

PRZYCZYNNIKI DO SYMULACJI KOMPUTEROWEJ KRZEPNIĘCIA ODLEWÓW STOSOWANYCH W PRZEMYSŁE

Z. GÓRNY¹, S. KLUSKA-NAWARECKA², H. POŁCIK³, S. BIENIASZ⁴

^{1, 2, 3} Instytut Odlewnictwa

^{2, 3} Zakład Informatyki Przemysłowej,
ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków

⁴ Akademia Górniczo-Hutnicza,
Katedra Informatyki
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

STRESZCZENIE

W celu uwiarygodnienia metod symulacji krzepnięcia odlewów istotne jest przeprowadzenie eksperymentów fizycznych oraz uzyskiwania rzeczywistych rozkładów temperaturowych. W pracy przedstawiono metody szacowania błędów pomiarowych korzystając z rachunku operatorowego i modelu komputerowego. Rezultaty zweryfikowano danymi doświadczalnymi.

Keywords: simulation, casting, solidification, temperature, operational calculus

1. WSTĘP

Instytut Odlewnictwa wspólnie z Katedrą Informatyki AGH od wielu lat prowadzi badania związane ze sterowaniem procesu krystalizacji w cienko i grubościennych odlewach [2, 3]. Badania prowadzone są metodami symulacyjnymi i weryfikowane eksperymentalnie. Celem badań jest poszukiwanie sterowania krystalizacją w taki sposób aby uzyskać wymagane przez odbiorcę właściwości użytkowe odlewu [1].

¹ prof. dr hab.inż.

² prof. dr hab. inż., nawar@iod.krakow.pl

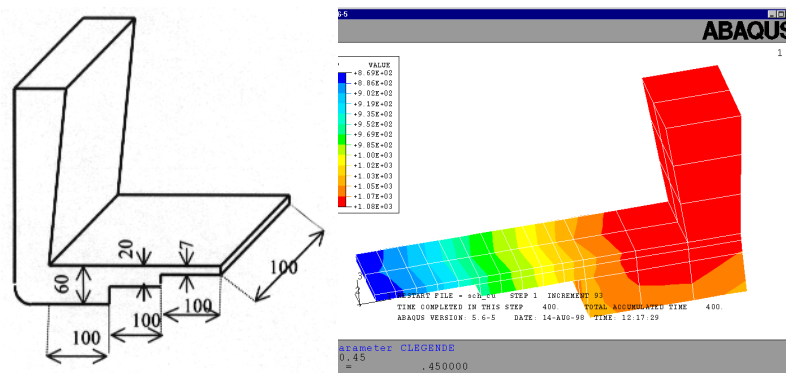
³ dr, hpolcik@iod.krakow.pl

⁴ mgr inż., bieniasz@agh.edu.pl

Konfrontacja prawdziwych wyników z rezultatami symulacji dostarcza cennych informacji dla rozwijania metod symulacyjnych. Pozwala uwierzytelnić metody komputerowe oraz je udoskonalić, w przypadku gdy w wyniku uproszczeń modelu symulacji pominięte są istotne czynniki wpływające na przebieg krzepnięcia i stygnięcia odlewów. W ramach prowadzonych prac aktualizowane są modele matematyczne opisujące badane procesy oraz weryfikowane współczynniki termofizyczne odlewu, formy i rdzenia. Wyniki pomiaru temperatur otrzymane metodami tradycyjnymi są obarczone pewnym błędem, tym większym im większa jest szybkość zmian pól temperaturowych. Dlatego kluczowym zadaniem jest uzyskanie rzeczywistych charakterystyk badanych zjawisk z przeprowadzonego eksperymentu. Badania są prowadzone w dwóch kierunkach, skokowej oraz ciągłej zmiany grubości ścianki. W pracy przedstawiono metodę określenia rzeczywistych charakterystyk na przykładzie skokowych zmian grubości ścianki odlewu.

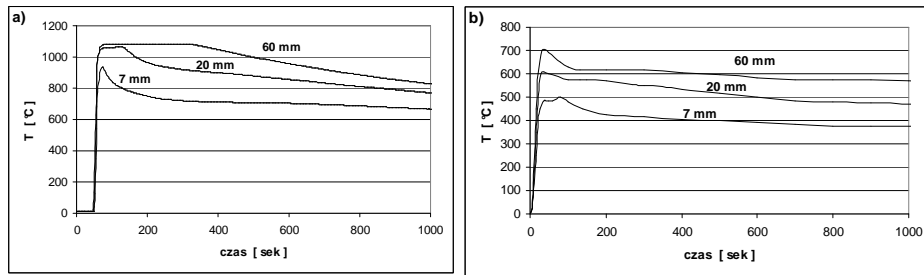
2. BADANIA EKSPERYMENTALNE I SYMULACYJNE

Dla prowadzonych badań przygotowano próbny odlew. Podczas wykonywania wytopów przeprowadzono pomiary rozkładu pola temperatury krzepnięcia i stygnięcia dla odlewów próbnych. W celu zróżnicowania szybkości krzepnięcia i stygnięcia odlewów zastosowano próbkę schodkową o różnej grubości płyt: 60, 20 i 7 mm.



Rys. 2.1 Schemat odlewu o zmiennej, skokowej grubości ścianek oraz przestrzenny rozkład temperatury w symulacji (ABAQUS)

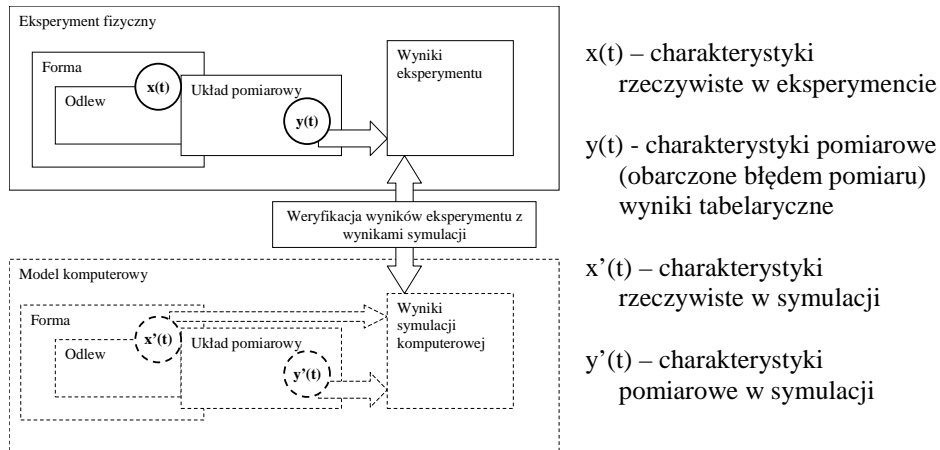
Fig. 2.1. Scheme of casting with various thick of wall and simulated distribution of temperature (ABAQUS)



Rys. 2.2 Wyniki eksperymentalne dla odlewu schodkowego a) stop miedzi, b) stop aluminium
 Fig. 2.2. Experimental results for stepped casting: a) copper alloy, b) aluminum alloy

Na rysunku 2.1 przedstawiono schemat odlewu oraz symulowany przestrzenny rozkład temperatury w całym odlewie próbnym. Temperatura była mierzona dla każdej grubości płytki. Termoelementy zostały usytuowane w środku ciekłego i krzepnącego metalu, na granicy metal – masa formy i w formie na głębokości 1 cm od powierzchni wneki formy (dla płyt 60 i 20 mm) oraz 0,5 mm dla płyty o grubości 7 mm.

Krzywe pomiarowe dla wybranych punktów przedstawione są na rys. 2.2. Szczególną uwagę zwrócono na pomiary w obszarze krzepnięcia odlewu. Na tym etapie prac podstawowym zadaniem jest oszacowanie błęd pomiarowego. Na rysunku 2.3 pokazano model weryfikacji symulacji komputerowej z eksperymentem.



Rys. 2.3 Weryfikacja wyników symulacji komputerowej z eksperymentem
 Fig. 2.3. Verification of computer simulation and experiment results

3. OSZACOWANIE RZECZYWISTYCH PRZEBIEGÓW TEMPERATUR

Zarówno wielkość mierzona przez urządzenie pomiarowe jak i sygnał wyjściowy są w ogólnym przypadku funkcjami czasu $x = x(t)$, $y = y(t)$. Różnice pomiędzy wielkością wejściową x i wyjściową y w danej chwili czasu nazywamy błędem dynamicznym.

Idealny czujnik pomiarowy temperatury jest obiektem inercyjnym I-go rzędu, natomiast rzeczywiste czujniki mogą być traktowane jako elementy n -tego rzędu (na ogół $n \leq 3$). Równania różniczkowe obiektu inercyjnego I-go i II-go rzędu (1, 2) przedstawiono poniżej (T , $T1$, $T2$ – stałe czasowe).

$$T * y'(t) + y(t) = x(t) \quad (1)$$

$$T1 * T2 * y''(t) + (T1 + T2) * y'(t) + y(t) = x(t) \quad (2)$$

Dysponując modelem układu pomiarowego oraz tabelami wartości wielkości wyjściowych możliwe jest uzyskanie informacji na temat przebiegu wielkości wejściowej, czyli rzeczywistej wielkości w eksperymencie. Na prawdziwość uzyskiwanych danych o sygnale wejściowym ma wpływ poprawna identyfikacja układu pomiarowego i jego parametrów, gęstość pomiarów, metoda szacowania wielkości wejściowej. Znalezienie stałej czasowej dla obiektu inercyjnego I-go rzędu można dokonać analizując odpowiedź na skok jednostkowy poprzez odnalezienie czasu dla którego jest osiągnięta wartość równa 0,63 wartości maksymalnej.

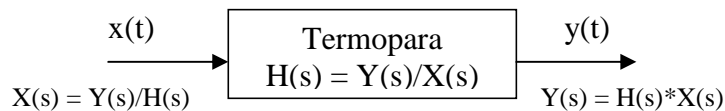
Do oszacowania stałej czasowej posłużono się wynikiem eksperymentu dla najgrubszego schodka (Rys. 3.2), przyjmując jej wartość równą 18 sekund.

3.1 Zastosowanie aproksymacji i rachunku operatorowego

Wykorzystując rachunek operatorowy oraz model termopary w postaci obiektu inercyjnego I-go rzędu o transmitancji operatorowej $H(s) = T*s + 1$ możemy aproksymując funkcję wyjściową $y(t)$ za pomocą sumy funkcji harmonicznym obliczyć odpowiadającą tym założeniom postać funkcji wejściowej $x(t)$.

Na funkcje interpolujące nakładamy odpowiednie warunki, tak aby ich przekształcenia odwrotne dawały wynik zgodny z rzeczywistością:

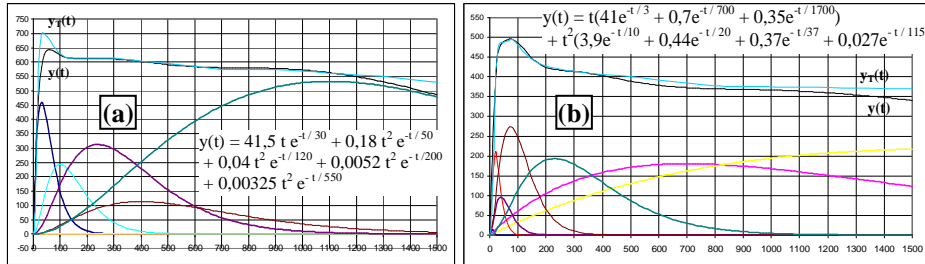
- temperatura początkowa (zalewania odlewu) jest znana,
- temperatury przemiany fazowej danego stopu również są znane.



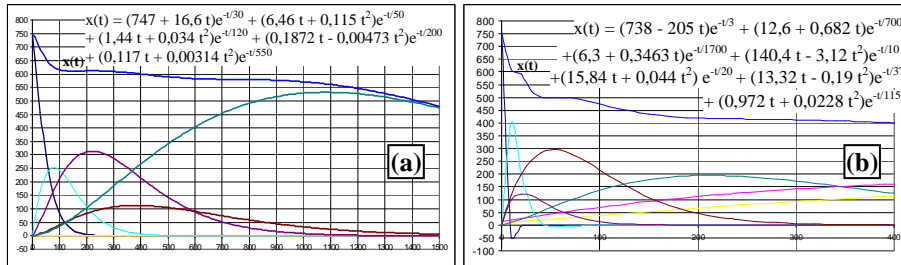
Rys. 3.1 Termopara jako blok o transmitancji operatorowej $H(s)$

Fig. 3.1. Thermocouple as a block with operational transmittance $H(s)$

Transmitancja termopary wiąże sygnał wejściowy z wyjściowym wg zależności pokazanej na rys. 3.1.

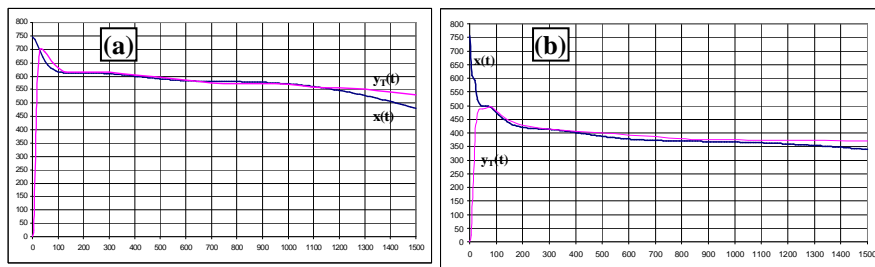


Rys. 3.2 Wykres funkcji $y(t)$ i jej składowych oraz wyniki pomiarowe
 Fig. 3.2. Diagrams of function $y(t)$ and its constituents as well as measurements results



Rys. 3.3 Wykres rzeczywistej charakterystyki temperaturowej $x(t)$
 Fig. 3.3. Diagram of real temperature characteristic $x(t)$

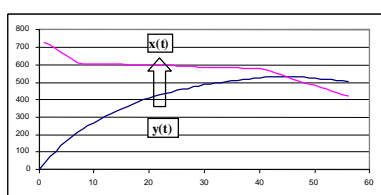
Na rysunku 3.2 przedstawiono krzywe uzyskane z eksperymentu wraz z ich aproksymacjami (a) - dla schodka 60 mm, (b) - 7 mm. Po przekształceniu funkcji $y(t)$ dla (a) otrzymujemy jej postać w dziedzinie zmiennej s : $Y(s) = 41,5/[s + 1/30]^2 + 0,09/[s + 1/50]^3 + 0,02/[s + 1/120]^3 + 0,0026/[s + 1/200]^3 + 0,001775/[s + 1/550]^3$
 Wykorzystując $H(s)$ uzyskujemy:
 $X(s) = 41,5/[s + 1/30]^2 (18s + 1) + 0,09/[s + 1/50]^3 (18s + 1) + 0,02/[s + 1/120]^3 (18s + 1) + 0,0026/[s + 1/200]^3 (18s + 1) + 0,001775/[s + 1/550]^3 (18s + 1)$
 Szukaną funkcję $x(t)$ znajdziemy stosując odwrotne przekształcenie Laplace'a dla $X(s)$. Dla grubości ścianki 60 mm - a) oraz 7 mm - b) krzywe $x(t)$ wraz z funkcjami składowymi pokazano na rys. 3.3 oraz zestawienie krzywych $x(t)$ i $y_T(t)$ na rys. 3.4.



Rys. 3.4 Zestawienie charakterystyki rzeczywistej $x(t)$ z pomiarową $y_T(t)$
 Fig. 3.4. Comparison of real $x(t)$ and measurement $y_T(t)$ characteristics.

3.2 Numeryczna aproksymacja wielkości rzeczywistej bazująca na równaniu różniczkowym elementu inercyjnego

Zamieniając w równaniu (1) pochodną sygnału wyjściowego względem czasu na iloraz różnicowy wsteczny otrzymujemy wzór iteracyjny (3) na obliczanie kolejnych wartości sygnału wejściowego. Ze względu na to iż występuje tu przybliżenie pochodnej ilorazem różnicowym, błąd wprowadzany przez metodę jest odwrotnie proporcjonalny do częstotliwości próbkowania sygnału wyjściowego. Na rysunku 3.5 przedstawiono rezultaty zastosowania opisanej metody dla danych przyjętych danych testowych.



$$T \frac{y(t_n) - y(t_{n-1})}{\Delta t} + y(t_n) = x_n(t) \quad (3)$$

$$y(t_n) = y(t_{n-1}) \frac{T}{T + \Delta t} + x(t_n) \frac{\Delta t}{T + \Delta t} \quad (4)$$

Rys. 3.5 Charakterystyka $x(t)$ otrzymana na podstawie krzywej $y(t)$

Fig. 3.5. Characteristic $x(t)$ obtained basis on $y(t)$ curve

3.3 Uwzględnienie układu pomiarowego w modelu komputerowym

Wprowadzając do modelu komputerowego element symulujący zachowanie układu pomiarowego, uzyskujemy w wyniku symulacji, dodatkowo charakterystyki temperatur, które możemy porównywać z wynikami eksperymentalnymi. Jeżeli uznamy iż krzywa $y'(t)$ niewiele się różni od wyników z eksperymentu $y(t)$ to możemy przyjąć wynik symulacji $x'(t)$ za rzeczywistą charakterystykę temperaturową $x(t)$ w badanym eksperymencie. Model komputerowy termopary jako elementu inercyjnego I-go rzędu można zbudować w oparciu o równanie (4), uzyskane z równania (1) oraz ilorazu różnicowego wstecznego. Pozwala ono wyznaczyć kolejne wartości odpowiedzi termopary przy danych wartościach wielkości mierzonej branych bezpośrednio z symulacji.

4. WNIOSKI

Przedstawione w pracy metody szacowania błędów pomiarowych mogą być stosowane w dwóch przypadkach:

- gdy dysponujemy niezbyt dokładnymi wynikami pomiarowymi, ale znamy w przybliżeniu kształt charakterystyk rzeczywistych (p. 3.1),
- gdy czas próbkowania pomiaru jest mały (p. 3.2).

Wprowadzenie do modelu symulacyjnego elementów odpowiadających czujnikom pomiarowym stwarza dodatkową alternatywę służącą weryfikacji wyników komputerowych z eksperymentalnymi. Metoda przedstawiona w ustępie 3.2 będzie

wykorzystywana w przewidywanych badaniach eksperymentalnych. Badania te zgodnie z uzyskanymi rezultatami stwarzają konieczność zwiększenia częstotliwości pomiarowych.

LITERATURA

- [1] Z. Górny, B. Mochnacki, J. Suchy, *Optimisation de la coulee d'une tuyere de haut fourneau en cuivre par simulation*. Hommes&Fonderie, S.2001 No 316,p.22-27.
- [2] H. Połcik, S. Kluska-Nawarecka, S. Bieniasz, *Simulation and control of solidification processes*, IFAC International Federation of Automatic Control. A Proceedings volume from the 2nd IFAC/IFIP/IEEE Conference, Grenoble, France 5-8 July 2000,PERGAMON
- [3] S. Kluska-Nawarecka, H. Połcik, M. Warmuzek, *Modelling and control of the Al.-Si alloys solidification process*, In: The 4th International Conference Simulation Designing and Control of Foundry Processes. Kraków-Aachen-Sofia, FOCOMP '99, pp. 135-142

CONTRIBUTIONS TO NUMERICAL SIMULATION OF SOLIDIFICATION OF THE INDUSTRIAL CASTINGS

SUMMARY

In simulation of solidification process it is important to have real temperature from experiment. Basing on the operational calculus and numerical model, two methods were described for obtaining proper temperature distribution during casting solidification. Presented methods were examined by experiment.

Recenzował Prof. Stanisław Jura