

## CIEPŁO SPEKTRALNE KRYSZALIZACJI ŻELIWA SZAREGO

JURA Zbigniew  
Katedra Mechaniki Teoretycznej  
Politechniki Śląskiej

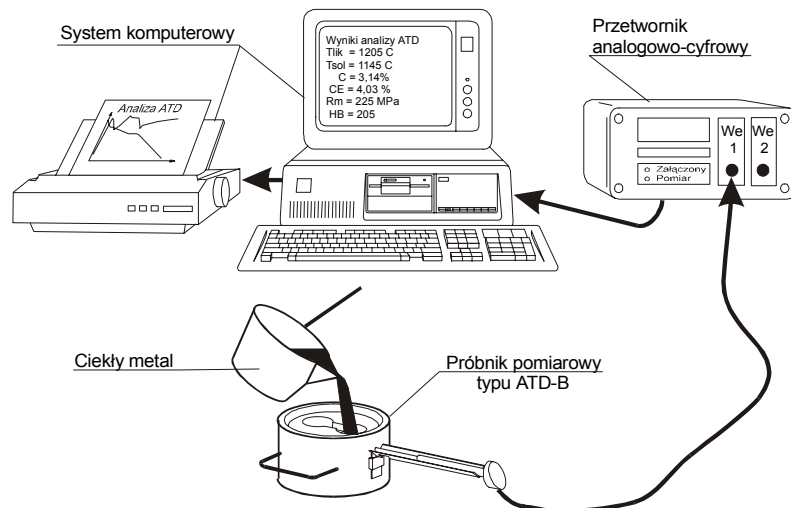
### STRESZCZENIE

Wykorzystując autorską metodę określania ciepła spektralnego krystalizujących faz oraz dane otrzymane w wyniku próby ATD wyznaczono wydzielanie ciepła w funkcji temperatury dla żeliwa. Na podstawie wyznaczonych funkcji określono ilość ciepła krystalizacji wydzielającego się podczas wydzielania fazy gama oraz ciepła przemiany eutektycznej. Znajomość funkcji spektralnego ciepła krystalizacji pozwala na szersze poznanie zjawisk występujących podczas krystalizacji, szczególnie w powiązaniu z innymi metodami badawczymi lub symulacyjnymi.

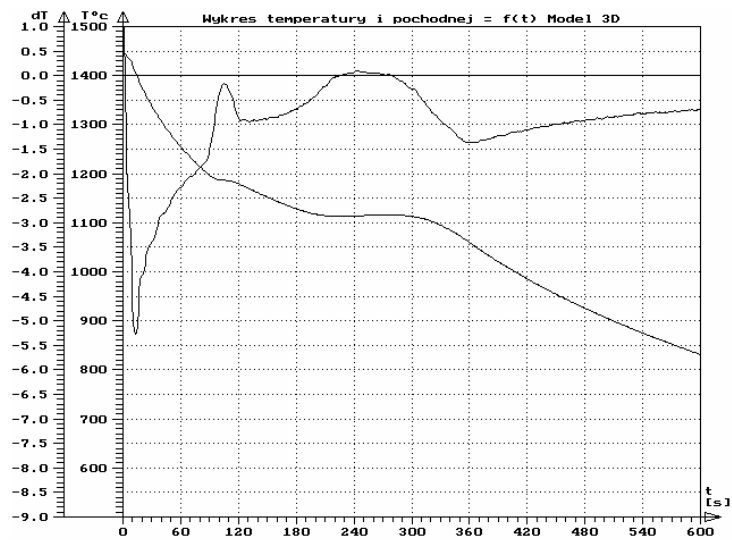
### 1. Wstęp

We współczesnych badaniach zjawisk występujących podczas krystalizacji stopów metali jednym z bardzo istotnych parametrów jest ciepło krzepnięcia. W większości przypadków znane jest tylko całkowite ciepło krzepnięcia. Jednym z testów pozwalających na badanie zjawisk cieplnych podczas krystalizacji jest próba ATD (Analizy Termicznej i Derywacyjnej). Do standardowego próbnika wlewany jest ciekły metal, który krzepnie we wnętrzu próbnika. Termopara zainstalowana w środku próbnika pozwala na pomiar temperatury. Temperatura jest mierzona i rejestrowana przez komputer wyposażony w przetwornik analogowo cyfrowy Crystaldigraph PC. Aparatura pomiarowa została pokazana na rys. 1.

Zarejestrowany przebieg zmian temperatury wraz z pierwszą pochodną po czasie obrazuje kinetykę procesu krystalizacji. Wykres próby dla żeliwa szarego o składzie: C-3,2% Si-1,3% Mn-0,4% P-0,2% przedstawiono na rys. 2.



Rys. 1. Zestaw aparatury pomiarowej Crystaldigraph PC do próby ATD  
 Fig. 1. Crystaldigraph PC equipment for TDA tests

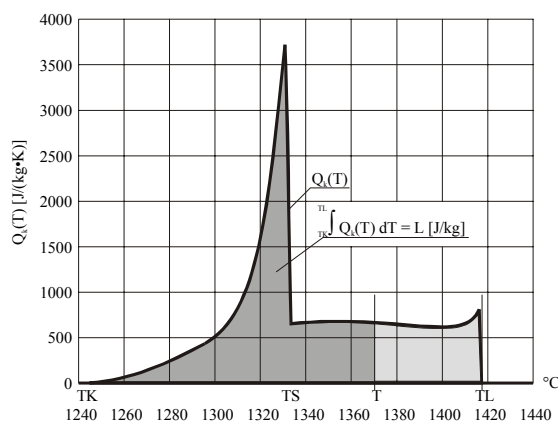


Rys. 2. Wykres próby ATD dla żeliwa szarego  
 Fig. 2. Diagram of TDA test for gray cast iron

## 2. Ciepło spektralne krystalizacji

Jednym z parametrów opisujących przebieg krystalizacji jest ciepło spektralne zdefiniowane przez Wiejnika w pracy [1]. Funkcja ta jest zależna od temperatury i określa ilość ciepła wydzielającego się lub pochłoniętego przy zmianie temperatury. Przykładową funkcję oraz definicję całkowitego ciepła krzepnięcia pokazano na rys.3.

Ponieważ funkcja ta jest zależna wyłącznie od temperatury, pozwala na wygodną analizę zjawisk cieplnych dla poszczególnych faz. Jedynym warunkiem jest znajomość temperatur przemian fazowych. Oczywiście gdy temperatury pomiędzy dwiema fazami różnią się w niewielkim stopniu, spowoduje to nałożenie się wzajemnych efektów cieplnych na siebie i brak możliwości analizy tych faz osobno.



Rys. 3. Funkcja spektralnego ciepła krystalizacji  
Fig. 3. Spectral heat function of crystallisation

## 3. Metoda określania ciepła spektralnego

Określenie ciepła spektralnego jest złożonym zadaniem z punktu widzenia teorii pomiarów. Wyczerpująco zostało to omówione w pracy [2]. Zaproponowana metoda polega na wykorzystaniu numerycznej symulacji procesu krzepnięcia w standardowym próbniku ATD. Do programu obliczeniowego jest wprowadzany model krzepnącego metalu w postaci funkcji ciepła spektralnego. Funkcja została określona w postaci parametrycznej złożonej z dwóch członów dla dwóch faz krystalizacji [3, 4]:

$$Q_k(T) = \frac{U_{zT} \cdot z_c \cdot \exp(z_c(W - T))}{(1 + \exp(z_c(W - T)))^2} + \frac{U_{LT} \cdot KLT}{1 + \exp(z_c(W - T))}$$

gdzie:

$$KLT = \frac{1}{1 + \exp(z_k (T - W_k))}$$

oznaczenia:

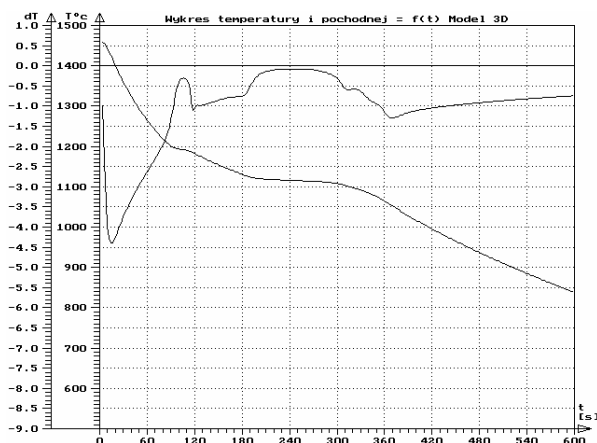
- $U_{zt}$  – stała zarodkowania [J/kgK],
- $z_c$  – intensywność wydzielania ciepła [1/K],
- $T$  – temperatura [°C],
- $W$  – temperatura największego efektu cieplnego [°C],
- $U_{LT}$  – stała wzrostu kryształu [J/kgK],
- $KLT$  – funkcja wyczerpywania ciekłego metalu po zetknięciu kryształów,
- $z_k$  – intensywność wyczerpywania ciekłego metalu po zetknięciu kryształów [1/K]

$W_k$  – temperatura przejścia w procesie kończenia krystalizacji.

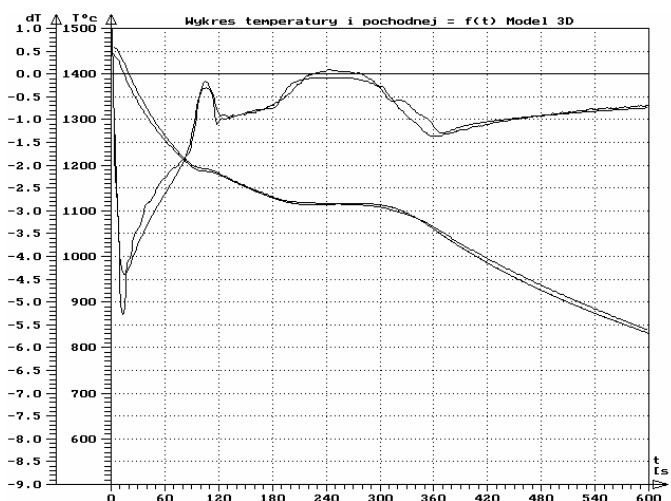
Następnie wykonywany jest proces iteracyjny w trakcie którego przeprowadzane są obliczenia symulacyjne oraz dobierane są parametry funkcji. Jako funkcję kryterialną (niezbędną do określenia jakości odtworzenia procesu) przyjęto średnią bezwzględną odchyłkę temperatury zarejestrowanej i wyliczonej. Proces iteracyjny prowadzony jest tak długo, aż nie uzyskuje się znaczącej poprawy wartości funkcji kryterialnej.

#### 4. Realizacja obliczeń

Wykonano obliczenia dla zarejestrowanej próby ATD, pokazanej na rys. 2. W wyniku otrzymano przebieg symulacji pokazany na rys. 4. oraz nałożenie przebiegu temperatury i pochodnej dla próby ATD i symulacji na rys. 5. W wyniku cyklu obliczeniowego otrzymano średnią bezwzględną odchyłkę temperatury wynosząca 4,5 °C.



Rys. 4. Przebieg temperatury i pochodnej procesu symulowanego  
Fig. 4. Curves of temperature and derivative in simulation process



Rys. 5. Nałożenie przebiegu temperatury dla próby ATD i symulacji  
 Fig. 5. Comparison of real and simulation of TDA curves

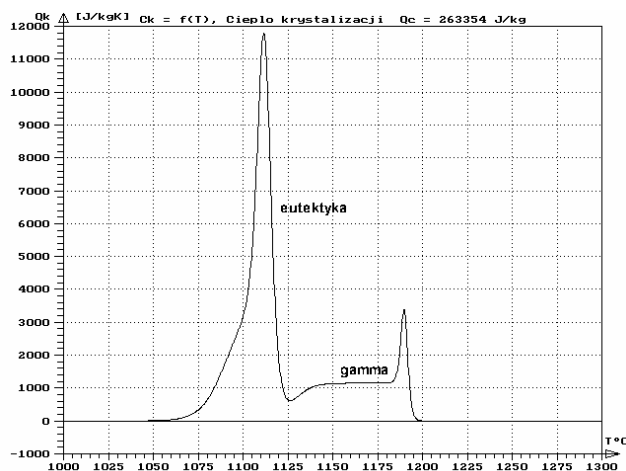
Dla poszczególnych faz otrzymano następujące funkcje spektralnego ciepła krystalizacji:

$$Q_{k(\gamma)} = \frac{14000 \cdot 0,8 \cdot \exp(0,8 \cdot (1190 - T))}{(1 + \exp(0,8 \cdot (1190 - T)))^2} + \frac{1150 \cdot \frac{1}{1 + \exp(0,2 \cdot (T - 1128))}}{1 + \exp(0,8 \cdot (1190 - T))}$$

$$Q_{k(eutekt)} = \frac{100000 \cdot 0,4 \cdot \exp(0,4 \cdot (1112 - T))}{(1 + \exp(0,4 \cdot (1112 - T)))^2} + \frac{3500 \cdot \frac{1}{1 + \exp(0,15 \cdot (T - 1090))}}{1 + \exp(0,4 \cdot (1112 - T))}$$

Wykresy funkcji ciepła spektralnego dla sumy dwóch faz oraz całkowite wydzielone ciepło pokazano na rys. 6. Obliczone ciepło krystalizacji dla poszczególnych faz wyniosło odpowiednio:

$$\begin{aligned} L_{\gamma} &= 85 \quad [\text{kJ/kg}] \\ L_{eutekt} &= 178 \quad [\text{kJ/kg}] \\ L_{krzep} &= 263 \quad [\text{kJ/kg}] \end{aligned}$$



Rys. 6. Funkcja ciepła spektralnego krystalizacji żeliwa  
Fig. 6. Spectral heat curves for gray cast iron

## 5. Wnioski

Przedstawione wyniki pozwalają na poszerzenie obserwacji zjawisk zachodzących w krystalizującym metalu. Dzięki wykorzystaniu stosunkowo prostej próby ATD istnieje możliwość przeprowadzania badań zarówno w warunkach laboratoryjnych jak i przemysłowych. Dzięki możliwości określenia rozkładu wydzielonego ciepła na poszczególne fazy oraz wykorzystując dodatkowe badania metalograficzne (metalografia ilościowa) istnieje możliwość obliczenia ciepła krzepnięcia osobno dla poszczególnych faz, lub dla znanego ciepła, określenie udziału faz.

## Literatura

- [1] Wiejnik A.I.: Teorija zatwierdiewanija otlivki. Moskwa, Maszgiz 1960 s 138.
- [2] Jura Z.: Metoda określania spektralnego ciepła krystalizacji na podstawie próby ATD. Praca doktorska. Częstochowa 1997
- [3] Mc Adams W.H>: Heat transmission wyd. III 1954
- [4] Jura Z., Jura S.: Funkcje krystalizacji stopu AK9 w metodzie ATD. Krzepnięcie Metali i Stopów z. 32 s.152. PAN Katowice 1997

## CRYSTALLISATION SPECTRAL HEAT OF GRAY CAST IRON

### ABSTRACT

TDA tests are used for estimation of heat emission in temperature function for cast iron. It was also the base for estimation of crystallisation heat for gamma and eutectic phase. The knowledge of spectral heat allows to investigate crystallisation processes.

Recenzował

Prof. dr hab. inż. Janusz Braszczyński