

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

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

MODEL NUMERYCZNY WYMIANY CIEPŁA W PROCESACH WALCOWANIA WLEWKÓW PÓŁPRZEMYSŁOWYCH W LINII LPS I WLEWKÓW CIĄGLYCH W WALCOWNIACH BLACH I PRĘTÓW

W pracy przedstawiono model numeryczny, opisujący przewodzenie ciepła w prętach i płaskownikach walcowanych w linii LPS i innych układach ciągłego walcowania. Rozwiązanie uzyskano w przekroju poprzecznym płaskownika lub pręta. W modelu uwzględniono zmianę kształtu przekroju bryły w wyniku odkształcenia plastycznego. Zmianę kształtu wprowadzono przez transformację przekroju poprzecznego pręta lub płaskownika. W modelu wymiany ciepła uwzględniono ciepło odkształcenia plastycznego, ciepło tarcia na powierzchni styku odkształcanego materiału z walcami. Uwzględniono również efekty cieplne przemian fazowych. Model numeryczny i oprogramowanie testowano w warunkach linii LPS.

Słowa kluczowe: wymiana ciepła, walcowanie płaskowników, metoda elementów skończonych

NUMERICAL MODEL OF HEAT TRANSFER IN THE HOT ROLLING PROCESS OF SEMI-INDUSTRIAL INGOTS IN THE LPS LINE AND CONTINUOUSLY CAST SEMI-PRODUCTS ROLLED IN INDUSTRIAL PLATE AND BAR ROLLING MILLS

The numerical model describing heat transfer in bars and slabs rolled in LPS line and the other rolling systems has been presented in the paper. The solution was obtained at the cross section of the rolled material. The change of workpiece shape caused by plastic deformation was considered. The workpiece shape deformation was introduced by transformation of the cross section of the rolled bar or flat. The heat of plastic deformation in the deformation zone and the heat of friction at the material/roll interface have been taken into account. Also the latent heat of phase transformation was considered. Numerical model and developed software have been tested at the LPS line.

Key words: heat transfer, rolling of bars and flats, finite element method

1. WPROWADZENIE

W dzisiejszych czasach dużym zainteresowaniem firm produkujących wyroby stalowe cieszą się techniki komputerowe, które są narzędziem pozwalającym szybko i dokładnie określić właściwości wyrobu finalnego. Popularność tego typu narzędzi wiąże się z tym, iż pozwalają one znacznie obniżyć koszty produkcji, zastępując w wielu przypadkach bardzo czasochłonne i kosztowne próby laboratoryjne bądź przemysłowe. Aby jednak modelowanie numeryczne cechowała wysoka skuteczność, należy przy opisie zjawisk termomechanicznych zachodzących w czasie procesów produkcyjnych stosować dokładne modele matematyczne. W przypadku projektowania procesu walcowania z pomocą technik komputerowych zastosowanie rozbudowanych trójwymiarowych modeli termomechanicznych jest utrudnione ze względu na długi czas obliczeń [1]. Problem ten w wybranych zagadnieniach można rozwiązać stosując modele dwuwymiarowe [1, 2]. Takie rozwiązanie poprawia znacząco szybkość obliczeń zapewniając jednocześnie dużą dokładność wyników.

Podczas projektowania procesu walcowania znaczne trudności może stwarzać modelowanie pola temperatury. Trudności te często wynikają z uwarunkowań transportu ciepła podczas walcowania oraz ze złożoności kształtu geometrycznego przekroju poprzecznego walcowanego pasma [3, 4]. Dotyczy to zwłaszcza wyrobów otrzymywanych w wyniku procesów walcowania na gorąco w walcowniach bruzdowych. Problem ten można rozwiązać stosując metodę elementów skończonych. Przedstawiony w pracy model numeryczny obejmuje opis przewodzenia ciepła w walcowanych prętach i płaskownikach. Model ten pozwala na szybkie określenie zmian temperatury walcowanego pasma z uwzględnieniem następujących mechanizmów: przewodzenie ciepła w przekroju poprzecznym pasma, generowanie ciepła w wyniku pracy odkształcenia plastycznego i pracy tarcia oraz w wyniku przemian fazowych, chłodzenia w powietrzu z uwzględnieniem radiacji i konwekcji. W modelu uwzględniono zmianę kształtu przekroju bryły w wyniku odkształcenia plastycznego. Zmianę kształtu wprowadzono przez transformację przekroju poprzecznego pręta lub płaskownika.

W pracy przedstawiono wyniki obliczeń symulacyjnych procesu walcowania płaskownika wykonanego ze stali średniostopowej NANOS-B [5]. Obliczenia prowadzone były przy użyciu autorskiego programu Kształt_t2D [1, 6]. Następnie, otrzymane wyniki obliczeń temperatury porównano z wynikami pomiaru temperatury dla tej samej stali, zarejestrowanymi w czasie symulacji fizycznej, którą wykonano w skali półprzemysłowej z zastosowaniem modułu B-LPS, w Instytucie Metalurgii Żelaza, w trakcie realizacji pracy [5].

2. MODEL NUMERYCZNY WYMIANY CIEPŁA

Pole temperatury pasma w kolejnych cyklach chłodzenia i walcowania wyznaczano 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.

Rozwiązanie niestacjonarnego równania przewodzenia ciepła dokonano w przekroju poprzecznym walcowanego materiału przemieszczającym się wraz z pasmem z prędkością v_z . W kolejnych przedziałach czasu $\Delta\tau$ ustalano nowe warunki brzegowe zgodne z aktualnym położeniem przekroju pasma w linii walcowania [1]. W modelu matematycznym wymiany ciepła uwzględniono ciepło odkształcenia plastycznego i ciepło przemian fazowych w postaci wewnętrznego źródła ciepła. Warunki brzegowe, które powinno spełniać rozwiązanie równania (1) opisano w pracy [1]. Warunki te były wprowadzone w postaci gęstości strumieni ciepła na powierzchni chłodzonej w powietrzu lub na powierzchni styku z walcem. Współczynniki wymiany ciepła na chłodzonej w powietrzu powierzchni pasma wyznaczono z uwzględnieniem promieniowania i konwekcji [1].

W celu określenia zmian pola temperatury opisanego równaniem (1) zastosowano metodę elementów skończonych. Metoda ważonych residualnych zastosowana do równania przewodzenia ciepła pozwala na wyznaczenie temperatury walcowanego materiału z układu równań

$$K_{ij}(\tau)T_j(\tau) + C_{ij}(\tau)\dot{T}(\tau) = G_i(\tau) \quad (2)$$

Zakładając liniową zmianę temperatury w czasie $\Delta\tau$ oraz stosując schemat Galerkinia otrzymano układ algebraicznych równań liniowych (3), umożliwiając wyznaczenie temperatury po czasie $\Delta\tau$.

$$A_{ij}(\tau)T_j(\tau + \Delta\tau) = B_i(\tau) \quad (3)$$

gdzie:

$$A_{ij}(\tau) = \frac{1}{3}K_{ij}(\tau) + \frac{1}{2\Delta\tau}C_{ij}(\tau) \quad (4)$$

$$B_i(\tau) = \left[-\frac{1}{6}K_{ij} + \frac{1}{2\Delta\tau}C_{ij}(\tau) \right] T_i(\tau) - G_i(\tau) \left[\frac{1}{2} + \frac{\Delta\tau}{3\Delta\tau_o} \right] + \frac{\Delta\tau}{3\Delta\tau_o} G_i(\tau - \Delta\tau) \quad (5)$$

Wektor G_i oraz macierze C_{ij} , K_{ij} dla jednego elementu określone zostały wyrażeniami:

$$G_i = \sum_{k=1}^2 L_k N_i \alpha^k T_a^k D_f^k + \sum_{k=1}^4 N_i \dot{q}_v^k D_k \quad (6)$$

$$C_{ij} = \sum_{k=1}^4 N_i N_j \rho^k c_p^k D^k \quad (7)$$

$$K_{ij} = \sum_{k=1}^4 \lambda^k \left(\frac{\partial N_i}{\partial x_1} \frac{\partial N_j}{\partial x_1} + \frac{\partial N_i}{\partial x_2} \frac{\partial N_j}{\partial x_2} \right) D^k + \sum_{k=1}^2 \alpha^k L^k N_i N_j D^k \quad (8)$$

Pochodne funkcji kształtu względem współrzędnych globalnych określono z zależności

$$\frac{\partial N_k}{\partial x_i} = J_{ki}^{-1} \frac{\partial N_k}{\partial \xi_i} \quad (9)$$

Wyznacznik jacobianu przekształcenia współrzędnych globalnych do współrzędnych naturalnych elementu ma postać

$$D = \det \frac{\partial x_i}{\partial \xi_1} = \det \sum_{k=1}^4 \frac{\partial N_k}{\partial \xi_j} x_i^k \quad (10)$$

W przypadku całek po brzegu elementu jacobian przekształcenia przyjmował postać

$$D_f = \frac{\partial l}{\partial \xi_1} = \sum_{k=1}^2 \frac{\partial N_k}{\partial \xi_1} l^k \quad (11)$$

W opracowanym modelu numerycznym zastosowano liniowe funkcje kształtu

$$N_k = \frac{1}{4}(1 + \xi_1 \xi_1^k)(1 + \xi_2 \xi_2^k) \quad (12)$$

Opracowany schemat numeryczny umożliwia stosowanie zmiennego kroku całkowania $\Delta\tau$ dla zmiennych warunków brzegowych. Dodatkowo w zastosowanym modelu numerycznym istnieje możliwość wprowadzenia ciepła odkształcenia plastycznego oraz ciepła przemian fazowych w postaci wewnętrznego źródła ciepła w rzeczywistym czasie odkształcenia plastycznego.

3. OBLICZENIA SYMULACYJNE

Za pomocą opracowanego modelu numerycznego i programu komputerowego wykonano obliczenia temperatury pasma walcowanego w linii B-LPS. Analiza dotyczyła dwuetapowego procesu walcowania wlewką płaskiego ze stali średniostopowej, o wymiarach 60 mm × 150 mm × 790 mm. Parametry procesu walcowania wlewką płaskiego przedstawiono w tablicach 1–4. Parametry te stanowiły dane wejściowe do symulacji numerycznej i były takie same jak parametry rzeczywistego procesu przeprowadzonego na linii B-LPS. W celu przeprowadzenia obliczeń w programie Kształt_t2D konieczne było podzielenie całego czasu procesu walcowania pasma na szereg przedziałów walcowania i chłodzenia w powietrzu. W pierwszym etapie walcowania dokonano podziału na 2 przepusty walcowania i 20 przedziałów chłodzenia. Czas poszczególnych przedziałów przedstawiono w tablicy 2. Obliczenia numeryczne dla drugiego etapu walcowania wlewką płaskiego obejmowały 3 przepusty walcowania i 28 przedziałów chłodzenia w powietrzu (tablica 4). Aby uzyskać bardziej czytelny wynik obliczeń zmian temperatury walcowanego pasma, w programie Kształt_t2D okresy chłodzenia w powietrzu dłuższe niż 10 s, zostały dodatkowo podzielone na krótsze, około 3-sekundowe odcinki czasu. Dodatkowo po każdej operacji walcowania

dodano jednosekundowy cykl chłodzenia w powietrzu. Otrzymany w wyniku takiego podziału czasu przebieg zmian temperatury walcowanego pasma odpowiadał warunkom rzeczywistym.

Zarówno w pierwszym, jak i w drugim etapie procesu walcowania, temperatura początkowa wsadu opuszczającego piec grzewczy wynosiła 1200°C, a czas transportu wsadu z pieca do klatki walcowniczej wynosił około 40 s. Symulacja numeryczna procesu walcowania wymagała przyjęcia do obliczeń temperatury powierzchni walców. Dla obu rozpatrywanych przypadków walcowania założono, że temperatura ta wynosiła 22°C. Czas styku pasma z walcem był wyliczany automatycznie. Na podstawie znajomości tego czasu program dodawał dodatkowy proces chłodzenia pasma w wyniku styku z walcami. Jako ostatnią operację przyjęto proces chłodzenia pasma w powietrzu, podczas transportu płaskownika do pieca-termosu.

Rysunek 1 przedstawia obliczoną numerycznie zmianę temperatury pasma podczas pierwszego etapu walcowania płaskownika. Widoczne na rysunku trzy krzywe opisują przebieg zmian średniej temperatury powierzchni górnej pasma, średniej temperatury powierzchni bocznej pasma i średniej temperatury pasma. Obserwowany na rysunku 1 gwałtowny spadek temperatury górnej i bocznej powierzchni pasma był spowodowany kontaktem obrabianego materiału z walcami.

Na rysunku 2 przedstawiono przebieg zmian temperatury w czasie drugiego etapu walcowania rozważanego pasma. Podobnie jak w poprzednim przypadku, na krzywych opisujących zmianę temperatury powierzch-

Tablica 1. Parametry walcowania wlewka płaskiego ze stali średniostopowej (I etap)

Table 1. Hot rolling parameters of medium-alloy steel flat ingot (stage I)

Nr przepustu	Grubość wsadu [mm]	Grubość końcowa [mm]	Gniot bezwzgl. [mm]	Gniot względ. [%]	Szerokość pasma [mm]	Prędkość walcowania m/s
1.	60	45,45	14,55	24,25	150	0,52
2.	45,45	34,38	11,07	24,36	150	0,52

Tablica 2. Zestawienie operacji wprowadzonych do programu „Kształt_t2d” w czasie walcowania wlewka płaskiego (I etap)

Table 2. Summary of the operations employed in the Kształt_t2d software for modeling of the first stage of the flat ingot hot rolling process

Nr cyklu	Rodzaj operacji	Czas operacji [s]	Dane dotyczące walcowania
1.	Chłodzenie w powietrzu	41,8	Transport wsadu z pieca na samotok transportowy
2.	Walcowanie (przepust nr 1)	1,0	Walcowanie
3.	Chłodzenie w powietrzu	1,0	Przerwa między przepustami
4.	Chłodzenie w powietrzu	11,3	
5.	Walcowanie (przepust nr 2)	1,0	Walcowanie
6.	Chłodzenie w powietrzu	1,0	Transport do pieca-termosu
7.	Chłodzenie w powietrzu	7,8	

Tablica 3. Parametry walcowania pasma (II etap)

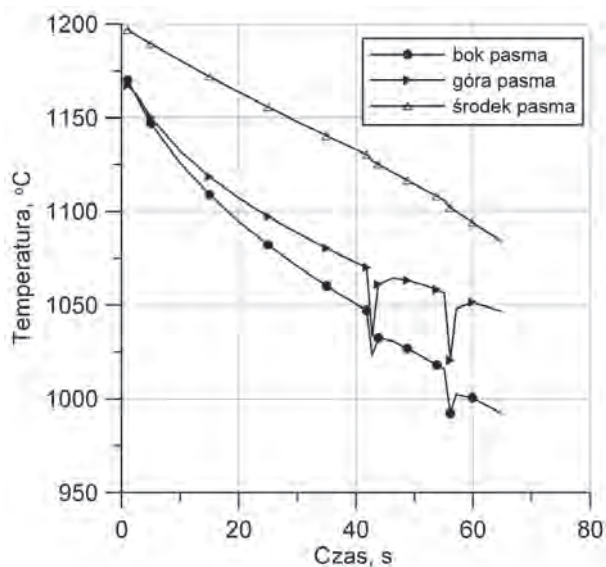
Table 3. Hot rolling parameters of slab (stage II)

Nr przepustu	Grubość wsadu [mm]	Grubość końcowa [mm]	Gniot bezwzgl. [mm]	Gniot względ. [%]	Szerokość pasma [mm]	Prędkość walcowania m/s
1.	23	18,07	4,93	21,43	225	0,54
2.	18,07	14,03	4,04	22,57	225	0,55
3.	14,03	11,41	2,93	20,88	225	0,56

Tablica 4. Zestawienie operacji wprowadzonych do programu „Kształt_t2d” w czasie walcowania pasma (II etap)

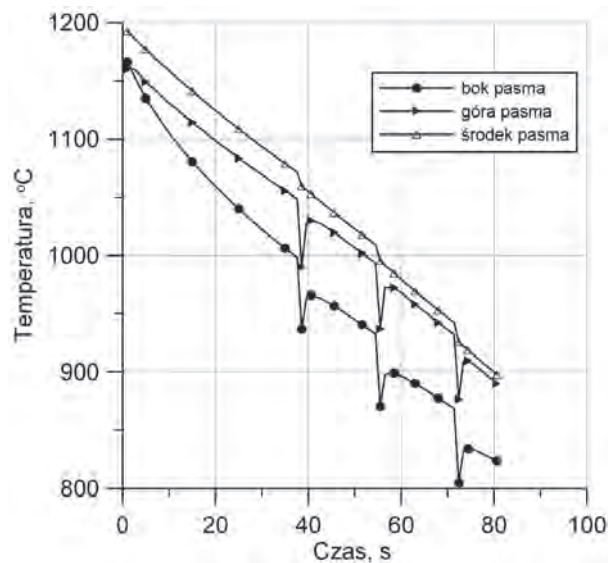
Table 4. Summary of the operations employed in the Kształt_t2d software for modeling of the second stage of the strand hot rolling process

Nr cyklu	Rodzaj operacji	Czas operacji [s]	Dane dotyczące walcowania
1.	Chłodzenie w powietrzu	37,6	Transport wsadu z pieca na samotok transportowy
2.	Walcowanie (przepust nr 1)	1,0	Walcowanie
3.	Chłodzenie w powietrzu	1,0	Przerwa między przepustami
4.	Chłodzenie w powietrzu	14,9	
5.	Walcowanie (przepust nr 2)	1,0	Walcowanie
6.	Chłodzenie w powietrzu	1,0	Przerwa między przepustami
7.	Chłodzenie w powietrzu	14,9	
8.	Walcowanie (przepust nr 3)	1,0	Walcowanie
9.	Chłodzenie w powietrzu	1,0	Transport do pieca-termosu
10.	Chłodzenie w powietrzu	7,2	



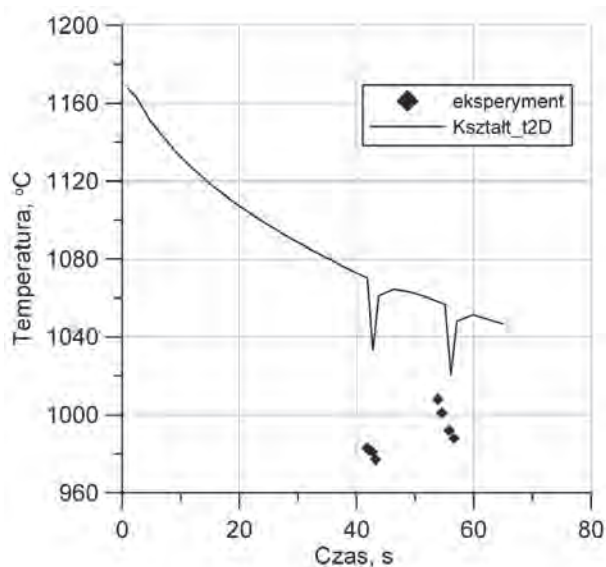
Rys. 1. Przebieg zmian temperatury pasma w funkcji czasu dla I etapu walcowania płaskownika

Fig. 1. Workpiece temperature variation versus time for the stage I of hot rolling process of the flat



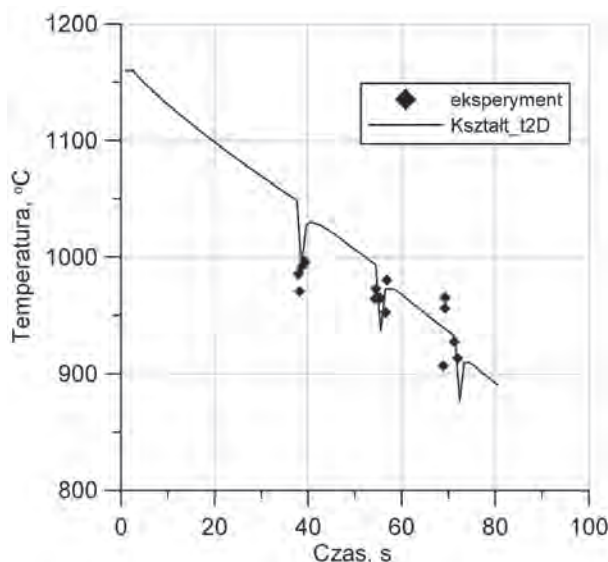
Rys. 2. Przebieg zmian temperatury pasma w funkcji czasu dla II etapu walcowania płaskownika

Fig. 2. Workpiece temperature variation versus time for the stage II of hot rolling process of the flat



Rys. 3. Porównanie obliczeń symulacyjnych z pomiarami temperatury powierzchni pasma, po pierwszym etapie walcowania płaskownika

Fig. 3. Comparison of the results of numerical simulation with surface temperature measurements after the first stage of hot rolling process of the flat



Rys. 4. Porównanie obliczeń symulacyjnych z pomiarami temperatury powierzchni pasma, po drugim etapie walcowania płaskownika

Fig. 4. Comparison of the results of numerical simulation with surface temperature measurements after the second stage of hot rolling process of the flat

ni bocznej i górnej pasma, można zauważyć gwałtowne spadki temperatury spowodowane kontaktem walcowanego pasma z wałami.

Na rysunkach 3 i 4 wyniki obliczeń temperatury górnej powierzchni pasma otrzymane za pomocą programu Kształt_t2D zestawiono z wynikami pomiaru temperatury zarejestrowanymi w czasie procesów walcowania na linii B-LPS, odpowiednio dla pierwszego i drugiego etapu walcowania. Porównanie wyników pomiaru temperatury z wynikami obliczeń temperatury dla pierwszego etapu walcowania wykazało różnicę pomiędzy wartościami zmierzonymi a obliczonymi, która wynosiła około 10–50°C (rys. 3). Różnica była większa dla pierwszego przepustu, gdzie zmierzona temperatu-

ra była niższa od temperatury w drugim przepuszczeniu. Jest to bardzo mało prawdopodobne i zostało najprawdopodobniej spowodowane błędem pomiaru wynikającym z zakłócenia emisyjności.

Wyniki obliczeń temperatury górnej powierzchni pasma otrzymane dla drugiego etapu walcowania, wykazują dużą zgodność z wynikami pomiaru temperatury uzyskanymi w czasie rzeczywistego procesu walcowania (rys. 4).

Przedstawione na rysunkach 3 i 4 porównanie wyników obliczeń temperatury z wynikami pomiarów wykazało, że przyjęty do obliczeń czas trwania poszczególnych procesów chłodzenia w powietrzu i walcowania został dobrany poprawnie. W wyniku tego, obliczone

numerycznie wartości spadku temperatury spowodowane kontaktem pasma z walcami pokrywają się z wartościami temperatury zmierzonymi za pomocą pirometru tuż za klatką walcowniczą.

4. PODSUMOWANIE

Przeprowadzona analiza porównawcza pozwala stwierdzić, że przebiegi zmian temperatury podczas procesu walcowania płaskownika ze stali średnio-stopowej uzyskane za pomocą programu Kształt_t2D są zgodne z wynikami pomiarów.

Opracowany model matematyczny i algorytmy numeryczne pozwalają na szybkie obliczenia zmian temperatury pasma w zależności od bieżących warunków, w jakich znajduje się pasmo. Całkowity czas obliczeń w przypadku obu testów nie przekroczył 10 sekund.

Dane wyjściowe z modelu, pozwalają na dokładne wyznaczenie temperatury powierzchni pasma i średniej temperatury pasma, a także określenie rozkładu temperatury w przekroju pasma w dowolnym momencie procesu walcowania lub chłodzenia.

Publikacja została opracowana na podstawie pracy wykonanej w projekcie badawczym rozwojowym nr N R07 0008 04 pt. „Opracowanie podstaw przemysłowych technologii kształtowania struktury i właściwości wyrobów z metali i stopów z wykorzystaniem symulacji fizycznej i numerycznej” finansowanym przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, realizowanym przez Instytut Metalurgii Żelaza im. Stanisława Staszica w Gliwicach (koordynator), Akademię Górniczo-Hutniczą, Politechnikę Częstochowską, Politechnikę Śląską i Politechnikę Warszawską.

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. Malinowski Z., Gołdasz A., Hadała B., Banach M., Zygmunt T.: Modelowanie numeryczne pól temperatury kształtowników walcowanych na gorąco. Hutnik Wiadomości Hutnicze, 2008, nr 4, 176-181.
3. Głowacki M., Pietrzyk M., Okoń R., Kusiak J.: Zastosowanie metody elementów skończonych do wyznaczenia pola temperatur na przekroju poprzecznym kształtowników walcowanych na gorąco. Hutnik Wiadomości Hutnicze, 1990, nr 1, 6-10.
4. Głowacki M.: Termomechaniczno-mikrostrukturalny model walcowania w wykrojach kształtowych, AGH Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków 1998.
5. 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
6. 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, Projekt badawczo-rozwojowy nr N R07 0008 04/2008.
7. Yunus A.Ç.: Heat and mass transfer, McGraw-Hill, New York 2007.
8. 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.