowań przemysłowych, tj. do projektowania takich wyrobów jak chłodnice, piece, materiały izolacyjne, tarcze hamulcowe, bloki cylindrów, tłoki itp.

Osobnym i szczególnym zagadnieniem jest wykorzystanie tych parametrów w procesach odlewniczych. W procesach tych znajomość różnic w przewodnictwie cieplnym materiałów formierskich i odlewanych stopów decyduje o jakości gotowych wyrobów (strukturze wewnętrznej), natomiast struktura wewnętrzna odlewane materiału ma wpływ na właściwości mechaniczne.

W rozwijających się ostatnio badaniach nad projektowaniem technologii wykonywania odlewów, znaczący udział mają prace poświęcone symulacji pola temperatury odlewów w procesie krzepnięcia i stygnięcia metalu w formie. Symulacja cyfrowa oparta jest na modelach (przybliżonych rozwiązaniach równania cieplnego Fouriera). Użytkowym celem tych badań jest oszczędność materiału i energii, zmniejszenie liczby braków i podwyższenie jakości odlewów oraz uzyskanie możliwości sterowania rozwojem struktury stopów przez sterowanie procesem studzenia.

Określenie pola temperatury w metalu i formie podczas krzepnięcia i stygnięcia wymaga dobrej znajomości temperaturowych zależności właściwości termofizycznych, takich jak ciepło właściwe, gęstość i przewodność cieplna materiałów. Parametry te wyznaczone są zazwyczaj dla wybranych materiałów i zamieszczone w tablicach lub w postaci baz danych programów symulacyjnych, takich jak np. program MAGMASOFT®. Powoduje to, że dostępne dane tylko w pewnym zakresie pokrywają obszar praktycznych zastosowań.

W zagadnieniach symulacji procesów krzepnięcia i stygnięcia stopów stosuje się ogólne równanie przewodzenia ciepła w ciele izotropowym z uwzględnieniem zależności $\lambda(T)$ i założeniem istnienia wewnętrznego źródła ciepła q_v w postaci:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v = c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

Przyjmując, że w pewnym zakresie temperatury $\lambda = \text{const}$ i zakładając brak wewnętrznych źródeł ciepła, uzyskuje się równanie liniowe w znanej postaci Fouriera:

$$a \nabla^2 T = \frac{\partial T}{\partial t}; \quad a = \frac{\lambda}{c_p \rho} \quad (2)$$

$$\lambda(T) = a(T)c_p(T) \rho(T) \quad (3)$$

a inne metody analizy termicznej (np. kalorymetryczna, dylatometryczna) pozwalają na precyzyjny pomiar ciepła właściwego i gęstości. Pierwsza część równania (2) ulega znacznemu uproszczeniu, gdy przewodzenie ciepła zachodzi w stanie ustalonym (stacjonarnym), tzn. pole temperatury nie zmienia się w czasie.

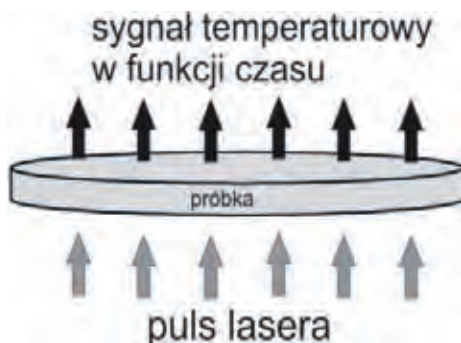
Rozwiązanie, występującego często w praktyce, zagadnienia przewodzenia ciepła w warunkach niestacjonarnych ($T=Y(t)$), sprowadza się w tym przypadku do rozwiązania równania Fouriera przy założonych warunkach brzegowych.

W literaturze można znaleźć wiele metod wyznaczania przewodności cieplnej, lecz ograniczają się one głównie do stanu stacjonarnego, dlatego szczególnie interesujące wydają się metody impulsowe, ze względu na możliwość realizacji warunków brzegowych, w których założenia matematyczne są słuszne. Metody impulsowe wymagają jednak bardzo precyzyjnych i szybkich pomiarów czasu i temperatury (czas trwania impulsu rzędu milisekund) oraz dobrze dobranych warunków geometrii pomiarowej.

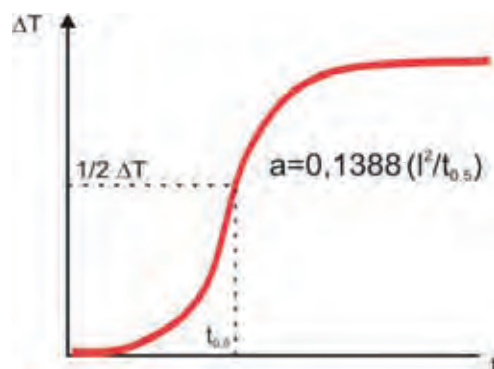
Schemat metody impulsowej przedstawiono na rysunku 1.

Ciepło przekazywane jest impulsowo, w krótkim czasie po czym bada się efekt termiczny tego impulsu w pewnej odległości od źródła, w postaci zmiany temperatury w określonym punkcie badanej próbki.

a)



b)



Rys. 1. Impulsowa metoda wyznaczania przewodnictwa temperaturowego: a) zasada działania, b) zmiana temperatury próbki w wyniku impulsu cieplnego

Fig. 1. An impulse method for the determination of: a) principle of operation, b) changes in sample temperature induced by the heat impulse effect

Pomijając szczegółowe wyprowadzenie zależności, ogólne rozwiązanie równania Fouriera dla ciała nieograniczonego i płaskiego źródła ciepła, powodującego jednokierunkowy strumień ciepły w kierunku osi X ma postać:

$$\Delta T = \Theta_2 = T(x, t) - T_0 = \frac{Q_2}{2c\rho\sqrt{\pi a(t - \tau)}} \exp\left(-\frac{x^2}{4a(t - \tau)}\right) \quad (4)$$

gdzie:

Q_2 oznacza gęstość strumienia cieplnego [J/m^2] działającego do czasu $(t - \tau)$ (czas trwania impulsu) natomiast x oznacza grubość materiału.

Zróżniczkowanie logarytmicznej formy tego równania i zastosowanie warunku maksimum funkcji daje wyrażenie

$$\frac{1}{\Delta T} \frac{\partial \Delta T}{\partial t} = \frac{x^2}{4a(t - \tau)^2} - \frac{1}{2(t - \tau)} = 0; a = \frac{x^2}{2(t_{\max} - \tau)} \quad (5)$$

gdzie:

t_{\max} oznacza czas osiągnięcia równowagi termicznej w próbce poddanej działaniu impulsu cieplnego w odległości $x = L$.

Metoda oparta na powyższych relacjach jest stosowana w urządzeniach wykorzystujących jako źródło impulsu promień lasera lub lampę ksenonową. Metoda zakłada izotropię właściwości badanego materiału oraz warunki adiabatyczne wymiany ciepła w urządzeniu. Dla takich warunków wyprowadzono na podstawie wzoru (5) wyrażenie na przewodnictwo temperaturowe a

$$a = K_x \frac{L^2}{t_x} \quad (6)$$

gdzie:

t_x oznacza czas osiągnięcia x maksymalnej temperatury (np. $1/2$ oznacza osiągnięcie połowy maksymalnej temperatury).

Prezentowana praca przedstawia wyniki pomiarów przewodnictwa temperaturowego i wyznaczenia współczynników przewodzenia ciepła żeliwa sferoidalnego (wyjściowego) i żeliwa ADI (*Austempered Ductile Iron*) w funkcji temperatury z zastosowaniem zestawu aparaturowego LFA (Laser Flash Apparatus) 427 firmy Netzsch oraz danych z pomiarów dylatometrycznych i DSC.

W pracy wykazano, że wyznaczenie zależności przewodnictwa temperaturowego w funkcji temperatury pozwala na identyfikację procesu rozpadu struktury ausferytycznej w żeliwie ADI, przy czym ze względu na wysoką czułość ciepła właściwego na różnice strukturalne identyfikacja ta, wyznaczona na podstawie zależności przewodności cieplnej od temperatury, jest znacznie dokładniejsza.

2. Materiał do badań

Materiałem wytypowanym do badań przewodnictwa temperaturowego były próbki dwóch gatunków żeliwa sferoidalnego miedziowo-niklowego:

- żeliwo sferoidalne (oznaczenie 1_ZSF) - żeliwo o osnowie perlitycznej, gatunek EN-GJS-700-2 wg normy PN-EN 1563:2000,
- żeliwo ADI (oznaczenie ADI_1_270) - żeliwo sferoidalne (1_ZSF) hartowane z przemianą izotermiczną, gatunek EN-GJS-1400-1 wg normy PN-EN 1564:2000.

Próbki do badań uzyskano z jednego stopu wyjściowego o składzie chemicznym przedstawionym w tabeli 1.

Tabela 1. Skład chemiczny stopu wyjściowego

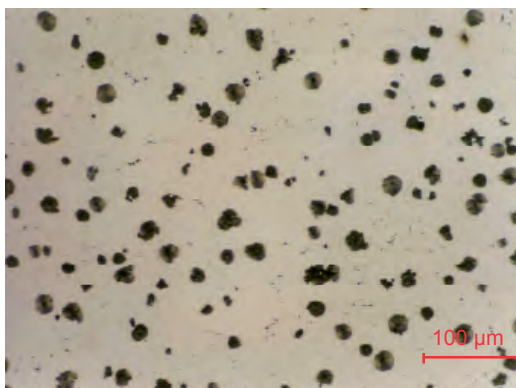
Table 1. Chemical composition of base alloy

Skład chemiczny badanego żeliwa sferoidalnego, % wag.					
C	Si	Mn	Mg	Cu	Ni
3,40	2,45	0,28	0,05	0,51	1,02

Żeliwo ADI wykorzystane w badaniach otrzymano poprzez klasyczną obróbkę cieplną polegającą na austenityzowaniu wyciętych do badań próbek żeliwa sferoidalnego w temperaturze 900°C przez 60 minut i hartowaniu z przemianą izotermiczną w kąpeli solnej o temperaturze 270°C przez 60 minut.

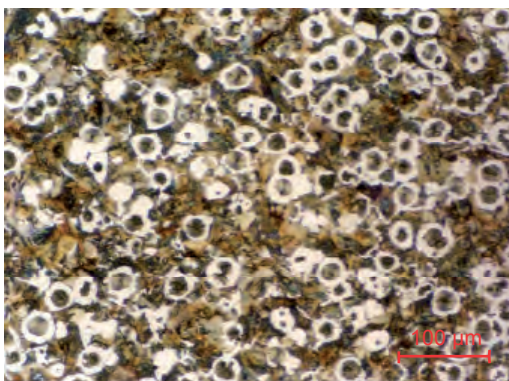
Obserwacje mikroskopowe zglądów próbek żeliwa sferoidalnego oraz żeliwa ADI wykonano z zastosowaniem mikroskopu świetlnego typu Neophot 32 (rys. 2–4).

Mikrostruktura żeliwa ADI składa się z grafitu kulkowego oraz osnowy, będącej zazwyczaj mieszaniną ferrytu i austenitu, zwanej ausferrytem (rys. 4). Ferryt iglasty powstaje podczas przemiany izotermicznej austenitu w temperaturowym zakresie tworzenia bainitu. Przemiana bainityczna w żeliwie sferoidalnym przebiega wolniej niż w stalach, a wysoka zawartość krzemu zapobiega tworzeniu się węglików.



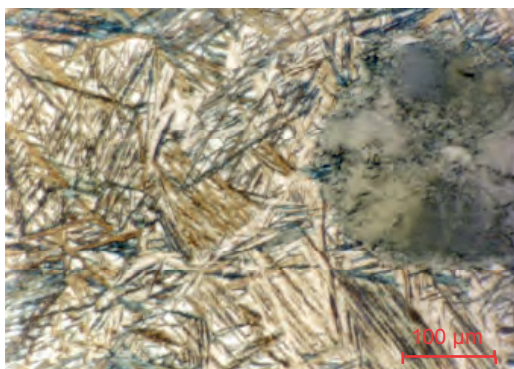
Rys. 2. Mikrostruktura zglądu nietrawionego próbki żeliwa sferoidalnego o strukturze grafitu VA5-80% VIA6-20% (powiększenie 100x)

Fig. 2. Microstructure in unetched section of ductile iron specimen with VA5-80% VIA6-20% graphite structure (100x)



Rys. 3. Mikrostruktura zglądu próbki żeliwa sferoidalnego trawionego Mi1Fe o strukturze osnowy Pf1-P92 (powiększenie 100x)

Fig. 3. Microstructure in Mi1Fe etched section of ductile iron specimen with Pf1-P92 matrix structure (100x)



Rys. 4. Mikrostruktura zglądu próbki żeliwa ADI otrzymanego na drodze obróbki cieplnej w temperaturze 270°C w czasie 60 minut (trawienie roztworem 10% $K_2S_2O_8$) o strukturze osnowy ferryt iglasty + austenit szczątkowy (powiększenie 1000x)

Fig. 4. Microstructure in ADI specimen section obtained by heat treatment at 270°C for the time of 60 minutes (etched with 10% $K_2S_2O_8$ solution) characterised by the matrix structure composed of acicular ferrite + residual austenite (1000x)

3. Metodyka badań

3.1. Opis aparatury

Do wykonania pomiarów wykorzystano zakupione przez Instytut Odlewnictwa, dzięki dotacji aparaturowej na działalność statutową (decyzja Nr 425/E-141/S/2007-2), urządzenie typu laser-flash LFA 427/4/G firmy Netzsch, służące do badań przewodnictwa temperaturowego metali i stopów w stanie stałym i ciekłym, materiałów ceramicznych oraz materiałów proszkowych.

Zastosowana technika impulsowa pozwala na pomiar przewodnictwa tempera-

turowego a w zakresie 0,001–10 m²/s, w przedziale temperatury 20–1500°C. Metody korekcji strat cieplnych pozwalają obecnie na określenie również dla takich materiałów, jak: materiały w stanie ciekłym, kompozyty o dużej dyspersji, cienkie warstwy, materiały wielowarstwowe, a także przewodnictwo pomiędzy warstwami (np. metal/forma).

Pomiar przewodnictwa temperaturowego jest możliwy z dokładnością 3%, a wyznaczenie przewodności cieplnej z udokumentowaną dokładnością 5% w całym zakresie pomiarowym. Urządzenie składa się z kilku podstawowych modułów.

Część robocza (jednostka bazowa) pozwala na bezpieczną pracę w warunkach oddziaływania promieniowania lasera i składa się z pieca wysokotemperaturowego umożliwiającego pracę w temperaturze min. 1500°C oraz o konstrukcji umożliwiającej utrzymanie wysokiej próżni (ciśnienie poniżej $5 \cdot 10^{-5}$ mbar), nośnika próbek z termoelementem pomiarowym typu S, lasera neodymowego Nd:YAG wysokiej mocy i o długości fali 1064 nm, chłodzonego LN₂, detektora InSb oraz oprzyrządowania realizującego funkcje technicznego przygotowania pomiaru, wytwarzania i utrzymania próżni, cyrkulacji żądanej atmosfery gazowej, chłodzenia pieca itd.

Część kontrolno-pomiarowa składa się z układu akwizycji danych, układu kontroli temperatury i mocy grzewczej, układów zabezpieczających, transformatora i obudowy systemu.

Oprogramowanie umożliwia kontrolę urządzenia: ustawienie parametrów pomiarowych, kontrolę przebiegu pomiaru, akwizycję danych i obróbkę danych pomiarowych. 32 bitowe, przyjazne dla użytkownika oprogramowanie działa w systemie Windows. Umożliwia obróbkę, analizę i eksport danych w postaci cyfrowej i graficznej. Oprogramowanie do analizy zawiera standardowe modele matematyczne służące do opracowania sygnałów pomiarowych i modele strat radiacyjnych oparte na nieliniowej regresji i ulepszonym modelu Cape-Lehmana. Oprogramowanie urządzenia zawiera model dla materiałów wielowarstwowych (do trzech warstw) oraz dodatkowy moduł wyznaczenia ciepła właściwego metodą porównawczą realizowaną w urządzeniu.

Metoda pomiaru przewodnictwa temperaturowego w urządzeniu Netzsh LFA 427 polega na ogrzaniu płaskiej powierzchni próbki w kształcie dysku krótkim impulsem laserowym, w wyniku czego na przeciwległej powierzchni próbki następuje wzrost temperatury, mierzony w funkcji czasu za pomocą detektora podczerwieni (IR). Zmierzony sygnał po czasie połowicznego wzrostu temperatury $t_{0,5}$ pozwala na wyznaczenie przewodnictwa temperaturowego zgodnie z równaniem (6).

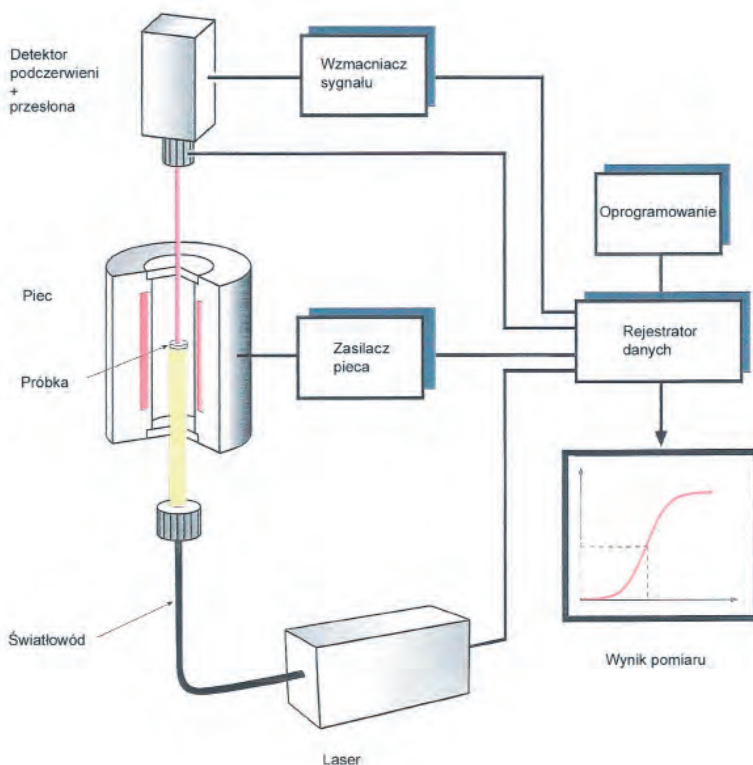
Współczynniki przewodzenia ciepła $\lambda(T)$ obliczane są na podstawie wzoru (3). Dokładność pomiarowa, która musi uwzględnić błędy określenia pozostałych wielkości termofizycznych zazwyczaj nie jest gorsza od dokładności tzw. „bezpośrednich” metod wyznaczania λ , polegających na obliczeniu tej wielkości na podstawie pomiaru strumienia cieplnego (poprzez gradienty temperatury) i parametrów geometrycznych próbki przy założeniu warunków stanu stacjonarnego.

Fotografię urządzenia LFA 427 wraz ze schematem konstrukcji (elementy układu pomiarowego (tj. próbka, uchwyt, kapturek, przykrywka), na który nasuwany jest piec zestawu LFA 427 przedstawiono na rysunkach 5–6.

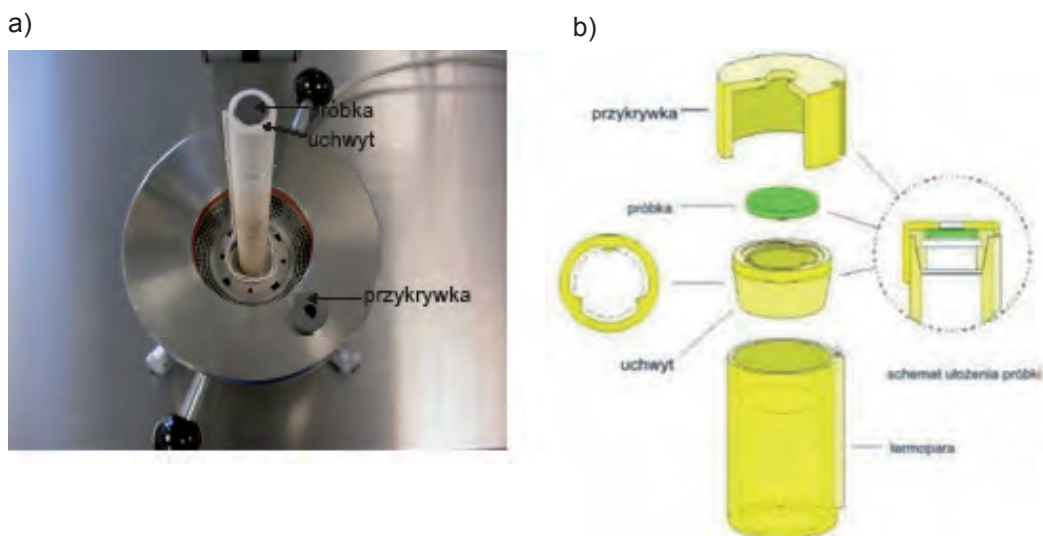


Rys. 5a. Zestaw aparaturowy typu LFA 427 służący do badań przewodnictwa temperaturowego stałych i ciekłych metali, stopów, materiałów ceramicznych oraz proszków, na którym zrealizowane były badania żeliwa sferoidalnego miedziowo-niklowego

Fig. 5a. LFA 427 apparatus for the determination of thermal diffusivity in solid and liquid metals and alloys, and in ceramic materials and powders; the apparatus has been used in investigations of copper-nickel ductile iron



Rys. 5b. Schemat konstrukcji zestawu aparaturowego typu LFA 427
Fig. 5b. Schematic layout of the LFA 427 apparatus



Rys. 6. Układ pomiarowy urządzenia LFA 427: (a) widok ogólny układu pomiarowego wraz z poszczególnymi elementami (próbka, uchwyt, przykrywka), b) schemat konstrukcji oraz kolejność umieszczenia poszczególnych elementów składowych

Fig. 6. Measuring system of the LFA 427 apparatus: (a) general view of the measuring system with individual elements (specimen, holder, cover), b) schematic layout of the system and the sequence of placing individual components

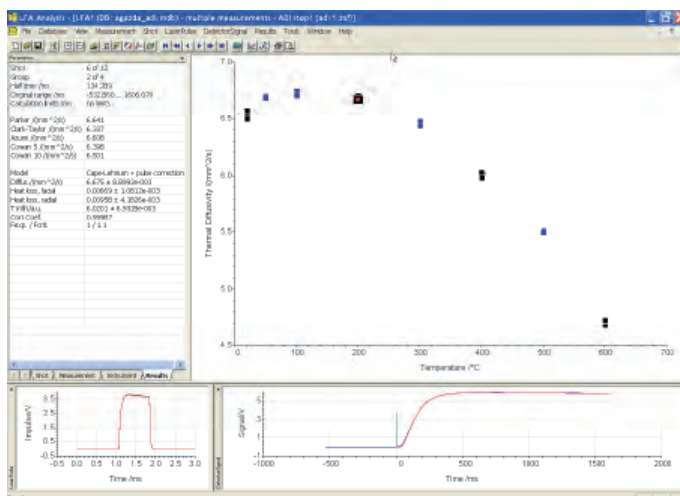
3.2. Przygotowanie próbek żeliwa do badań

Do wyznaczenia przewodnictwa temperaturowego zastosowano próbki o wymiarach $10 \times 10 \times 2,5$ mm. Próbki po oczyszczeniu w alkoholu etylowym, w płuczce ultradźwiękowej, pokryto cienką warstwą grafitu w celu wyeliminowania zjawiska radiacyjnego rozpraszania ciepła.

Badania wykonano w zakresie temperatury od 20 do 600°C , w próżni rzędu 10^{-5} mbar. Pomiary przeprowadzono w trybie izotermicznym, skokowo zwiększając temperaturę pomiaru co 50°C , a dla każdego punktu temperaturowego wykonano trzy pomiary laserowe (tzw. strzały).

4. Pomiar współczynnika przewodnictwa temperaturowego

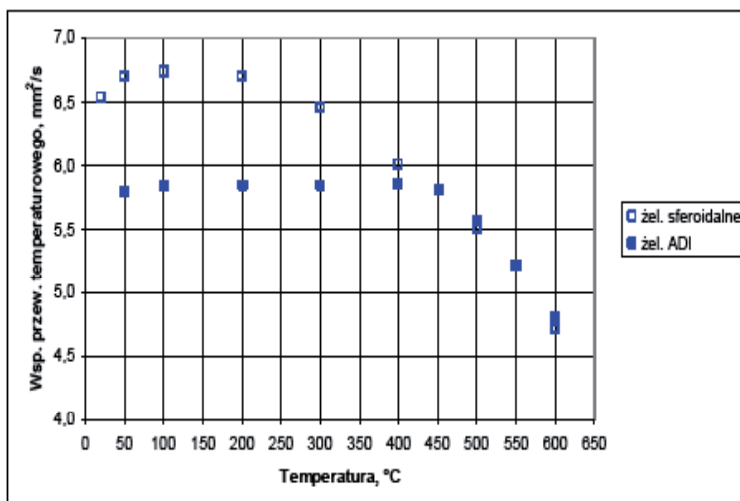
Widok karty programu analizującego Netzsch LFA Analysis przedstawiono na rysunku 7. Górne prawe pole przedstawia wykres zmierzonych wartości natomiast lewe wyniki pomiaru dla wybranego punktu pomiarowego. W dolnej lewej części ekranu widoczny jest trwający 0,8 ms impuls lasera natomiast w prawej dolnej części zmierzony efekt zmiany temperatury powierzchni próbki (sygnał detektora w funkcji czasu).



Rys. 7. Karta programu Netzsch LFA Analysis 4.8.5 służącego do obróbki, analizy i eksportu danych pomiarowych uzyskanych za pomocą urządzenia LFA 427

Fig. 7. Card of a Netzsch LFA Analysis 4.8.5 program for processing, analysis and export of measuring data from the LFA 427 apparatus

Wyniki pomiarów przewodnictwa temperaturowego badanych próbek żeliwa sferoidalnego i żeliwa sferoidalnego ausferrytycznego przedstawiono na rysunku 8. Przebiegi zależności potwierdzają czułość tej wielkości termofizycznej - w szczególności na strukturę osnowy metalowej (przy ustalonej kulkowej morfologii grafitu).



Rys. 8. Wykres przebiegu zmian przewodnictwa temperaturowego w funkcji temperatury badanych gatunków żeliwa sferoidalnego miedziowo-niklowego

Fig. 8. Changes of thermal diffusivity plotted in function of temperature for the examined grades of copper-nickel ductile iron

Z przedstawionego na rysunku 8 wykresu widać, że w temperaturze około 400°C następuje zmiana nachylenia krzywej, co sygnalizuje początek procesu rozpadu struktury ausferytycznej, prowadzącego do całkowitego zaniku austenitu wysokowęglowego i pokrycia się krzywych wyznaczonych dla obu gatunków żeliwa sferoidalnego.

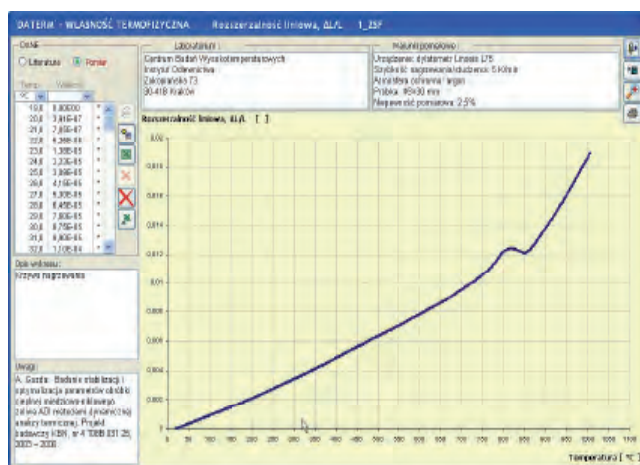
5. Wyznaczenie współczynnika przewodzenia ciepła

Oprogramowanie urządzenia LFA 427 umożliwia obliczenie wartości przewodności cieplnej (λ) zgodnie z zależnością (3) na podstawie zmierzonych wartości przewodnictwa temperaturowego. Należy wprowadzić do zbioru właściwości materiałowych badanego tworzywa pliki (tablice) wartości ciepła właściwego [$T, c_p(T)$] i gęstości [$T, \rho(T)$]. Dane te mogą pochodzić z dostępnych baz danych lub tablic właściwości termofizycznych materiałów o zbliżonych do badanego właściwościach lub mogą być wyznaczone eksperymentalnie jak to ma miejsce w niniejszej pracy (rys. 9–10).

Zmiany gęstości są automatycznie przeliczane w programie na podstawie wprowadzonych danych dylatometrycznych czyli względnej zmiany wymiarowej $\Delta L/L (T)$ i gęstości materiału w temperaturze otoczenia ρ_o , zgodnie z zależnością

$$\rho = \frac{\rho_o}{(1 + 3 \cdot \Delta L / L)} \quad (7)$$

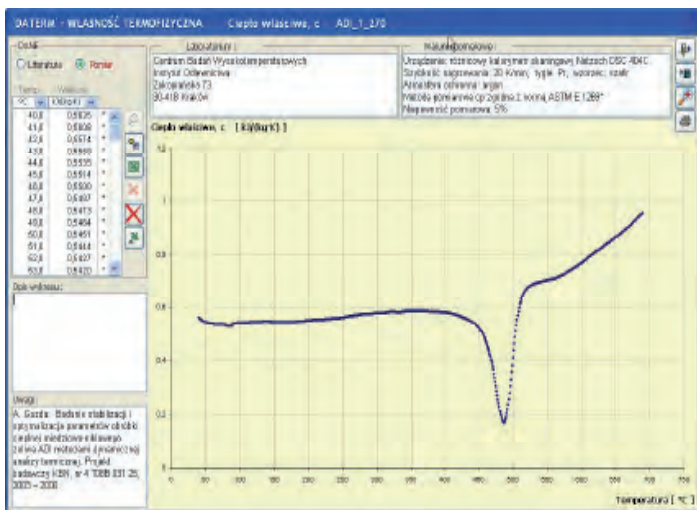
Dane dylatometryczne badanych materiałów zostały wyznaczone za pomocą dylatometru Linseis L75 i zaczerpnięte z bazy danych termofizycznych DATERM, opracowanej w ramach projektu badawczego zamawianego Nr PBZ-KBN-114/T08/2004 [3]. Na rysunku 8 przedstawiono przykładowy widok ekranu bazy danych DATERM, gdzie dane te zostały zgromadzone, prezentując przebieg zmian wymiarowych badanego żeliwa sferoidalnego (1_ZSF) wraz z opisem warunków pomiarowych i dodatkowymi charakterystykami.



Rys. 9. Rozszerzalność liniowa badanego żeliwa sferoidalnego miedziowo-niklowego (widok ekranu bazy DATERM)

Fig. 9. Linear expansion of the examined copper-nickel ductile iron (a screenshot of DATERM database)

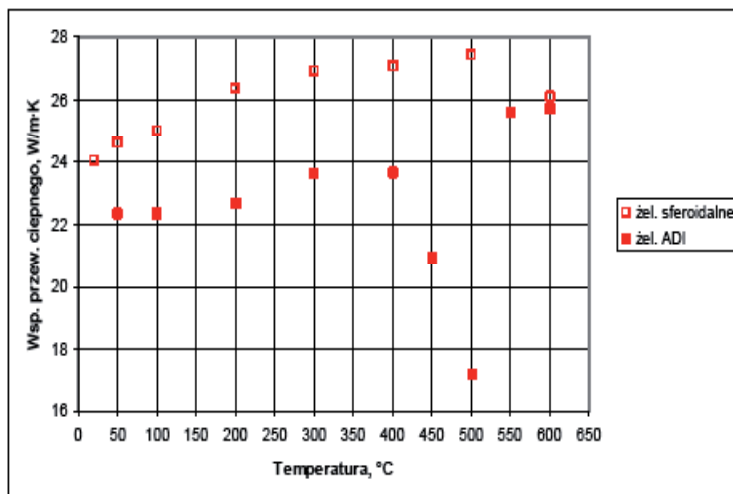
Ciepło właściwe badanego materiału zostało wyznaczone za pomocą różnicowego kalorymetru skaningowego Netzsch DSC 404C. Przykładowy widok ekranu bazy danych DATERM prezentujący przebieg ciepła właściwego zmierzonego dla badanego żeliwa ADI (ADI_1_270) wraz z opisem warunków pomiarowych i dodatkowymi charakterystykami pokazano na rysunku 10.



Rys. 10. Ciepło właściwe badanego miedziowo-niklowego żeliwa ADI (widok ekranu bazy DATERM)

Fig. 10. Specific heat of the examined copper-nickel ADI iron (a screenshot of DATERM database)

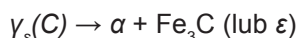
Wykres zależności przewodności cieplnej od temperatury dla obu badanych gatunków żeliwa sferoidalnego przedstawiono na rysunku 11.



Rys. 11. Przebieg zmian współczynnika przewodzenia ciepła badanych gatunków żeliwa sferoidalnego miedziowo-niklowego

Fig. 11. Changes of heat conductivity in the examined copper-nickel ductile iron grades

Analiza wykresu wykazuje, że w temperaturze około 400°C można zaobserwować gwałtowną (pik) zmianę przebiegu $\lambda(T)$ dla żeliwa ADI, która jest wynikiem wystąpienia efektu cieplnego zarejestrowanego na krzywej $c_p(T)$ (rys. 10). Ten egzotermiczny efekt cieplny występujący na krzywych DSC, jest powszechnie uważany [4, 5] za efekt rozpadu struktury ausferrytycznej w wyniku zachodzenia przemian fazowych, charakteryzujących procesy wydzieleniowe prowadzące do rozpadu składnika struktury ausferrytycznej - austenitu nasyconego węglem na ferryt i cementyt, według reakcji:



W zakresie od 400 do 500°C następuje zatem dla żeliwa ADI proces rozpadu struktury ausferrytycznej i całkowity zanik austenitu wysokowęglowego, co znajduje swoje odbicie w przebiegu wyznaczonych w pracy właściwości termofizycznych - na krzywej $\lambda(T)$ (rys.11) i w mniejszym stopniu, na eksperymentalnej krzywej $a(T)$ (rys. 8).

6. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań można wysunąć następujące wnioski:

1. Struktura ausferrytyczna wykazuje około 20% niższe wartości współczynnika przewodnictwa temperaturowego a dla ausferrytu niż dla perlitu przy zachowaniu stałej morfologii grafitu (postać kulkowa).
2. Struktura ausferrytyczna wykazuje około 10% niższe wartości współczynnika przewodzenia ciepła λ dla ausferrytu niż dla perlitu przy zachowaniu stałej morfologii grafitu (postać kulkowa).
3. Wyznaczenie zależności przewodnictwa temperaturowego w funkcji temperatury pozwala na identyfikację procesu rozpadu struktury ausferrytycznej w żeliwie ADI, przy czym ze względu na wysoką czułość ciepła właściwego na różnice strukturalne; identyfikacja ta w oparciu o zależność przewodności cieplnej od temperatury jest jeszcze bardziej efektywna.
4. Niskie wartości przewodnictwa temperaturowego i przewodności cieplnej są zgodne z danymi literaturowymi dla żeliwa z grafitem kulkowym [1].
5. Badania przewodnictwa temperaturowego wskazują na niezwykle szerokie możliwości tej metody badawczej, szczególnie w zakresie analizy strukturalnej materiałów stosowanych w odlewnictwie, jak i komputerowej symulacji procesów krzepnięcia i studzenia stopów odlewniczych.

Podziękowania

Pracę wykonano w ramach działalności statutowej Instytutu Odlewnictwa pt: „Opracowanie metodyki badań i przewodnictwa cieplnego wybranych materiałów odlewniczych” (zlec. 8019/00).

Literatura

1. Holmgren D.: Review of thermal conductivity of cast iron, *International Journal Cast Metal Research* 18 [6], (2005), pp. 331–345
2. Holmgren D., Svensson I.L.: Thermal conductivity-structure relationships in grey cast iron, *International Journal Cast Metal Research* 18 [6], (2005), pp. 321–330
3. Gazda A., Madej M.: Kompleksowa baza danych właściwości termofizycznych metali, stopów oraz materiałów formierskich i ceramicznych, w: *Innowacje w odlewnictwie. Cz. II*, Instytut Odlewnictwa, Kraków, 2008, s. 357–367, ISBN 978-83-88770-35-7
4. Baricco M., Franzosi G., Nada R., Battezzati L.: Thermal effects due to tempering of austenite and martensite in austempered ductile irons, *Material Science and Technology*, 15 [6], (1999), pp. 643–646
5. Perez M.J., Cisneros M.M., Lopez H.F., Calderon H.A., Valdes E.: Microstructural evolution in austempered ductile iron during non-isothermal annealing, *International Journal Cast Metal Research* 16 [1-3], (2003), pp. 203–206

Recenzent: prof. dr hab. inż. Marek Hetmańczyk