

Beata HADAŁA, Zbigniew MALINOWSKI, Agnieszka CEBO-RUDNICKA, Andrzej GOŁDASZ

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej

WPŁYW DOGRZEWANIA I EKRAŃÓW CIEPLNYCH NA ZMIANĘ TEMPERATURY PASMA WALCOWANEGO W LINII LPS

W pracy przedstawiono modele matematyczne opisujące wymianę ciepła w czasie nagrzewania wsadu w komorowym piecu elektrycznym oraz podczas chłodzenia pasma osłoniętego ekranem cieplnym. Rozwiązanie uzyskano w przekroju poprzecznym pasma. Modele matematyczne dostosowano do warunków nagrzewania i walcowania płaskowników w linii LPS. Model nagrzewania wsadu w elektrycznym piecu komorowym opracowano na podstawie promieniowej wymiany ciepła między nagrzewanym materiałem i ścianami pieca. Model wymiany ciepła pasma osłoniętego ekranem cieplnym opracowano dla ekranu zbudowanego z trzech warstw: wewnętrznej osłony metalowej, warstwy izolującej i zewnętrznej osłony metalowej. Modelowano dwa ekrany: jeden z osłoną z blachy stalowej i drugi z osłoną wykonaną z blachy aluminiowej. Model wymiany ciepła pasma osłoniętego ekranem cieplnym może być zastosowany również dla innych linii walcowania ciągłego słabów i blach.

Słowa kluczowe: wymiana ciepła, ekrany cieplne, walcowanie płaskowników

INFLUENCE OF THE RADIATION SHIELDS AND REHEATING ON THE STRIP TEMPERATURE VARIATION IN THE LPS ROLLING LINE

The numerical model describing the heat transfer during charge heating in the electric chamber furnace has been presented. Heat transfer models for hot rolling were supplemented by the boundary conditions for cooling of strand covered by the thermal shield. The solution was obtained in the cross section of the rolled material. The heat transfer models were adjusted to the technical specifications of the LPS rolling line. The heat transfer model for charge heating was developed based on the radiation heat transfer between the charge and the furnace wall surfaces. Heat transfer model for cooling of the rolled strand covered with three layer thermal shield was developed. Two types of shields were studied: with steel sheet shield and with aluminum sheet shield. The heat transfer model for rolled strand covered by the thermal shield is also suitable for other rolling lines.

Key words: heat transfer, radiation shields, rolling of flats

1. WPROWADZENIE

Modelowanie numeryczne wymiany ciepła w przemysłowych warunkach walcowania wyrobów daje dobre rezultaty, które pozwalają na bardziej precyzyjne projektowanie technologii. W przypadku wyrobów walcowanych cechujących się małym udziałem przewodzenia ciepła w kierunku walcowania wystarczające jest stosowanie szybkich modeli dwuwymiarowych [1]. W takich modelach pole temperatury wyznaczone jest w przekroju poprzecznym walcowanego wyrobu. Poprawę dokładności rozwiązania oraz uwzględnienie przewodzenia ciepła w kierunku walcowania można w modelach dwuwymiarowych uzyskać przez zastosowanie bilansu ciepła w algorytmie rozwiązywania równania przewodzenia ciepła [2, 3]. Modele numeryczne wymagają dostarczenia dokładnych warunków brzegowych. W przypadku procesów przemysłowych istotny jest wybór właściwych modeli wymiany ciepła. Trudności te wynikają z uwarunkowań transportu ciepła podczas walcowania oraz ze złożoności różnych sposobów chłodzenia i nagrzewania [4]. Przedstawione w pracy [4] modele numeryczne zostały rozszerzone o nagrzewanie

wsadu w elektrycznych piecach komorowych oraz o warunki brzegowe wymiany ciepła dla pasm osłoniętych ekranem cieplnym.

2. MODEL MATEMATYCZNY WYMIANY CIEPŁA

Pole temperatury pasma w kolejnych etapach nagrzewania, chłodzenia i walcowania wyznaczone z rozwiązania niestacjonarnego równania Fouriera-Kirchhoffa

$$\int_V \left[\lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + q_v - \rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} \right] dV = 0 \quad (1)$$

gdzie:

- λ – przewodność cieplna,
- T – temperatura,
- q_v – intensywność wewnętrznego źródła ciepła,
- ρ – gęstość,
- c – ciepło właściwe.

Niestacjonarne równanie przewodzenia rozwiązywane w przekroju poprzecznym nagrzewanego, chłodzonego

go lub walcowanego materiału przemieszczającego się wraz z pasmem z prędkością v_z . W kolejnych przedziałach czasu Δt ustalano nowe warunki brzegowe zgodnie z aktualnym położeniem przekroju pasma w linii walcowania. W równaniu wymiany ciepła uwzględniono ciepło odkształcenia plastycznego i ciepło przemian fazowych. Szczegółowy opis warunków brzegowych dla chłodzenia pasma w powietrzu i walcowania przedstawiono w pracy [1]. Przedstawione w pracy [1] modele warunków brzegowych rozszerzono o model wymiany ciepła w czasie nagrzewania wsadu płaskiego w elektrycznym piecu komorowym i model chłodzenia pasma osłoniętego ekranem cieplnym. Warunki brzegowe wprowadzono w postaci gęstości strumienia ciepła:

– na powierzchni nagrzewanej w elektrycznym piecu komorowym

$$q_{sp} = \alpha_{sp}(T_s - T_p) \quad (2)$$

– na powierzchni osłoniętej ekranem cieplnym

$$q_{se} = \alpha_{se}(T_s - T_a) \quad (3)$$

gdzie:

T_s – temperatura powierzchni pasma,

T_p – temperatura ścian pieca,

T_a – temperatura powietrza,

α_{sp} – współczynnik wymiany ciepła podczas nagrzewania pasma w elektrycznym piecu komorowym,

α_{se} – współczynnik wymiany ciepła na powierzchni pasma osłoniętej ekranem cieplnym.

Współczynnik wymiany ciepła na powierzchni pasma nagrzewanego w elektrycznym piecu komorowym wyznaczono z warunków promieniowania między powierzchnią niewklęsłą (wsad) i powierzchnią ją otaczającą (ściany pieca). Zastępczy współczynnik przejmowania ciepła α_{sp} obliczano z wzoru [5]

$$\alpha_{sp} = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{1}{\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_s + \frac{S_s}{S_p}(\frac{1}{\varepsilon_p} - 1)}} \frac{T_s^4 - T_p^4}{T_s - T_p} \quad (4)$$

gdzie:

ε_s – emisyjność powierzchni pasma,

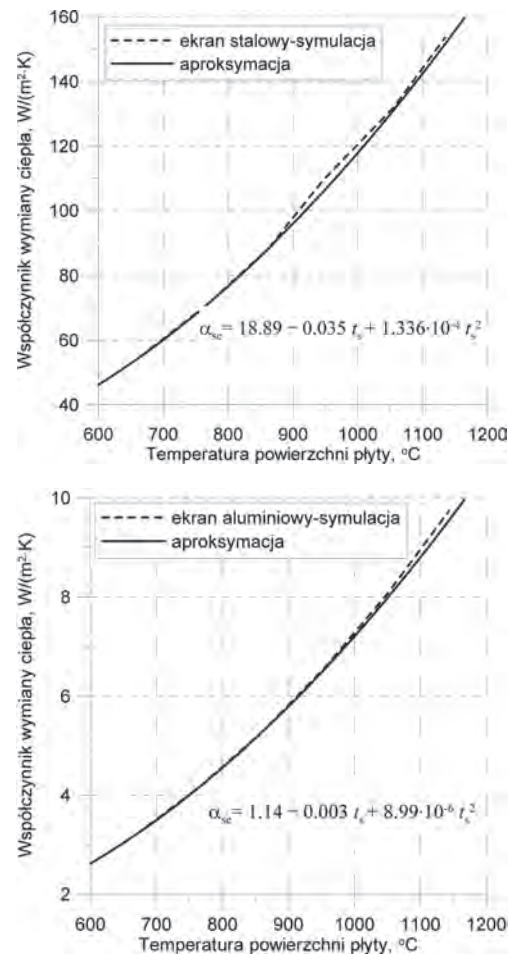
ε_p – emisyjność powierzchni ścian pieca,

S_p – powierzchnia ścian pieca,

S_s – powierzchnia nagrzewanego wsadu.

Dla chłodzenia pasma osłoniętego ekranem cieplnym zbudowano odrębny model wymiany ciepła, dla którego określono zastępczy współczynnik wymiany ciepła α_{se} występujący w równaniu 3. Model wymiany ciepła pasma osłoniętego ekranem cieplnym opracowano dla ekranu zbudowanego z trzech warstw: wewnętrznej osłony metalowej, warstwy saffilu ($\lambda - 0,12$ W/(m·K), $c - 1000$ J/(kg·K), $\rho - 160$ kg/m³) i zewnętrznej osłony metalowej. Modelowano dwa ekrany: jeden z osłoną z blachy stalowej ($\lambda - 50$ W/(m·K), $c - 480$ J/(kg·K), $\rho - 7800$ kg/m³) o emisyjności powierzchni $\varepsilon = 0,9$ i drugi z osłoną wykonaną z blachy aluminiowej ($\lambda - 150$ W/(m·K), $c - 420$ J/(kg·K), $\rho - 2650$ kg/m³, $\varepsilon = 0,05$). W szczelinie powietrznej, pomiędzy pasmem a ekranem założono wymianę ciepła w wyniku przewodzenia i promieniowania natomiast po zewnętrznej stronie ekranu całkowity współczynnik wymiany ciepła wynosił 10 W/(m²·K). Rozwiązanie dla zbudowanego modelu ekranu uzyskano metodą elementów skończonych dla dwuwymiarowego równania przewodzenia ciepła w płycie.

Otrzymane wyniki zmiany współczynnika wymiany ciepła α_{se} w funkcji temperatury pasma w zakresie od 600 do 1200°C dla obu ekranów aproksymowano wielomianem drugiego stopnia opisanym zależnością przedstawioną na rys. 1.



Rys. 1. Przebieg zmian współczynnika wymiany ciepła w funkcji temperatury płyty osłoniętej ekranem stalowym i aluminiowym

Fig. 1. Heat transfer coefficient variation versus temperature of plate covered with steel and aluminum radiation shield

Opracowany model, przy zastosowaniu uzyskanych równań, umożliwia wyznaczenie zastępczego współczynnika wymiany ciepła α_{se} i prowadzenie obliczeń programem Kształt_t2D również dla walcowania pasma osłoniętego ekranem cieplnym.

3. SYMULACJE NUMERYCZNE

Za pomocą uzupełnionego modelu wymiany ciepła wykonano obliczenia temperatury pasma walcowanego w linii B-LPS z uwzględnieniem nagrzewania, dogrzewania i ekranowania pasma. Obliczenia przeprowadzono dla walcowania w 6 przepustach wlewka płaskiego ze stali średniostopowej o wymiarach 60 mm × 150 mm × 790 mm [6]. Przewodność cieplną i ciepło właściwe stali przyjęte do obliczeń przedstawiono na rys. 2. Parametry procesu walcowania wlewka płaskiego zestawiono w tabl. 1. Na podstawie pomiarów i ob-

Tablica 1. Parametry walcowania wlewka płaskiego

Table 1. Rolling parameters for flat ingot

Nr przepustu	Grubość wsadu	Grubość końcowa	Gniot bezwzgl.	Gniot wzglę.	Prędkość walcowania
	[mm]	[mm]	[mm]	[%]	[m/s]
1	60	45,45	14,55	24,25	0,52
2	45,45	34,38	11,07	24,36	0,52
3	34,38	23	11,38	33,10	0,54
4	23	18,07	4,93	21,43	0,54
5	18,07	14,03	4,04	22,57	0,55
6	14,03	11,41	2,93	20,88	0,56

Tablica 2. Zestawienie operacji przyjętych do obliczeń zmian temperatury wlewka płaskiego

Table 2. Summary of the operations employed in the flat ingot temperature field computation

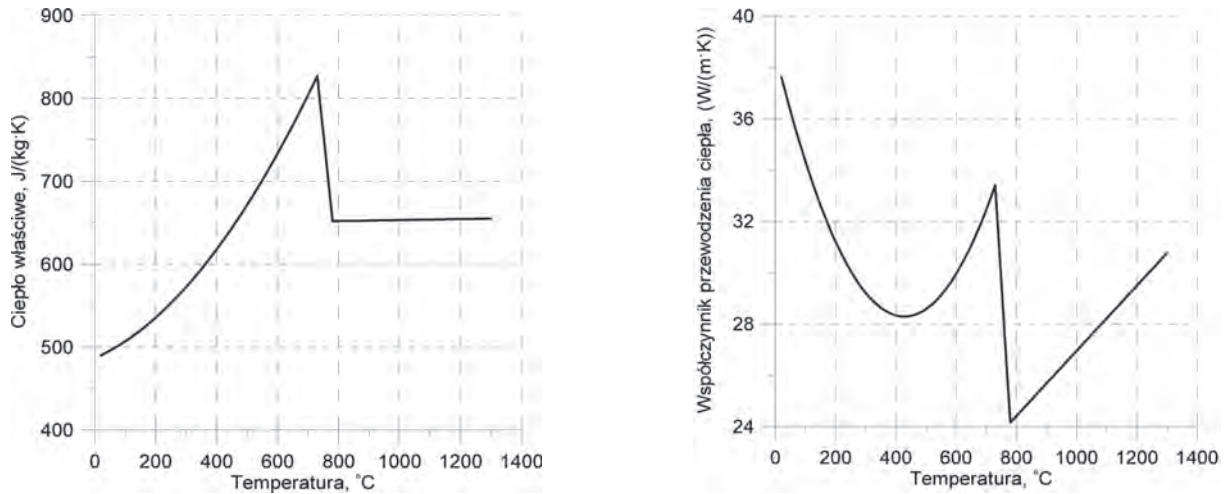
Nr operacji	Rodzaj operacji	Czas operacji [s]	Opis operacji
1	Nagrzewanie	2100,0	Nagrzewanie wsadu w elektrycznym piecu komorowym
2	Chłodzenie w powietrzu	41,8	Transport wsadu z pieca na samotok transportowy
3	Walcowanie	1,0	Walcowanie przepust 1
4	Chłodzenie w powietrzu	1,0	Przerwa między przepustami
5	Chłodzenie w powietrzu	11,3	
6	Walcowanie	1,0	Walcowanie przepust 2
7	Chłodzenie w powietrzu	1,0	Transport do pieca
8	Chłodzenie w powietrzu	7,8	
9	Dogrzewanie	420,0	Dogrzewanie płaskownika w elektrycznym piecu komorowym
10	Chłodzenie w powietrzu	24,0	Transport płaskownika z pieca na samotok
11	Walcowanie	1,0	Walcowanie przepust 3
12	Chłodzenie w powietrzu	1,0	Przerwa między przepustami
13	Chłodzenie w powietrzu	12,6	
14	Walcowanie	1,0	Walcowanie przepust 4
15	Chłodzenie w powietrzu	1,0	Przerwa między przepustami
16	Chłodzenie w powietrzu	14,9	
17	Walcowanie	1,0	Walcowanie przepust 5
18	Chłodzenie w powietrzu	1,0	Przerwa między przepustami
19	Chłodzenie w powietrzu	14,9	
20	Walcowanie	1,0	Walcowanie przepust 6
21	Chłodzenie w powietrzu	1,0	Transport płaskownika do pieca
22	Chłodzenie w powietrzu	7,2	

serwacji rzeczywistego procesu przeprowadzonego na linii B-LPS ustalono harmonogram operacji nagrzewania, chłodzenia i walcowania. Zestawienie przyjętych do obliczeń operacji i czasu ich trwania przedstawiono w tabl. 2. W celu umożliwienia szerszej analizy rzeczywiste operacje procesu walcowania uzupełniono o dogrzewanie i połączono dwa etapy walcowania w jeden proces [7].

Na rys. 3 przedstawiono przebieg zmian temperatury wsadu w czasie nagrzewania w elektrycznym piecu komorowym. Wymagany czas nagrzewania do osiągnięcia temperatury 1200°C wynosi około 35 minut. Współczynnik wymiany ciepła w czasie nagrzewania rośnie od około 200 W/(m²·K) na początku nagrzewania do około 520 W/(m²·K) na końcu procesu nagrzewania. Po nagrzewaniu wsad jest transportowany do samotoku walcarki a następnie walcowany w dwóch przepustach. Łączny czas tego etapu wynosi około 60 s. Wyniki obliczeń zmian temperatury pasma i współczynniki wy-

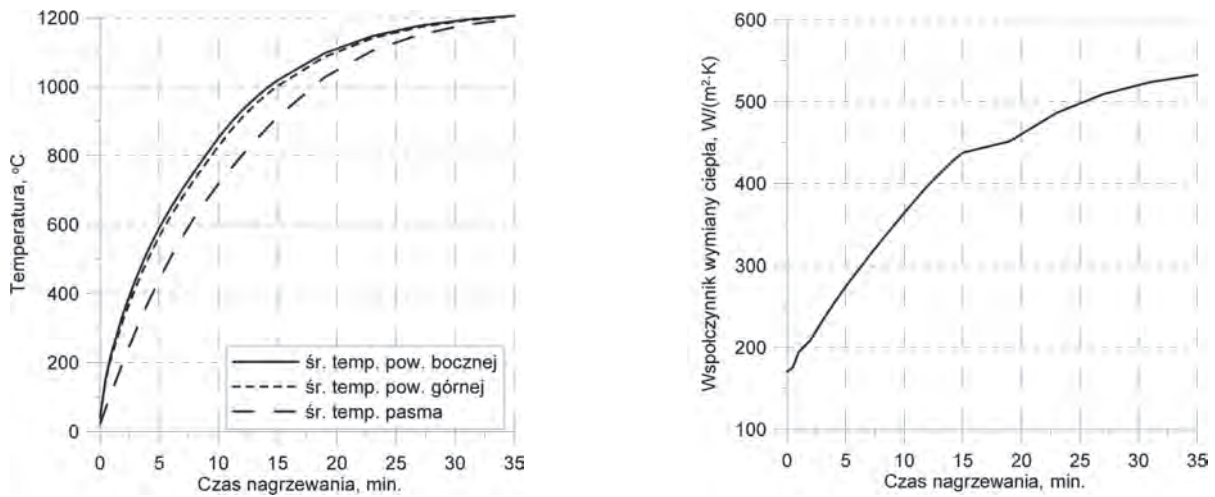
miany ciepła dla tego okresu przedstawiono na rys. 4. W tym czasie temperatura powierzchni górnej pasma bez osłony ekranem cieplnym spadła do około 1045°C. Zastosowanie ekranu z blach stalowych tylko nieznacznie zmniejsza straty ciepła i temperatura powierzchni górnej pasma spada do około 1055°C. Znacznie lepsze rezultaty daje zastosowanie ekranu z blach aluminiowych. W tym przypadku temperatura powierzchni górnej pasma obniża się jedynie do 1175°C. Jest to spowodowane znacznym obniżeniem współczynnika wymiany ciepła z około 180 W/(m²·K) do 10 W/(m²·K).

Na rys. 5 przedstawiono wyniki obliczeń zmian temperatury powierzchni górnej wsadu podczas dogrzewania w elektrycznym piecu komorowym. Dogrzanie pasma nie osłoniętego ekranem i pasma osłoniętego ekranem wymaga 7 minutowego dogrzewania w piecu o temperaturze 1220°C. Pasma osłonięte ekranem aluminiowym nie wymaga dogrzewania. Wyniki obliczeń zmian temperatury pasma w drugim etapie walcowa-



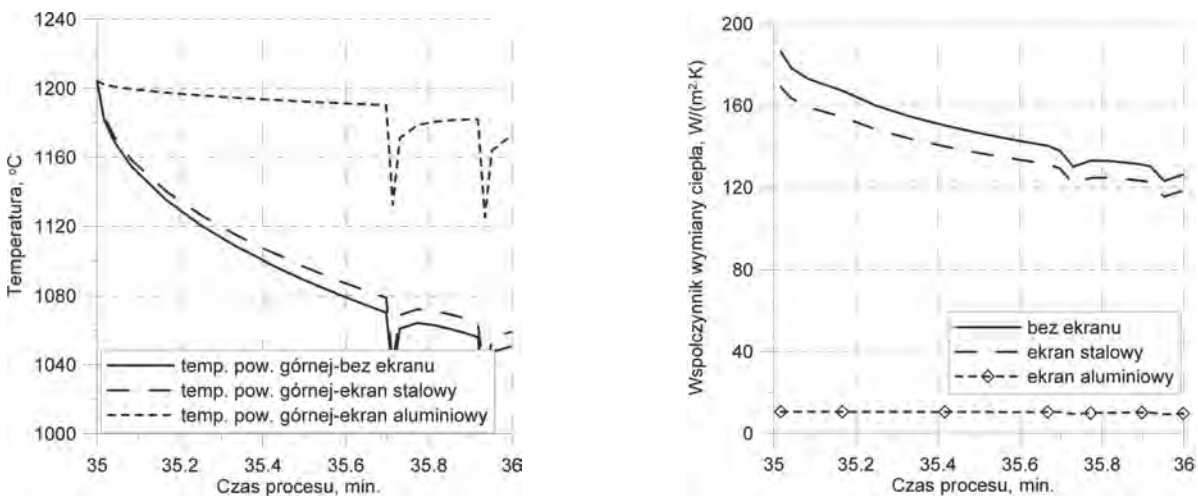
Rys. 2. Ciepło właściwe i przewodność cieplna stali przyjęte do obliczeń pola temperatury

Fig. 2. Specific heat and thermal conductivity of steel employed in the temperature field computation



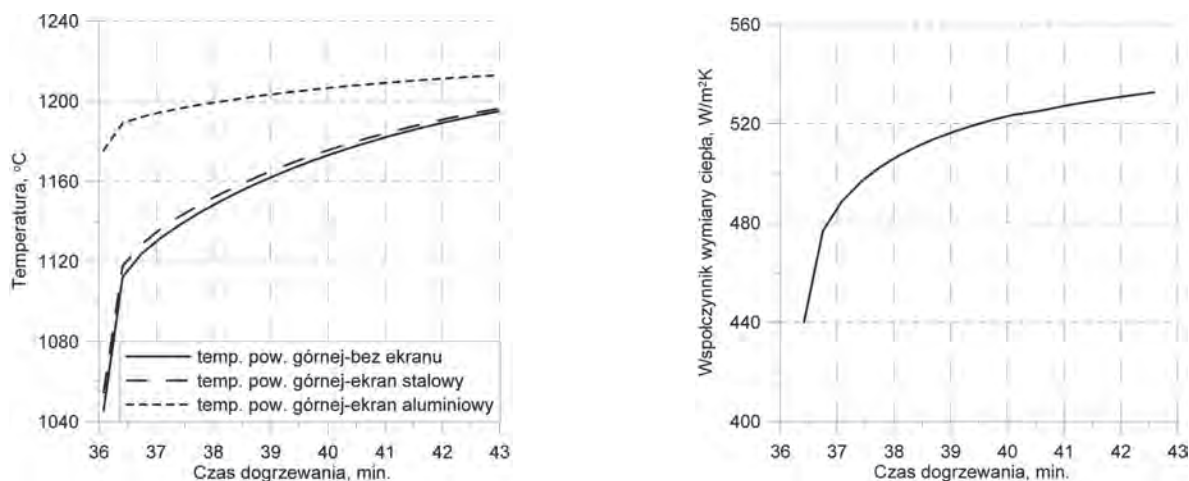
Rys. 3. Przebieg zmian temperatury wsadu i współczynnika wymiany ciepła w czasie nagrzewania w elektrycznym piecu komorowym

Fig. 3. Charge temperature and heat transfer coefficient variations while heating in the electric chamber furnace



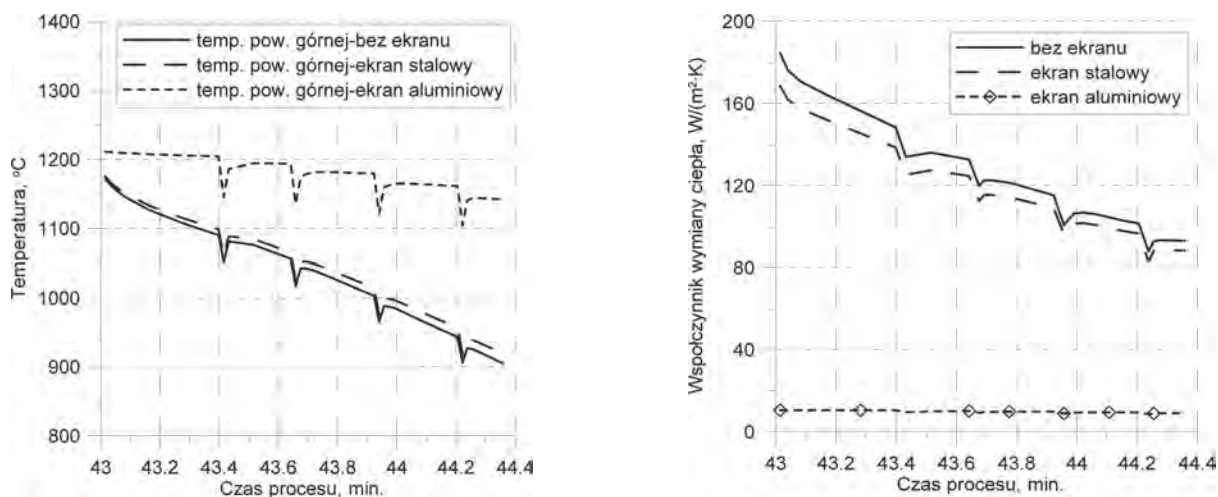
Rys. 4. Przebieg zmian temperatury powierzchni górnej płaskownika oraz współczynnika wymiany ciepła podczas walcowania w dwóch pierwszych przepustach bez osłony i z osłoną ekranem stalowym lub aluminiowym

Fig. 4. Temperature variations for the upper surface of flat bar and heat transfer coefficient variations during the first two rolling passes with and without steel or aluminum radiation shield



Rys. 5. Przebieg zmian temperatury powierzchni górnej wsadu oraz współczynnika wymiany ciepła podczas dogrzewania płaskownika po walcowaniu w dwóch pierwszych przepustach bez osłony i z osłoną ekranem stalowym lub aluminiowym

Fig. 5. Temperature variations for the upper surface of the charge and heat transfer coefficient variations during reheating of flat bar after the first two rolling passes with and without steel or aluminum radiation shield



Rys. 6. Przebieg zmian temperatury powierzchni górnej płaskownika oraz współczynnika wymiany ciepła podczas walcowania w przepustach 3-6 bez osłony i z osłoną ekranem stalowym lub aluminiowym

Fig. 6. Temperature variations for the upper surface of flat bar and heat transfer coefficient variations during the rolling passes from 3 to 6 with and without steel or aluminum radiation shield

nia w 4 przepustach przedstawiono na rys. 6. Temperatura powierzchni górnej pasma nie osłoniętego ekranem spada w czasie około 90 s do 905°C. Zastosowanie ekranu stalowego powoduje obniżenie temperatury do 920°C. Natomiast w przypadku ekranu aluminiowego temperatura powierzchni górnej pasma obniża się jedynie do 1142°C.

4. PODSUMOWANIE

Modele matematyczne wymiany ciepła zbudowane do symulacji zmian temperatury prętów i płaskowników walcowanych w linii LPS w Instytucie Metalurgii Żelaza rozszerzono o model nagrzewania i dogrzewania

wsadu w elektrycznym piecu komorowym. Modele chłodzenia pasma w powietrzu podczas transportu na samotkach uzupełniono o ekrany cieplne. Zastosowanie ekranów cieplnych wykonanych z blach aluminiowych o emisyjności powierzchni 0,05 daje istotne zmniejszenie spadku temperatury pasma. Walcowanie z zastosowaniem tego typu ekranów pozwala na obniżenie temperatury nagrzewania wsadu o około 100°C. Zmniejsza to istotnie koszt nagrzewania i przyczynia się do poprawy jakości powierzchni walcowanych wyrobów.

Praca wykonana w ramach działalności statutowej nr 11.11.110.935 Wydziału Inżynierii Materiałowej i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie.

LITERATURA

1. Malinowski Z., Cebo-Rudnicka A., Gołdasz A., Hadała B., Hojny M.: Modelowanie pola temperatury prętów walcowanych na gorąco. Prace Instytutu Metalurgii Żelaza, 2010, t. 62, nr 1, 73-77.
2. Gołdasz A., Malinowski Z., Hadała B.: Study of heat balance in the rolling process of bars. Archives of Metallurgy and Materials, 2009, nr 3, s. 685-694.
3. Malinowski Z., Hadała B.: Estimation of the finite element solution accuracy to the strand temperature field in the continuous casting process of steel. CMM 2011, 19th international conference on Computer Methods in Mechanics, 9–12 May 2011, Warsaw, Poland p. 339–340.
4. Malinowski Z., Gołdasz A., Hadała B.: Opracowanie podstaw przemysłowych technologii kształtowania struktury i właściwości wyrobów z metali i stopów z wykorzystaniem symulacji fizycznej i numerycznej. Kraków, 2008, Zadanie 2, projekt badawczo-rozwojowy nr N R07 0008 04/2008.
5. Yunus A.Ç.: Heat and mass transfer, McGraw-Hill, New York 2007.
6. Garbarz B., Woźniak D., Palus R., Niżnik B.: Wykonanie wytopów i obróbki cieplnej wysokowęglowej stali bainitycznej w warunkach półprzemysłowych. Gliwice, październik 2011, PS 0001/6.4.1
7. Cebo-Rudnicka A., Malinowski Z., Hadała B., Gołdasz A.: Model numeryczny wymiany ciepła w procesach walcowania wlewków półprzemysłowych w linii LPS i wlewków ciągłych w walcowniach blach i prętów. Prace Instytutu Metalurgii Żelaza, 2012, t. 64, nr 1, 30-34.