

WPŁYW SPEKTRALNEGO CIEPŁA KRYSTALIZACJI NA POSTAĆ KRZYWEJ ATD

JURA Zbigniew

Katedra Mechaniki Teoretycznej, Politechnika Śląska
44-100 Gliwice ul. Krzywoustego 7, POLAND

STRESZCZENIE

Przedstawiono analizę wpływu spektralnego ciepła krystalizacji na postać krzywej analizy termicznej i derywacyjnej (ATD). Spektralne ciepło krystalizacji to funkcja opisująca wydzielanie ciepła krystalizacji względem temperatury $[Q_k(T)]$. Dla określenia tego wpływu zastosowano autorski program komputerowy SYM-ATD do symulacji numerycznej procesu krystalizacji metalu.

1. WSTĘP

W obliczeniach symulacyjnych procesów cieplnych uwzględniających przemiany fazowe niezbędne jest opisanie wydzielania ciepła topienia, krzepnięcia i parowania w funkcji temperatury. Ogólnie pod pojęciem ciepła krzepnięcia rozumie się sumę ciepła wydzielanego w tym procesie. Informacja taka dla symulacji cieplnej jest niewystarczająca. Zwykle podaje się jeszcze zakres temperatur krzepnięcia (T_L-T_S). Natomiast rozkład tego ciepła w tym zakresie przyjmuje się jako liniowy, paraboliczny lub inny. Założenie to jest do przyjęcia gdy stosujemy symulację wymiany ciepła dla szerokiego zakresu temperatur ciała od stanu ciekłego do stałego – odległych od temperatur krzepnięcia (T_L-T_S).

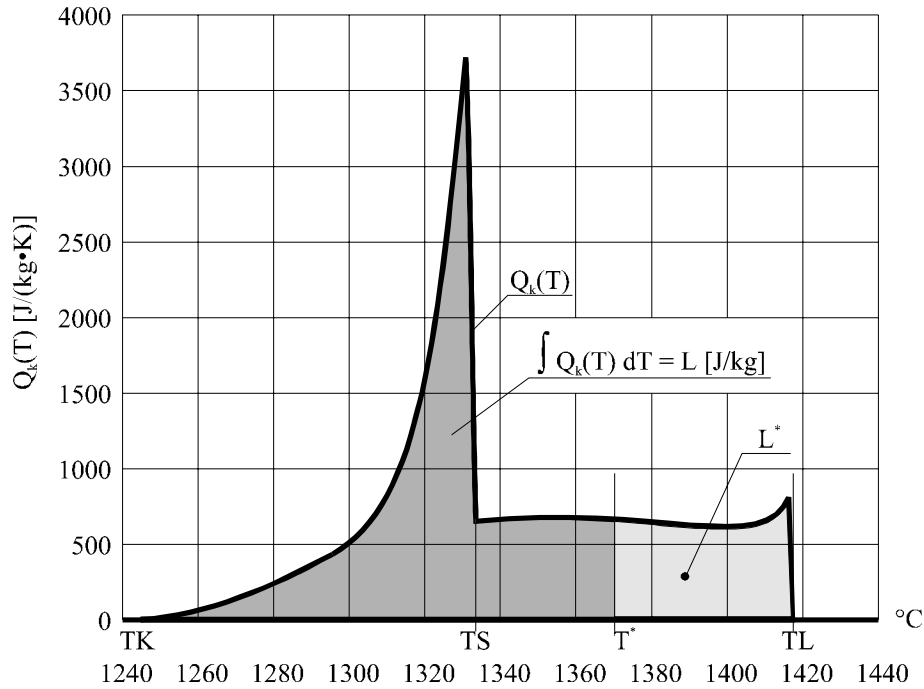
Istnieje wiele metod opisu matematycznego uwzględniającego człon źródłowy umożliwiający wprowadzenie wydzielania się ciepła krystalizacji (również innych źródeł ciepła np. reakcji chemicznych). Dwie najczęściej stosowane metody [1,2] opisują człon źródłowy jako funkcję czasu albo temperatury. Stosowanie funkcji opisującej wydzielanie ciepła w zależności od zmian temperatury nazywaną dalej spektralnym ciepłem krystalizacji [3] pozwala na określanie kinetyki krzepnięcia. Problem ten jest szczególnie interesujący dla badania procesów krystalizacji, modyfikacji i powstawania faz w czasie przemiany cieczy-ciało stałe, lub w czasie przemian w ciele stałym. Połączenie symulacji komputerowej krystalizacji z metodą ATD pozwala na jednoznaczną ocenę procesu krystalizacji. Dla udowodnienia tej tezy przedstawiono wpływ ciepła spektralnego krystalizacji na kinetykę procesów cieplnych (dT/dt) w krzepnięym metalu.

2. OPIS FUNKCJI SPEKTRALNEGO CIEPŁA KRYSZALIZACJI

Funkcja spektralnego ciepła krystalizacji jest funkcją temperatury, co można zapisać następująco:

$$Q_k = Q_k(T) \text{ [J/(kg} \cdot \text{K)]}$$

Przykładowy wykres funkcji $Q_k(T)$ (dla żeliwa) przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Przykładowa postać funkcji spektralnego ciepła krystalizacji

Fig. 1. Example function of crystallisation spectral heat

Na wykresie zaznaczono charakterystyczne temperatury likwidus, solidus i końca krystalizacji (T_L , T_S , T_K) oraz temperaturę T^* . Ilość ciepła krystalizacji wydzielająca się podczas zmiany temperatury od wartości T_L do T^* odpowiada następującej całce:

$$L^* = L^*(T^*) = \int_{T^*}^{T_L} Q_k(T) dT$$

Ponieważ całkowite spektralne ciepło krystalizacji obejmuje przedział temperatur, od temperatury początku krzepnięcia T_L do temperatury końca krzepnięcia T_K to zachodzi zależność:

$$L = \int_{T_K}^{T_L} Q_k(T) dT$$

gdzie:

L – całkowite ciepło krzepnięcia [J/kg].

Funkcję spektralnego ciepła krystalizacji należy interpretować następująco: przy spadku temperatury od T_1 do T_2 wydziela się ilość ciepła odpowiadająca całce z funkcji $Q_k(T)$:

$$L_{T_1 \rightarrow T_2} = \int_{T_2}^{T_1} Q_k(T) dT$$

Taka interpretacja prowadzi do wniosku że ciepło krystalizacji tak opisane może się wydzielać tylko w przypadku spadku temperatury [4].

Spektralne ciepło krystalizacji zostało wprowadzenie do równania przewodnictwa cieplnego jako tzw. zastępcza pojemność cieplna [5,6]:

$$c_p = \begin{cases} c_L & T > T_L \\ (c_{L \rightarrow S} + Q_k(T)) & T_S \leq T \leq T_L \\ c_S & T < T_S \end{cases}$$

gdzie:

c_p – zastępcza pojemność cieplna,

c_L – ciepło właściwe w stanie ciekłym,

c_S – ciepło właściwe w stanie stałym,

c_{L-S} – średnie ciepło właściwe w przedziale temperatur T_L i T_S .

Równanie przewodnictwa ciepła jest rozwiązywane w programie komputerowym SYM-ATD metodą różnic skończonych w konwencji entalpowej pozwalającej na usunięcie silnej nieliniowości równania ze względu na zastępczą pojemność cieplną szczególnie w zakresie temperatur krystalizacji.

3. WPLYW SPEKTRALNEGO CIEPŁA KRYSTALIZACJI NA POSTAĆ KRZYWEJ ATD

Metoda analizy termicznej i derywacyjnej (metoda ATD) jest szeroko rozpowszechniona w praktyce przemysłowej dla oceny zawartości pierwiastków (krzywa stygnięcia) oraz właściwości mechanicznych, struktury i innych cech. Informacje te określa się na podstawie odczytanych punktów charakterystycznych na krzywej stygnięcia $T(t)$ oraz krzywej krystalizacji dT/dt . Krzywa stygnięcia i jej pochodna opisują wiele cech i właściwości stopów [7,8,9].

O właściwościach decyduje proces stygnięcia i krystalizacji, stąd wyniknęła potrzeba pokazania jak wpływa spektralne ciepło krystalizacji na postać krzywej ATD.

Próba ATD polega na zalaniu próbника ciekłym metalem i pomiarze temperatury za pomocą termopary umieszczonej w centralnym jego punkcie. Zmierzona temperatura jest rejestrowana przez program komputerowy który równocześnie określa wartość pochodnej temperatury w czasie oraz rysuje wykres temperatury i pochodnej w funkcji czasu. Analogiczną próbę symulowano przy pomocy programu ATD-SYM wprowadzając odpowiednie warunki geometryczne, fizyczne i początkowe metalu i próbника. Integralnym składnikiem warunków fizycznych dla metalu była funkcja spektralnego ciepła krystalizacji.

Przeprowadzono 4 symulacje dla tych samych parametrów zmieniając tylko postać funkcji spektralnego ciepła krystalizacji (przy zachowaniu stałej wartości całkowitego ciepła krzepnięcia 270 kJ/kg). Zastosowano następujące postacie funkcji:

- prostokątny rys. 2 (wariant 1),
- trójkątny rys. 4 (wariant 2),
- dzwonowy rys. 6 (wariant 3),
- eutektoidalny rys. 8 (wariant 4).

Wariant 1.

W przypadku rozkładu prostokątnego (rys. 3) obserwuje się w miarę liniowy spadek temperatury w przedziale temperatur $T_L - T_S$. Natomiast pochodna w zakresie krzepnięcia stopu nie ulega znacznym zmianom. Widoczne są na krzywej krystalizacji charakterystyczne piki – dodatni w momencie rozpoczęcia krystalizacji i ujemny w momencie jej zakończenia.

Wariant 2.

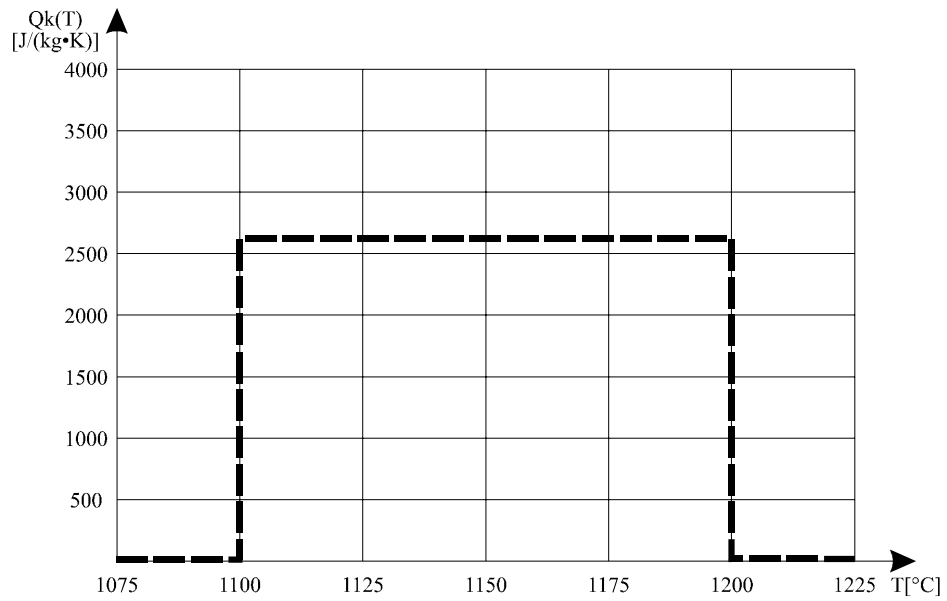
W przypadku rozkładu trójkątnego (rys. 5) wyraźnie widoczne jest łagodne przejście linii temperatury pomiędzy przedziałami temperatur likwidus i solidus. W końcowym punkcie krystalizacji widoczny jest charakterystyczny ujemny pik wskazujący koniec procesu krystalizacji.

Wariant 3.

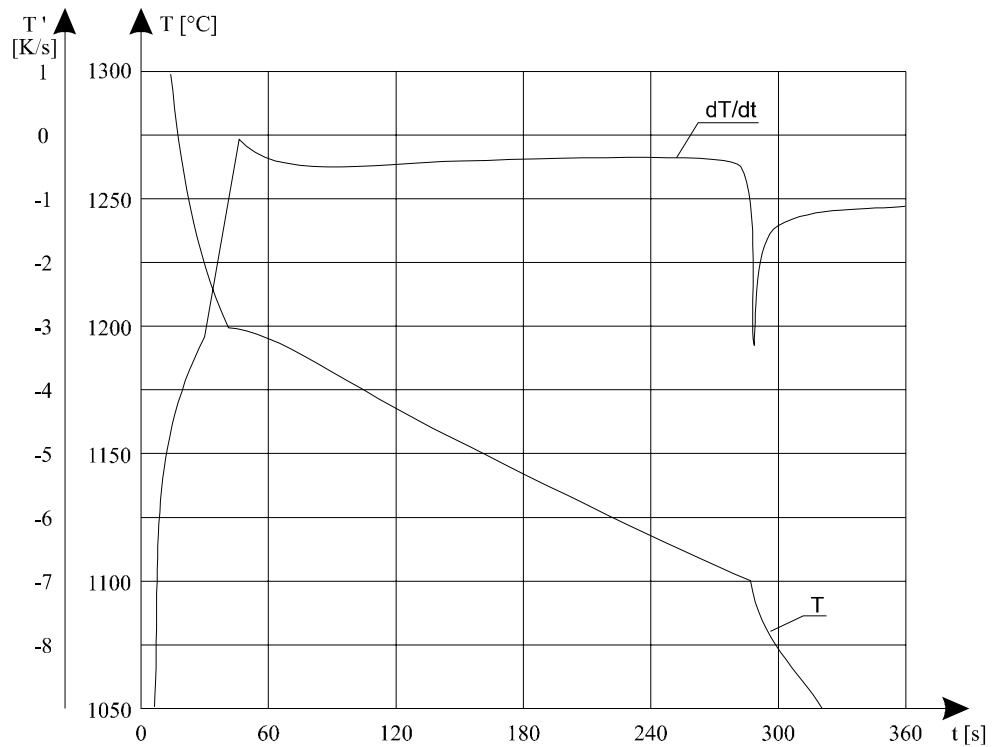
Dla rozkładu dzwonowego (rys. 7) podobnie jak dla wariantu 2 widoczne jest łagodne przejście linii temperatury w zakresie temperatur likwidus i solidus. Zanika natomiast charakterystyczny pik końca krystalizacji.

Wariant 4.

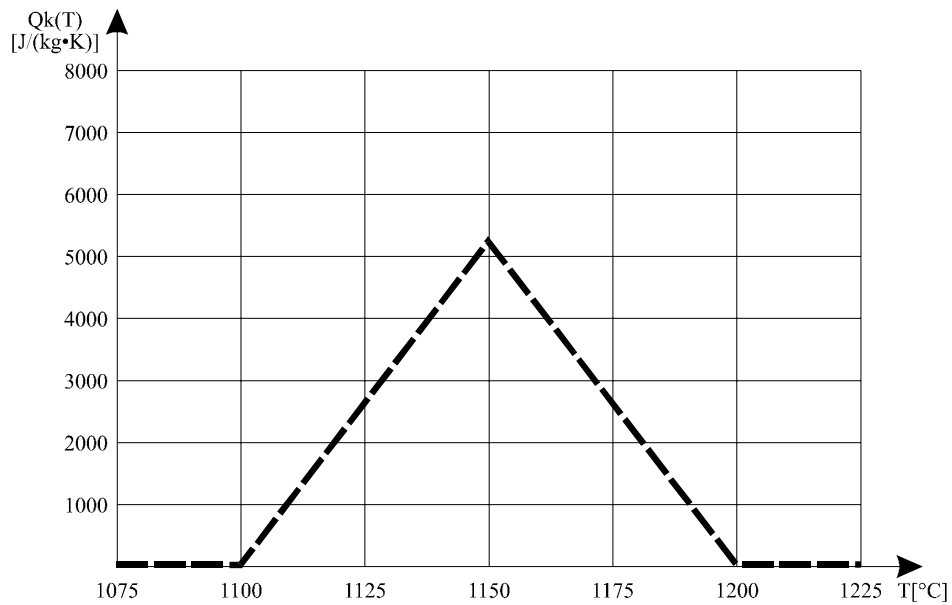
Dla rozkładu eutektoidalnego wykres krzywej krzepnięcia i krystalizacji wyraźnie przypomina wykresy otrzymywane w próbach rzeczywistych dla stopów metali krzepnących z wyraźną eutektyką. Na wykresie krzywej krystalizacji widoczne są wyraźnie piki początku krystalizacji, krystalizacji eutektycznej oraz końca krystalizacji.



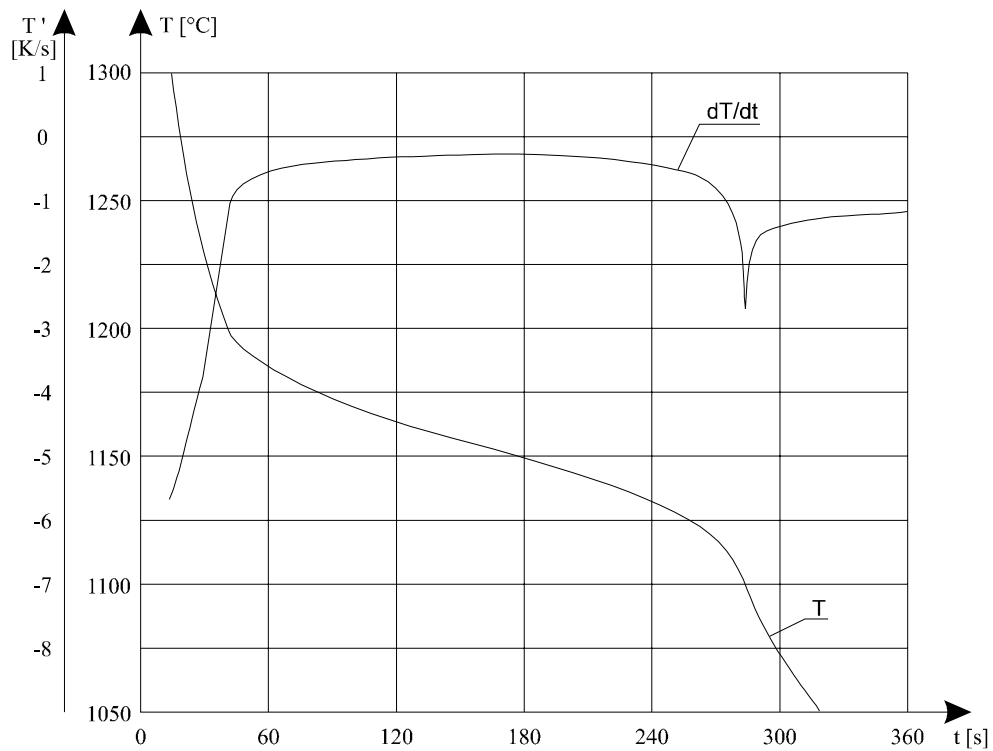
Rys. 2. Wykres funkcji spektralnego ciepła krystalizacji. Wariant 1
 Fig. 2. Diagram of crystallisation spectral heat. Version 1



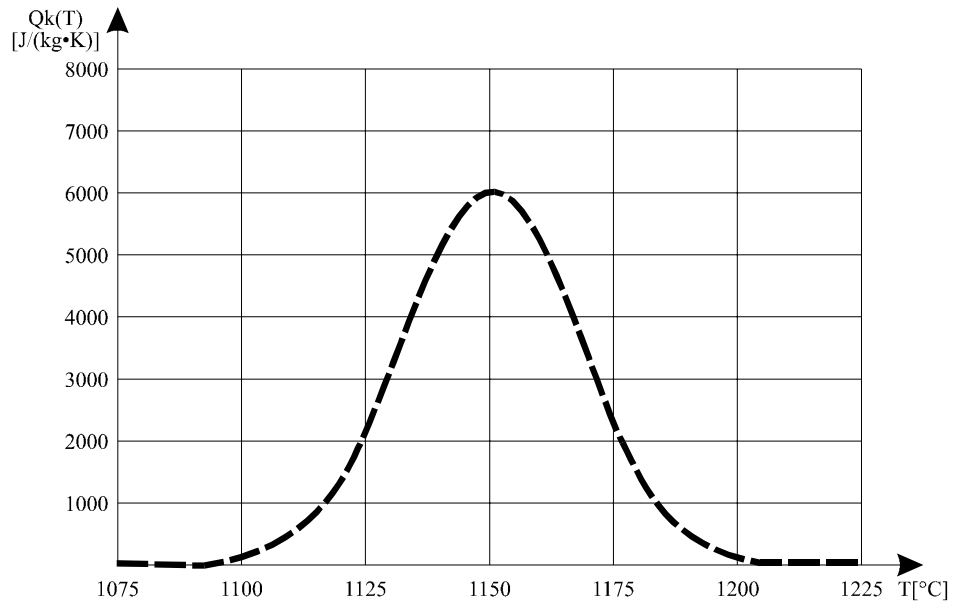
Rys. 3. Wykres temperatury i pochodnej dla symulacji próby ATD. Wariant 1
 Fig. 3. Diagram of temperature and derivative for simulation of ATD probe. Version 1



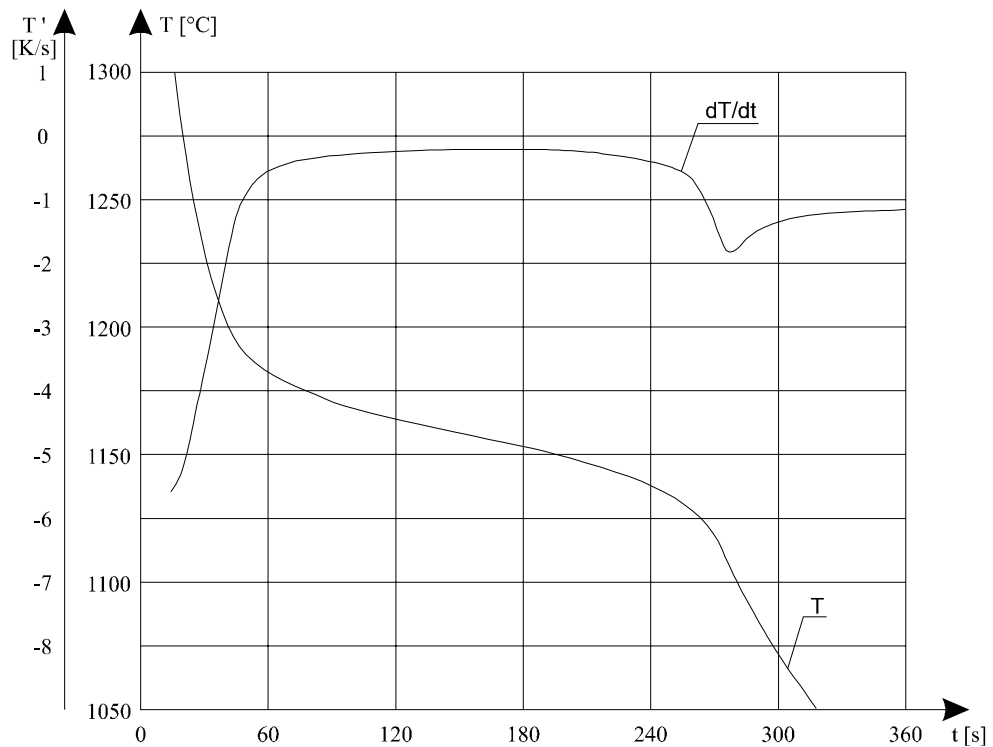
Rys. 4. Wykres funkcji spektralnego ciepła krystalizacji. Wariant 2
 Fig. 4. Diagram of crystallisation spectral heat. Version 2



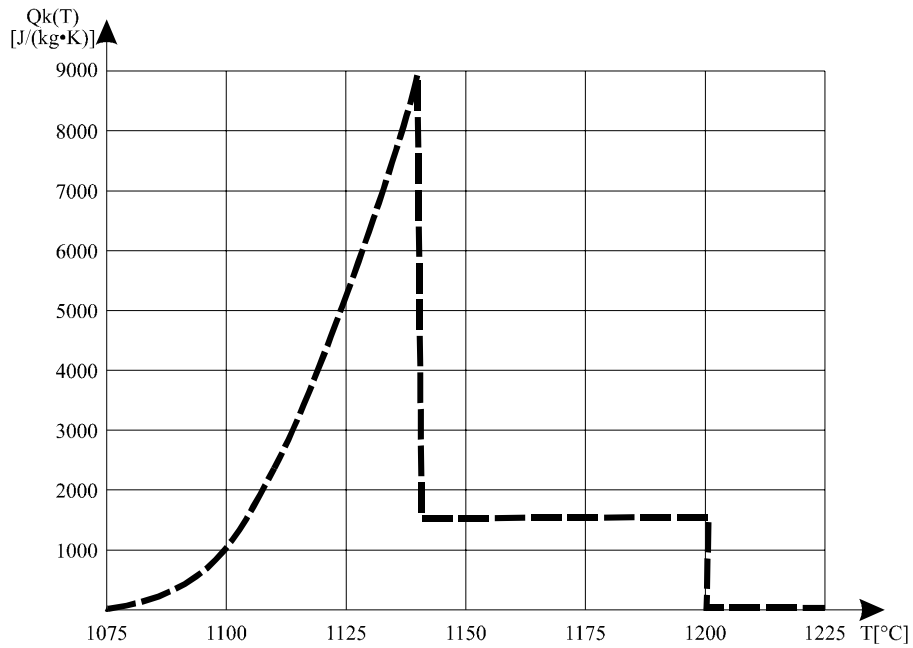
Rys. 5. Wykres temperatury i pochodnej dla symulacji próby ATD. Wariant 2
 Fig. 5. Diagram of temperature and derivative for simulation of ATD probe. Version 2



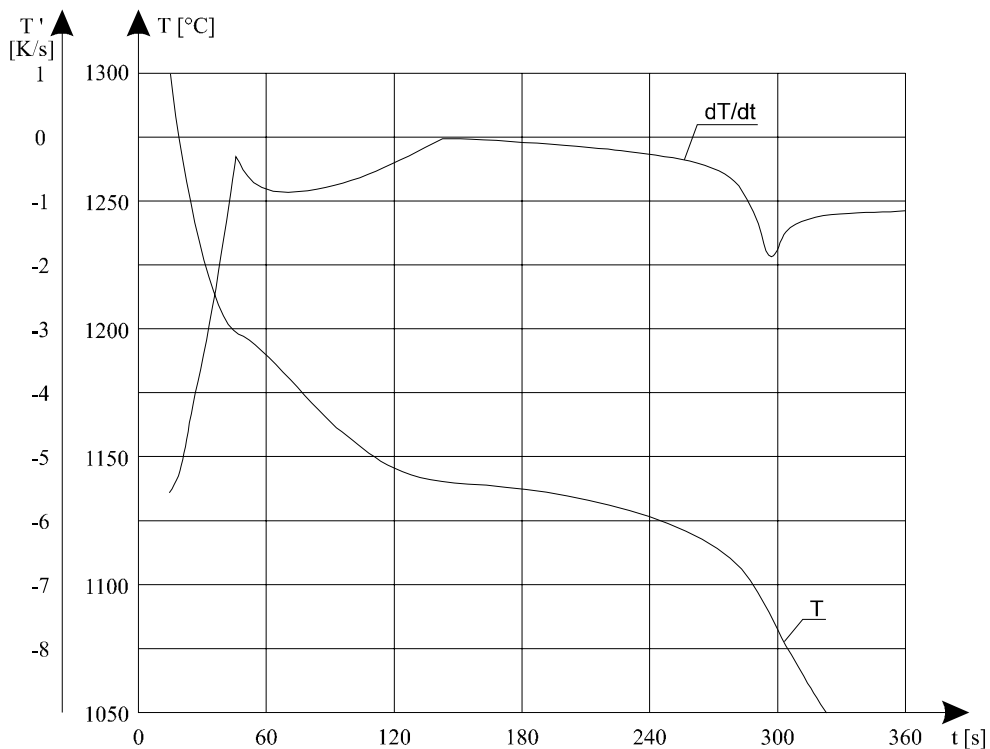
Rys. 6. Wykres funkcji spektralnego ciepła krystalizacji. Wariant 3
 Fig. 6. Diagram of crystallisation spectral heat. Version 3



Rys. 7. Wykres temperatury i pochodnej dla symulacji próby ATD. Wariant 3
 Fig. 7. Diagram of temperature and derivative for simulation of ATD probe. Version 3



Rys. 8. Wykres funkcji spektralnego ciepła krystalizacji. Wariant 4
 Fig. 8. Diagram of crystallisation spectral heat. Version 4



Rys. 9. Wykres temperatury i pochodnej dla symulacji próby ATD. Wariant 4
 Fig. 9. Diagram of temperature and derivative for simulation of ATD probe. Version 4

4. WNIOSKI

Z przedstawionych wyników symulacji krzepnięcia próbnika widać wyraźnie że istnieje ścisła zależność między spektralnym ciepłem krystalizacji a pierwszą pochodną temperatury stygnącego metalu. Ten skrócony cykl obliczeń wykazuje, że metoda ATD pozwala na obserwacje kinetyki procesu krystalizacji. Czynniki ingerujące w proces krystalizacji mogą być obserwowane na krzywych stygnięcia $T(t)$ i krzywych krystalizacji dT/dt . Obserwacje te mogą być jakościowe, a po odpowiednim dopracowaniu również ilościowe. Wyniki przedstawionej symulacji komputerowej potwierdzają również przydatność metody ATD do szybkiej oceny właściwości stopów a tym samym możliwości stabilnej i jakościowej produkcji odlewów.

LITERATURA

- [1] Longa W.: Krzepnięcie odlewów Wydawnictwo „Śląsk” Katowice 1985
- [2] Longa W.: Theoretical Analysis of the Empirical Methods Applied in Foundry Engineering for Determining the Thermal Effects of the Crystallisation Process. Metalurgy and Foundry Engineering 1995 vol.21 No.2 s.127
- [3] Wiejnik A.I.: Teorija zatwierdianija otlivki. Moskwa, Maszgiz 1960
- [4] Jura Z.: Metoda określania spektralnego ciepła krystalizacji na podstawie próby ATD. Rozprawa doktorska Częstochowa 1997.
- [5] Mochnacki B., Suchy J.S.: Modelowanie i symulacja krzepnięcia odlewów, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1993.
- [6] Mochnacki B., Suchy J.S.: Numerical methods in computations of foundry processes, Polish Foundrymen's Technical Association, Kraków 1995.
- [7] Jura S.: Określanie zawartości niektórych pierwiastków oraz wskaźników składu chemicznego żeliwa szarego. Nowoczesne metody oceny jakości stopów. PAN Katowice 1985.
- [8] Jura S.: Ocena struktury metalograficznej odlewu z wykorzystaniem metody ATD. Nowoczesne metody oceny jakości stopów. PAN Katowice 1985.
- [9] Jura S.: Ocena właściwości mechanicznych staliwa L30H przy pomocy metody ATD. Nowoczesne metody oceny jakości stopów. PAN Katowice 1985.

THE INFLOW OF CRYSTALLISATION SPECTRAL HEAT FOR ATD CURVE SHAPE

In paper was presented inflow of crystallisation spectral heat for thermal and derivative curves (TDA method). The crystallisation spectral heat function describes emission of heat vs. temperature. For describing of this inflow was used computer program SYM-ATD for crystallisation process numerical simulation.

Praca finansowana przez KBN nr 7 T08B 024 13.