

Wiktor ŻYMŁA, Remigiusz SOSNOWSKI

Marek KACZMARZYK

Instytut Metalurgii

Politechnika Śląska

MODELOWANIE CYFROWE STRAT CIEPLNYCH METALU W KADZI

Streszczenie. Przedstawiono model matematyczny wymiany ciepła w kadzi hutniczej w układzie metal-żużel-kadź-otoczenie oraz opracowano program dla obliczeń na EMC.

Przeprowadzono symulację cyfrową strat ciepłych metalu dla kilku wybranych wariantów warunków początkowych i brzegowych, między innymi dla określenia wpływu grubości warstwy żużla przykrywającego metal oraz początkowego stanu cieplnego kadzi na rodzaj i wielkość strat.

Wyniki obliczeń wskazują na korzystne kierunki przedsięwzięć, mających na celu zmniejszenie strat ciepłych metalu.

1. WSTĘP

Znajomość zmian temperatury metalu w procesach metalurgicznych, a zwłaszcza w rozwijających się w szybkim tempie pozapiecowych technologiach stalowniczych, ma duże znaczenie praktyczne. Możliwość przewidywania spadku temperatury w czasie transportu metalu i kolejnych operacji technologicznych, takich jak: dodawanie żelazostopów, mieszanie, odgazowanie itp., odgrywa znaczną rolę przy optymalizacji całego procesu stalowniczego.

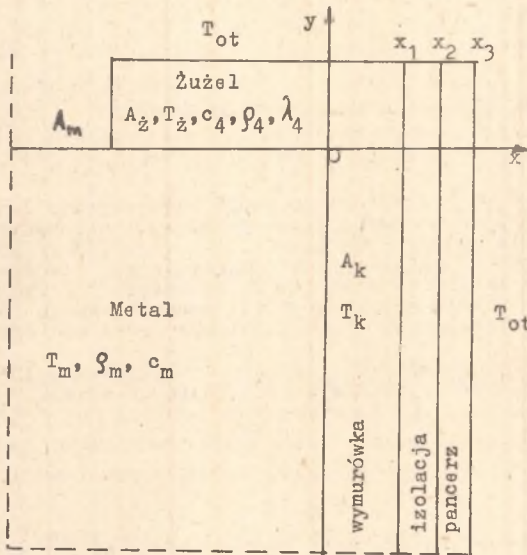
W czasie obróbki metalu w kadzi efektem cieplnym samych operacji, np. rozpuszczania składników stopowych towarzyszy ciągle utrata ciepła metalu na skutek przewodzenia do ścian kadzi i promieniowania do otoczenia. Ten rodzaj strat jest szczególnie ważny, gdyż stanowi on około 70-80% całkowitych strat ciepła metalu.

Wielkość strat ciepłych metalu w kadzi można ograniczyć poprzez zmniejszenie promieniowania powierzchni metalu, stosując kadzie z pokrywami lub przykrywając lustro metalu warstwą żużla. Ilość ciepła wnikającego i akumulowanego w wyłożeniu ogniotrwałym można regulować poprzez nagrzewanie kadzi za pomocą palników gazowych, bądź odpowiednio szybki obieg kadzi.

Celem przedstawionej pracy było sformułowanie modelu matematycznego kadzi, służącego do obliczeń strat ciepłych metalu w kadzi.

2. SFORMUŁOWANIE MODELU

Schemat modelowanego układu przedstawiono na rys. 1. W przedstawionej wersji model wymiany ciepła w układzie metal-kadź-żużel-otoczenie oparty jest na następujących założeniach:



Rys. 1. Schemat modelowanego układu metal-żużel-kadź-otoczenie

- przewodzenie ciepła przez ścianę kadzi zachodzi wzdłuż osi "x" a w warstwie żużla wzdłuż osi "y";
- z uwagi na małą grubość ścian kadzi w stosunku do jej średnicy, układ cylindryczny można zastąpić płaskim układem współrzędnych;
- temperatura wyłożenia ogniotrwałego i żużla na granicy z metalem jest równa temperaturze metalu;
- temperatura metalu w kadzi jest jednakowa w całej objętości, natomiast temperatura otoczenia jest stała;
- współczynniki przewodzenia temperatury dla pancerza stalowego, warstwy izolacyjnej i wymurówki nie zależą od temperatury.

Na podstawie przyjętych założeń zestawiono równania, opisujące szybkość wymiany ciepła w modelowanym układzie. Podstawowym równaniem modelu jest równanie Fouriera, opisujące nieustalone przewodzenie ciepła. Dla ściany kadzi ma ono postać:

$$\frac{\partial T_k}{\partial t} = \frac{\lambda_n}{\rho_n c_n} \frac{\partial^2 T_k}{\partial x^2}$$

$$n = 1 \quad x_2 < x \leq x_3$$

$$n = 2 \quad x_1 < x \leq x_2$$

$$n = 3 \quad 0 < x \leq x_1$$

(1)

a dla warstwy żużla:

$$\frac{\partial T_z}{\partial t} = \frac{\lambda_4}{\rho_4 c_4} \frac{\partial^2 T_z}{\partial y^2}. \quad (2)$$

Jednoznaczne rozwiązanie tych równań wymaga określenia warunków początkowych i brzegowych.

Warunki początkowe

Warunki początkowe określają stan procesu w określonym momencie czasu. W obliczeniach przyjęto, że czas t równa się zero w chwili całkowitego napełnienia kadzi metalem. W chwili tej znana jest temperatura metalu T_m , temperatura żużla $T_z(y)$ i temperatura ścian kadzi $T_k(x)$, a mianowicie:

$$\begin{aligned} T_z &= T_{z0} & 0 < y \leq y_1 \\ T_m &= T_{m0} \\ T_k &= T_{k0} & x_3 > x > 0 \\ T_k &= T_{m0} & x = 0 \\ T_k &= T_{ot} & x = x_3 \\ T_z &= T_{m0} & y = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Warunki brzegowe

Szybkość zmian temperatury na zewnętrznej powierzchni pancierza kadzi opisuje równanie Newtona:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_k}{\partial x} = h_{pp} (T_k - T_{ot}). \quad (4)$$

Szybkość zmian temperatury na zewnętrznej powierzchni żużla, przy założeniu równoczesnej wymiany ciepła przez konwekcję i promieniowanie, wyraża równanie:

$$\lambda_4 \frac{\partial T_z}{\partial y} = h_{pz} (T_z - T_{ot}) + 6 \epsilon (T_z^4 - T_{to}^4). \quad (5)$$

Zgodnie z założeniem, że

$$T_m = T_z = T_k \quad \text{dla} \quad x = y = 0$$

szybkość zmian temperatury metalu można wyrazić wzorem:

$$V_m \rho_m C_m \frac{\partial T}{\partial t} = A_k \lambda_3 \frac{\partial T}{\partial x} + A_2 \lambda_4 \frac{\partial T}{\partial y} + A_m G \varepsilon (T_m^4 - T_{ot}^4). \quad (6)$$

W obliczeniach uwzględniono zmianę oporów cieplnych wewnątrz ściany kadzi, składającej się z trzech warstw materiałów. Przy rozwiązywaniu równania Fouriera dla warstwy żużla, uwzględniono wpływ zjawiska krzepnięcia żużla przez wprowadzenie ekwiwalentnej wartości ciepła właściwego żużla w zakresie jego temperatur likwidusu i solidusu.

Równania modelu (1) i (2) wraz z warunkami brzegowymi rozwiązano numerycznie metodą różnic skończonych (metodę ilorazu różnicowego poprzedniego).

3. WYNIKI MODELOWANIA CYFROWEGO

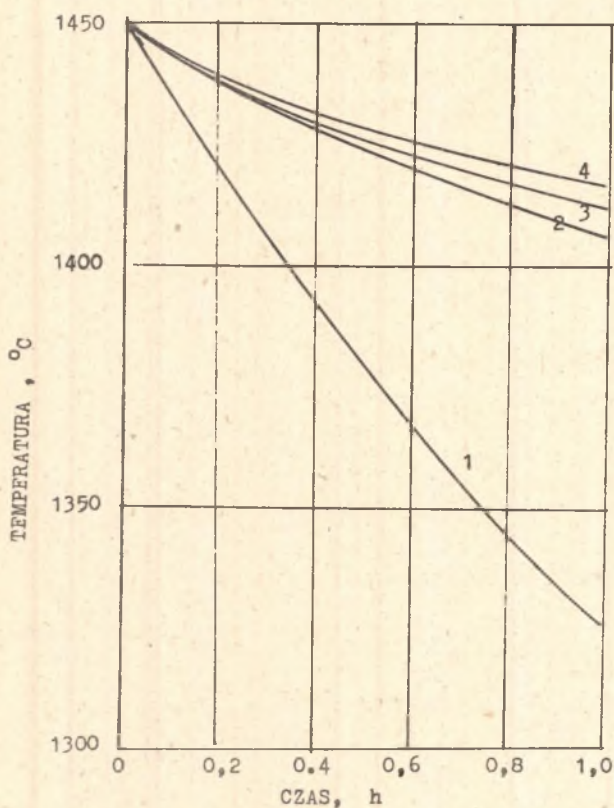
Opracowany model zastosowano do symulacji cyfrowej wpływu wybranych parametrów technologicznych na wielkość strat cieplnych metalu w kadzi. W szczególności analizowano wpływ przykrycia powierzchni metalu żużlem i podgrzewania kadzi na wielkość strat cieplnych i spadek temperatury metalu w kadzi o pojemności 60 t.

Najważniejsze dane przyjęte w obliczeniach zestawiono w tabelicy 1.

Tabela 1

Symbol zmiennej	Wartość	j.m.	Symbol zmiennej	Wartość	j.m.
A_k	17,5	m^2	λ_1	40,0	W/m K
A_2	4,5	m^2	λ_2	0,14	W/m K
A_m	0,0	m^2	λ_3	1,2	W/m K
c_1	0,5	kJ/kg K	λ_4	1,21	W/m K
c_2	0,84	kJ/kg K	ε	0,6	-
c_3	1,2	kJ/kg K	G	5,67	$W/m^2 K^4$
c_{40}	1,0	kJ/kg K	T_{ot}	292	K
c_m	0,7	kJ/kg K	V	8,2	m^3
ρ_1	7800	kg/m^3	ρ_m	6700	kg/m^3
ρ_2	930	kg/m^3	Δx_p	0,024	m
ρ_3	1900	kg/m^3	Δx_s	0,016	m
ρ_4	3800	kg/m^3	Δx_c	0,160	m

Wpływ przykrycia powierzchni metalu żużłem oraz grubości żużla na wielkość spadku temperatury metalu w kadzi przedstawiono na rys 2. Z obliczeń



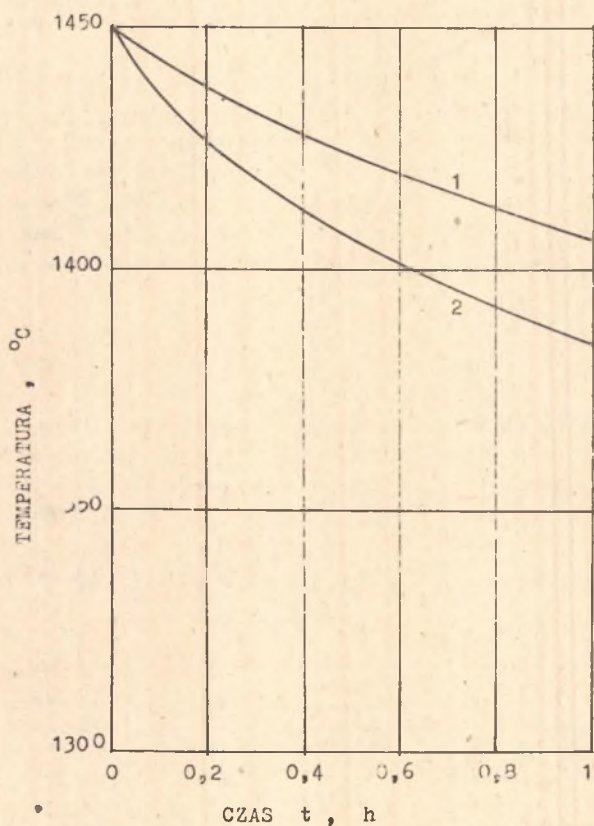
Rys. 2. Wpływ grubości żużla przykrywającego metal na wielkość spadku temperatury metalu w kadzi gorącej przed spustem

1 - metal nie przykryty żużłem, 2 - warstwa żużla o grubości 3 cm; 3 - warstwa żużla o grubości 5 cm, 4 - warstwa żużla o grubości 10 cm

wynika, że przykrycie metalu warstwą żużla o grubości 3 cm zmniejsza spadek temperatury o około 60% w stosunku do metalu nie przykrytego. Dalszy wzrost grubości żużla nie wpływa już znacząco na ograniczenie strat ciepła metalu przez promieniowanie. Średnia szybkość spadku temperatury metalu nie przykrytego żużłem w kadzi o pojemności 60 t podgrzanej przed spustem wynosi 2,1 K/min i zmniejsza się do 0,75 K/min po przykryciu metalu warstwą żużla.

Wielkość strumienia strat ciepłych związanych z przewodzeniem i akumulacją ciepła w ścianach kadzi można ograniczyć przez utrzymywanie odpowiednio wysokiej temperatury ścian kadzi w okresie międzypustowym.

Wpływ nagrzania kadzi przed spustem na szybkość spadku temperatury metalu przedstawiono na rys. 3. W obliczeniach przyjęto, że w kadzi zimnej



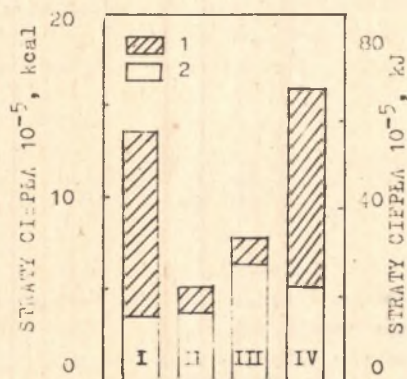
Rys. 3. Wpływ nagrzania kadzi przed spustem na szybkość spadku temperatury metalu przykrytego 3 cm warstwą żużla

1 - kadź gorąca przed spustem; 2 - kadź zimna przed spustem

przed spustem temperatura ściany wynosi 25°C (rys. 5a krzywa 1), natomiast w kadzi gorącej od 100 do 800°C (rys. 5b krzywa 1). Jak widać na rys. 3 spadek temperatury metalu w kadzi zimnej przed spustem jest większy o około 30 K . Średnia szybkość spadku temperatury metalu w czasie pierwszej godziny po napełnieniu wynosi około $2,5\text{ K/min}$ dla metalu nieprzykrytego żużlem i $1,1\text{ K/min}$ dla metalu przykrytego 3 cm warstwą żużla.

Z obliczeń wynika, że wzajemny stosunek strat ciepłych przez promieniowanie i przewodzenie zmienia się w zależności od stanu cieplnego kadzi przed spustem, co przedstawiono na rys. 4.

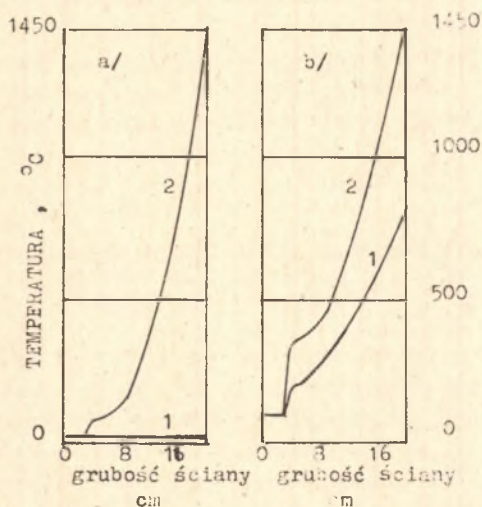
Opracowany model pozwala również śledzić zmiany temperatury metalu w ścianie kadzi. Pozwala to na ocenę wpływu zastosowanych materiałów ogniotrwałych i izolacyjnych oraz parametrów konstrukcyjnych na profil temperatury w ścianie kadzi i wielkość strat ciepłych metalu. Przykładowy rozkład temperatur w ścianie kadzi przedstawiono na rys. 5.



Rys. 4. Całkowite straty ciepła metalu w czasie 1 h

I - kadź gorąca - metal nieprzykryty żużlem; II - kadź gorąca - metal przykryty żużlem; III - kadź zimna - metal przykryty żużlem; IV - kadź zimna - metal nieprzykryty żużlem

1 - ciepło wypromieniowane; 2 - ciepło przewodzone



Rys. 5. Profil temperatury w ścianie kadzi zimnej przed spustem a) i gorącej przed spustem b)

1 - w chwili początkowej; 2 - po czasie 1 h

4. PODSUMOWANIE

Na podstawie przyjętych założeń sformułowano model matematyczny obliczania strat ciepłych metalu w kadzi, który wykorzystano do symulacji cyfrowej spadku temperatury metalu w zależności od stanu cieplnego kadzi przed spustem oraz grubości żużla przykrywającego metal.

Szczegółowe wyniki obliczeń mogą być przydatne przy wyborze przedsięwzięć technologicznych i organizacyjnych, mających na celu zmniejszenie strat ciepłych metalu w kadzi.

Opracowany model stanowi pierwszą i prostą wersję obliczenia strat ciepłych metalu w kadzi. Następna wersja uwzględnia już straty ciepła w czasie odlewania, kiedy powierzchnia metalu w kadzi obniża się, wpływając na wielkość strumienia wypromieniowanego.

ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЕЙ МЕТАЛЛА В ЧАНЕ

Р е з ю м е

В статье рассматривается математическая модель теплообмена в металлургическом ковше в системе металл-шлак-ковшсреда, а также разработано программу вычислений на ЭВМ. Произведено цифровое моделирование потери тепла металла для несколько избранных вариантов начальных и береговых условий, между другими для определения влияния толщины слоя шлака покрывающего металл, а также начального состояния тепла ковша на род и величину потери.

Результаты расчётов показывают на положительные направления мероприятий, целью которых является уменьшение потери тепла металла.

THE NUMERICAL MODELLING OF HEAT LOSSES IN THE LADLE

S u m m a r y

The mathematical model of heat exchange in the metallurgic ladle in the metal-slag-ladle-environment system has been described in the paper, and the calculation program for the EMC was worked out.

The numerical simulation of heat losses of metal for some chosen initial and boundary conditions was performed, and was among other purposes aimed at the determination of the influence of slag layer thickness covering the metal and the initial thermal state of the ladle upon the quality and quantity of losses.

The calculation results indicated the profitable directions of enterprises aiming at diminishing the heat losses of the metal.