

MODELOWANIE POLA TEMPERATURY PRĘTÓW WALCOWANYCH NA GORĄCO

W projektowaniu procesów walcowania na gorąco prętów i kształtowników istotne znaczenie ma prawidłowe określenie zmian temperatury materiału w całym cyklu produkcyjnym. Zmiany temperatury powinny być wyznaczone od wydania wsadu z pieca do końcowego studzenia materiału na chłodni. Takie obliczenia mogą być wykonane za pomocą pakietów metody elementów skończonych przeznaczonych do analizy przeróbki plastycznej. Czas obliczeń jest jednak długi ze względu na konieczność wykonywania symulacji kolejnych etapów plastycznego odkształcenia. Powstają również problemy z przenoszeniem wyników obliczeń do kolejnych etapów symulacji. W praktyce, nie wykonuje się symulacji zmian temperatury w całej linii walcowania, głównie ze względu na złożone warunki wymiany ciepła w przerwach między kolejnymi przepustami. Opracowano model matematyczny, numeryczny i oprogramowanie specjalistyczne przeznaczone do określania zmian temperatury walcowanego materiału, bez konieczności symulacji metodą elementów skończonych odkształcenia plastycznego. W rezultacie obliczenia temperatury walcowanego materiału od nagrzewania do chłodzenia na chłodni nie przekraczają jednej minuty. Daje to możliwość wielokrotnego powtarzania obliczeń w celu dobrania odpowiednich prędkości walcowania oraz sposobów chłodzenia.

Słowa kluczowe: walcowanie prętów, temperatura pasma, metoda elementów skończonych

TEMPERATURE FIELD MODELLING OF BARS UNDER HOT ROLLING CONDITIONS

Proper prediction of material temperature changes during the entire production process plays an important role in designing of the rolling process of bars and sections. Temperature changes should be followed starting from the charge heating following the rolling mills and ending on product cooling at cooling bed. This type of calculations can be performed using the finite element software designed for modeling of rolling processes. In such a case the computation time is high due to simulation of subsequent rolling passes. In addition to long computation time it is difficult to transfer data from one to the other simulation. It results in lack of complete simulations for the whole rolling line. Mathematical model and software designed for computation of the strip temperature has been developed. Strip temperature in the rolling line can be computed without simulation of the material plastic strain at rolling mills. In such case, computation of temperature of the rolled material (from heating to cooling) does not exceed one minute. This facilitates repetition of the computations to select proper rolling rate and manner of cooling.

Keywords: rolling of bars, strand temperature, finite element method

1. WPROWADZENIE

Projektowanie nowej technologii wytwarzania wyrobów walcowanych jest czasochłonne i kosztochłonne zwłaszcza ze względu na duży udział prób laboratoryjnych i przemysłowych. Konkurencyjność na rynku produktów stalowych powoduje, że firmy zainteresowane są obniżaniem kosztów produkcji. Równocześnie rosną wymagania dotyczące jakości wyrobów walcowanych. Zastosowanie do analizy procesu walcowania technik komputerowych pozwala na systematyczne poprawianie technologii. Aby jednak modelowanie numeryczne cechowała wysoka skuteczność, należy przy opisie zjawisk termomechanicznych stosować dokładne modele matematyczne. Obliczenia modelowe z zastosowaniem rozbudowanych trójwymiarowych modeli termomechanicznych trwają stosunkowo długo. Rozwiązanie, które poprawia znacząco szybkość obliczeń, bez istotnej utraty dokładności, polega na zastosowaniu modeli dwuwymiarowych w wybranych zagadnieniach [1]. W zależności od kształtu, wyroby walcowane można podzielić na:

wyroby walcowni bruzdowych, blachy, rury i wyroby specjalne. Do jednego z trudniejszych do modelowania zalicza się proces walcowania na gorąco w walcowniach bruzdowych. Modelowanie pola temperatury stwarza znaczne trudności wynikające ze złożoności zmian kształtu przekroju poprzecznego walcowanego pasma, a także z uwarunkowań transportu ciepła podczas walcowania [1, 3, 4]. Rozwiązanie tego problemu można uzyskać wykorzystując metodę elementów skończonych. Przedstawione w pracy rozwiązanie 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, chłodzenia w powietrzu z uwzględnieniem konwekcji wymuszonej, chłodzenia wodą i natryskiem wodnym, chłodzenia w skrzyniach wodnych. W celu efektywnego prowadzenia obliczeń opracowano program komputerowy z interfejsem graficznym do szybkiego i dokładnego wyznaczenia rozkładu temperatury pasma w całym ciągu. Wyniki obliczeń

numerycznych wyprowadzane są w formie graficznej oraz zbiorów tekstowych.

2. MODEL 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:

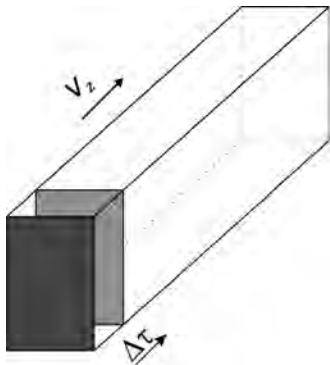
- λ – przewodność cieplna,
- T – temperatura,
- q_V – intensywność wewnętrznego źródła ciepła,
- ρ – gęstość,
- c – ciepło właściwe.

Rozwiązania niestacjonarnego równania przewodzenia ciepła dokonano w przekroju poprzecznym pasma (rys. 1) przemieszczającym się z prędkością walcowania v_z . W kolejnych przedziałach czasu $\Delta\tau$ ustalano nowe warunki brzegowe zgodne z aktualnym położeniem przekroju pasma w linii walcowania. W równaniu wymiany ciepła uwzględniono ciepło odkształcenia plastycznego i ciepło przemian fazowych w postaci wewnętrznego źródła ciepła:

$$q_V = Q_{\gamma\alpha} \frac{\Delta V_f}{\Delta\tau} + \sigma_p \dot{\epsilon}_i \left(1 - \frac{20H'}{E} \right) \quad (2)$$

gdzie:

- $Q_{\gamma\alpha}$ – ciepło przemiany, dla stali $Q_{\gamma\alpha} = 10^8 \text{ J/m}^3$;
- ΔV_f – przyrost objętości fazy przemienionej,
- $\Delta\tau$ – przyrost czasu,
- σ_p – naprężenie uplastyczniające,
- $\dot{\epsilon}_i$ – intensywność prędkości odkształcenia,
- H' – moduł plastyczności,
- E – moduł sprężystości.



Rys. 1 Schemat rozwiązania niestacjonarnego w przekroju poprzecznym pasma

Fig. 1. Scheme of the 2D transient solution of the heat transfer in the strip cross section

Rozwiązaniem jest pole temperatury, które powinno spełniać warunki brzegowe na powierzchni pasma. Warunki brzegowe wprowadzono w postaci gęstości strumieni ciepła:

– na powierzchni chłodzonej w powietrzu

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

– na powierzchni chłodzonej wodą

$$q_{sw} = \alpha_{sw} (T_s - T_w) \quad (4)$$

– na powierzchni chłodzonej natryskiem wodnym

$$q_{sn} = \alpha_{sn} (T_s - T_n) \quad (5)$$

– na powierzchni chłodzonej w skrzyni wodnej

$$q_{sk} = \alpha_{sk} (T_s - T_k) \quad (6)$$

– na powierzchni styku z walcem

$$q_{sr} = \alpha_{sr} (T_s - T_r) \quad (7)$$

gdzie:

- T_s – temperatura powierzchni pasma,
- T_a – temperatura powietrza,
- T_w – temperatura wody chłodzącej,
- T_n – temperatura wody natryskiwanej na powierzchnię chłodzoną,
- T_k – temperatura wody w skrzyni chłodzącej,
- T_r – temperatura powierzchni walca,
- α_{sa} – współczynnik przejmowania ciepła przy chłodzeniu pasma w powietrzu,
- α_{sw} – współczynnik przejmowania ciepła przy chłodzeniu wodą,
- α_{sn} – współczynnik przejmowania ciepła przy chłodzeniu pasma natryskiem wodnym,
- α_{sk} – współczynnik przejmowania ciepła na powierzchni pasma chłodzonego w skrzyni wodnej,
- α_{sr} – współczynnik przejmowania ciepła na powierzchni styku pasma z walcem.

Współczynnik przejmowania ciepła na powierzchni pasma chłodzonej w powietrzu wyznaczono z uwzględnieniem promieniowania i konwekcji. Zastępczy współczynnik przejmowania ciepła obliczano z wzoru:

$$\alpha_{sa} = 5,67 \cdot 10^{-8} \varepsilon_s \frac{T_s^4 - T_a^4}{T_s - T_a} + \frac{Nu \lambda_p}{L} \quad (8)$$

gdzie:

- ε_s – emisyjność powierzchni pasma,
- Nu – liczba Nusselta,
- λ_p – współczynnik przewodzenia ciepła powietrza,
- L – szerokość pasma.

Dla chłodzenia w powietrzu liczbę Nusselta dla laminarnej warstwy przyściennej wyznaczano z wzoru [5]:

$$Nu = 0,664 Re^{1/2} Pr^{1/3} \left(\frac{Pr}{Pr_s} \right)^{0,19} \quad (9)$$

gdzie:

- Re – liczba Reynoldsa;
- Pr – liczba Prandtla;
- Pr_s – liczba Prandtla wyznaczona dla temperatury powietrza równej temperaturze powierzchni pasma.

W obszarze przejściowym stosowano wzór [5]:

$$Nu = 0,037 Re^{0,8} Pr^{0,5} \left(\frac{Pr}{Pr_s} \right)^{0,19} \quad (10)$$

Na powierzchni pasma chłodzonej swobodnie opadającą wodą lub wodą pod niskim ciśnieniem współczynnik przejmowania ciepła określono z wzoru [4]:

$$\alpha_{sw} = -1654,4 + 117,5 t_s - 0,4667 t_s^2 + 6,932 \cdot 10^{-4} t_s^3 - 3,661 \cdot 10^{-7} t_s^4 \quad (11)$$

gdzie: t_s – temperatura powierzchni pasma w °C.

Współczynnik przejmowania ciepła na powierzchni pasma chłodzonej natryskiem wodnym obliczano z wzoru [6]:

$$\alpha_{sn} = 3,15 \cdot 10^9 w_s^{0,616} \left[700 + \frac{t_s - 700}{\exp(0,1t_s - 70) + 1} \right]^{2,455} \times \left[1 - \frac{1}{\exp(0,025t_s - 6,25) + 1} \right] \quad (12)$$

Równanie to pozwala wyznaczyć wartość współczynnika wymiany ciepła na powierzchni chłodzonej w zakresie temperatury pasma t_s od 150 do 900°C i gęstości strumieni wody w_s od 0,16 do 62 litrów/(m²s).

Do wyznaczenia współczynnika przejmowania ciepła na powierzchni pasma chłodzonego w skrzyni wodnej zastosowano wzór [5]:

$$\alpha_{sk} = \frac{\lambda_w}{D} 0,021 Re_w^{0,8} Pr_w^{0,43} \left(\frac{Pr_w}{Pr_s} \right)^{0,25} \quad (13)$$

gdzie:

λ_w – współczynnik przewodzenia ciepła wody,
 D – średnica hydrauliczna kanału.

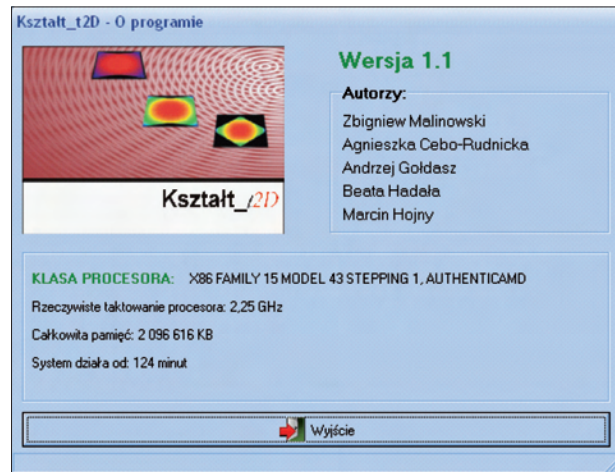
Indeks dolny s oznacza, że liczba Prandtla Pr wyznaczana jest dla temperatury wody równej temperaturze powierzchni pasma. Indeks dolny w oznacza, że liczby Reynoldsa i Prandtla wyznaczane są dla średniej wartości temperatury wody chłodzącej w kanale.

Na powierzchni styku pasma z walcem współczynnik przejmowania ciepła obliczono z wzoru [7]:

$$\alpha_{sr} = 36400 - 74t_s + 0,04t_s^2 \quad (14)$$

3. PROGRAM KOMPUTEROWY

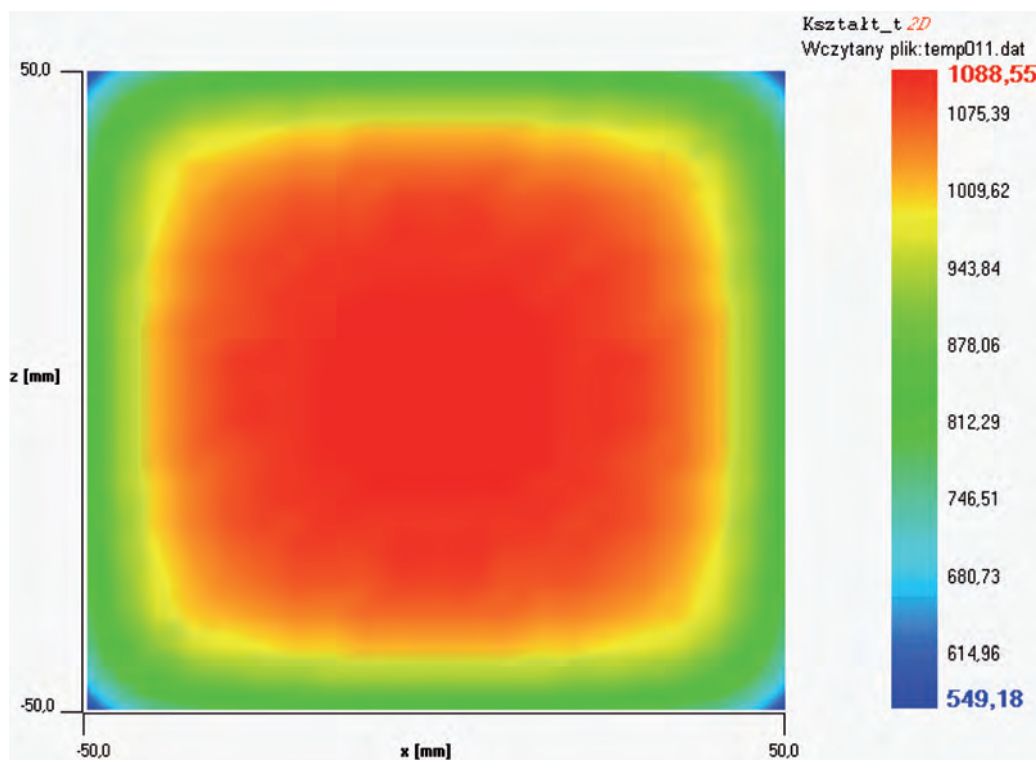
Zastosowane warunki brzegowe wymiany ciepła umożliwiają zbudowanie wirtualnego modelu zmian temperatury pasma w kolejnych cyklach walcowania i chłodzenia. W tym celu opracowano program komputerowy Kształt_t2D (rys. 2).



Rys. 2. Okno startowe programu Kształt_t2D

Fig. 2. Start window of "Kształt_t2D" application

Program wyposażono w procedury ułatwiające wprowadzanie danych i zarządzanie projektami. Uzyskane wyniki zapisywane są w katalogach wskazanych przez użytkownika w postaci plików tekstowych. Pliki mogą być obrabiane za pomocą komercyjnych programów do graficznej prezentacji danych liczbowych. W plikach zapisane są zmiany temperatury pasma w kolejnych cyklach walcowania i chłodzenia. W programie Kształt_t2D wbudowano własny system graficznej prezentacji wyników obliczeń (rys. 3). Użytkownik może analizować rozkład temperatury w przekroju poprzecznym pasma w kolejnych etapach chłodzenia oraz zmianę średniej temperatury pasma, średniej temperatury powierzchni górnej i powierzchni dolnej w czasie. Wbudowana w program wizualizacja danych zdecydowanie poprawia komfort pracy z programem i umożliwia



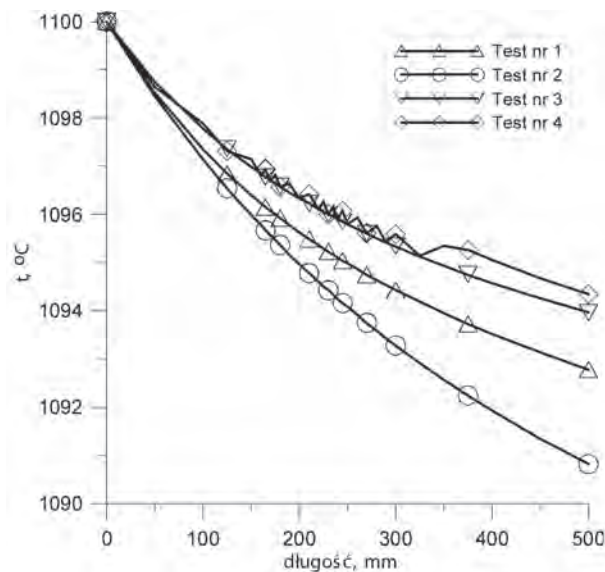
Rys. 3. Okno wizualizacji pola temperatury w przekroju poprzecznym pasma

Fig. 3. Window of temperature field visualization in the cross section of the strip

natychmiastową ocenę uzyskanych wyników. Pozwala to na szybką modyfikację danych wejściowych i wykonanie kolejnej symulacji. Czas obliczeń nie przekracza jednej minuty i jest porównywalny z rzeczywistym czasem walcowania.

4. OBLICZENIA TESTUJĄCE

Obliczenia testujące model wymiany ciepła wykonano dla chłodzenia pasma w powietrzu i walcowania w czterech przepustach pręta kwadratowego. Obliczenia rozkładu temperatury dla chłodzenia w powietrzu wykonano dla pasma o przekroju poprzecznym 175 mm × 260 mm. Założono, że pasmo przemieszcza się z prędkością 3 m/s. Test nr 1 (rys. 4) przedstawia wynik uzyskany za pomocą opracowanego modelu niestacjonarnego, a test nr 2 (rys. 4) przedstawia wynik otrzymany za pomocą stacjonarnego modelu trójwymiarowego. W obu testach przyjęto, że na powierzchni pasma straty ciepła wynoszą 200 kW/m². Błąd rozwiązania dwuwymiarowego wynosi w tym przypadku 2°C. Tego typu warunek brzegowy przyjęto wyłącznie do obliczeń testujących. Porównanie obu metod dla warunku brzegowego w postaci współczynnika przejmowania ciepła $\alpha = 150 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ przedstawiają wyniki testu nr 3 i testu nr 4 (rys. 4). W tym przypadku wyniki otrzymane dla opracowanego modelu dwuwymiarowego (test nr 3) są prawie identyczne jak wyniki otrzymane za pomocą trójwymiarowego rozwiązania stacjonarnego (test nr 4).

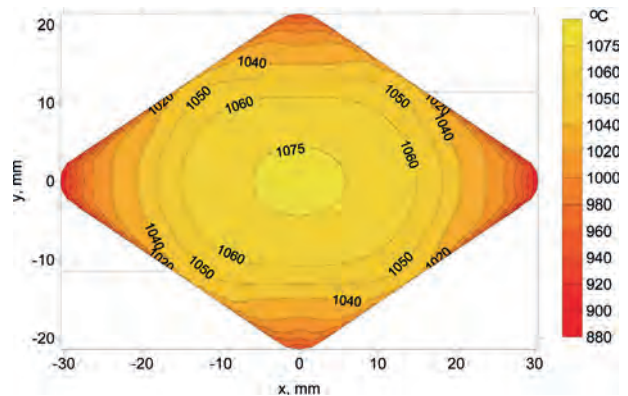


Rys. 4. Zmiany temperatury powierzchni pasma chłodzonego w powietrzu wyznaczone za pomocą modelu dwuwymiarowego i trójwymiarowego

Fig. 4. Temperature variation on air-cooled billet surface, determined by means of 2D and 3D finite element models

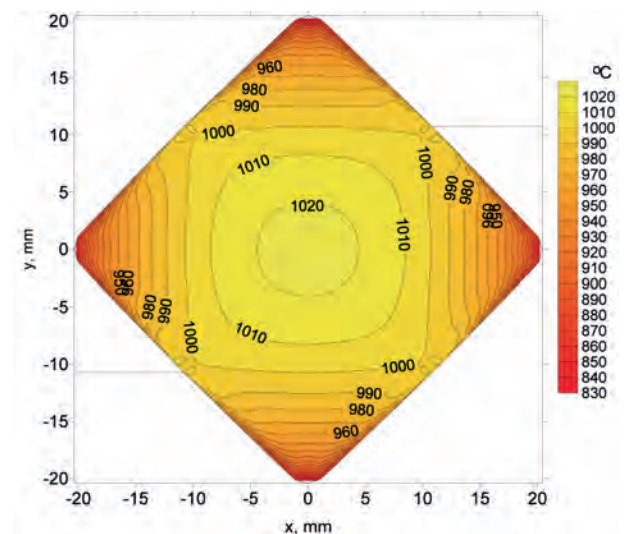
Obliczenia zmian temperatury pręta kwadratowego o początkowych wymiarach 45,2 mm × 45,2 mm w czasie walcowania wykonano dla stali o składzie chemicznym: C = 0,45%, Si = 0,20%, Mn = 0,50%, Cr = 0,30%, Ni = 0,30%. Modelowano walcowanie w czterech przepustach w celu otrzymania pręta kwadratowego o boku 30 mm. Przyjęto temperaturę wsadu 1100°C, oraz prędkość walcowania w pierwszym przepuszczeniu 6 m/s. Całkowity czas procesu walcowania i chłodzenia wynosił 38 s. Po

pierwszym przepuszczeniu i chłodzeniu w powietrzu (15 s od początku procesu) temperatura w osi pasma obniżyła się do 1078°C (rys. 5). W wyniku walcowania w kolejnych przepustach i chłodzenia w powietrzu między przepustami (38 s od początku procesu) temperatura pasma spadła w osi pręta do 1022°C, a w narożach do 830°C (rys. 6). Rozkład temperatury jest typowy dla procesu walcowania. Widoczne są znaczne spadki temperatury naroży walcowanego pasma. W osi pasma spadki temperatury są zdecydowanie wolniejsze i po 38 s temperatura w osi pasma obniżyła się o 78°C. Średni spadek temperatury w przekroju pasma w modelowanym procesie wynosił 2,9°C/s.



Rys. 5. Pole temperatury w przekroju poprzecznym pasma po pierwszym przepuszczeniu (15 s od początku procesu)

Fig. 5. Temperature field in the strip cross section after the first pass (15 s of cooling)



Rys. 6. Pole temperatury w przekroju poprzecznym pasma po czwartym przepuszczeniu (38 s od początku procesu)

Fig. 6. Temperature field in the strip cross section after the fourth pass (38 s of cooling)

5. PODSUMOWANIE

Opracowano model matematyczny, algorytmy numeryczne i program komputerowy do modelowania temperatury w przekroju poprzecznym pasma w kolejnych etapach walcowania i chłodzenia. Zastosowane rozwiązanie 2D porównano z dokładnym rozwiązaniem 3D dla chłodzenia w powietrzu – otrzymano prawie identyczne wyniki. Czas obliczeń pola temperatury za pomocą modelu 2D na komputerze typu PC nie przekroczył 5 sekund dla walcowania pasma w czterech przepustach.

LITERATURA

1. Malinowski Z., Gołdasz A., Hadała B., Banach M., Zygmunt T.: Modelowanie numeryczne pól temperatury kształowników walcowanych na gorąco. Hutnik Wiadomości Hutnicze, 2008, nr 4, 176–181
2. Głowacki M., Pietrzyk M., Okoń R., Kusiak J.: Zastosowanie metody elementów skończonych do wyznaczenia pola temperatur na przekroju poprzecznym kształowników walcowanych na gorąco, Hutnik, 1990, nr 1, s. 6–10
3. Głowacki M.: Termomechaniczno-mikrostrukturalny model walcowania w wykrojach kształtowych, AGH Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków 1998
4. Malinowski Z.; Numeryczne modele w przeróbce plastycznej i wymianie ciepła, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków 2005
5. Yunus A.Ç.: Heat and mass transef, McGrawHill, New York 2007
6. Hodgson P.D., Browne K.M., Collinson D.C., Pham T.T., Gibbs R.K.: Proc. 3rd Int. Seminar on Quenching and Carburising, Melbourne 1990, s. 139–141
7. 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

Praca wykonana w ramach zadania w projekcie rozwojowym N R07 0008 04 „Opracowanie podstaw przemysłowych technologii kształtowania struktury i właściwości wyrobów z metali i stopów z wykorzystaniem symulacji fizycznej i numerycznej” realizowanym przez Instytut Metalurgii Żelaza im. Stanisława Staszica w Gliwicach, dofinansowanym przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Henryk Dyja