

POLA TEMPERATURY I PRĘDKOŚCI W UKŁADZIE WLEWEK-KRYSTALIZATOR COS

BOKOTA Adam, SOWA Leszek

Instytut Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Politechnika Częstochowska
42-201 Częstochowa, ul. Dąbrowskiego 73, POLSKA

STRESZCZENIE

Opracowano kompleksowy model matematyczny i numeryczny narastania fazy stałej metalu w obrębie krystalizatora ciągłego odlewania o prostokątnym przekroju poprzecznym. Analizowano zjawiska cieplne i przepływowe zachodzące w obszarze krystalizatora od chwili jego zalania ciekłym metalem do momentu opuszczenia przez drąg startowy obszaru kontrolnego wlewka. Pola prędkości otrzymano z rozwiązania równań Naviera-Stokesa i równania ciągłości, natomiast pola temperatury z rozwiązania równania przewodnictwa z członem konwekcyjnym. Zadanie rozwiązano metodą elementów skończonych.

1. WSTĘP

Technologia ciągłego odlewania stali (COS) jest, w okresie ostatniego dwudziestolecia, coraz częściej stosowaną metodą wytwarzania wlewków stalowych, o czym świadczy znaczny wzrost liczby wykonanych instalacji urządzeń COS [7]. Proces COS cechuje duża oszczędność materiału, dobra jakość wyrobu, związana z uzyskaniem odpowiedniej struktury, oraz możliwość mechanizacji i automatyzacji procesu. Złożoność zjawisk towarzyszących ciągłemu odlewaniu stali, szczególnie wlewków wielkogabarytowych, powoduje że doświadczenia praktyczne uzyskane przez obserwacje procesu odlewania do wlewnic lub form są niewystarczające. Eksperymenty na rzeczywistych urządzeniach wymagają jednak nie tylko pokonania trudności technicznych, lecz również charakteryzują się znaczną pracochłonnością i dużymi kosztami. Dlatego też, wyniki symulacji komputerowych stanowią tanie i częstokroć jedyne źródło informacji o podstawowych parametrach prowadzenia procesu COS (szczególnie przy odlewaniu nowych gatunków stali) pozwalających otrzymać wlewek o pożądanej jakości.

W ostatnich latach opracowano wiele modeli matematycznych przepływu ciepła z uwzględnieniem ruchów ciekłego metalu w procesie ciągłego odlewania [4,5,9,10], jednakże większość z nich może być stosowana tylko do symulacji stanów ustalonych. W modelach od dawna stosowanych dokonywano uproszczeń uwzględniając tylko pionową składową

prędkości związanej z ruchem wlewka ku dołowi [6,7,8], lub rozpatrywano inne zjawiska np. mechaniczne lub skurczu metalu i związane z tym problem tworzenia się szczeliny pomiędzy krystalizatorem i wlewkiem ciągłym [2]. W celu lepszego sterowania przepływem ciepła w całym cyklu procesu odlewania większość uwagi skupiona jest ostatnio na rozwoju modeli w czasie rzeczywistym, które są możliwe do stosowania w procesie nieustalonym [3,7,10].

W pracy dokonywano oceny, wpływu ruchów ciekłego metalu w fazie ciekłej wlewka ciągłego na pole temperatury w analizowanym układzie i kinetykę narastania fazy stałej wlewka w kolejnych etapach jego powstawania. Zawiera ona model matematyczny i numeryczny, procesu krzepnięcia płaskiego wlewka ciągłego, uwzględniający zmianę parametrów termofizycznych od temperatury i od udziału fazy stałej w dwufazowej strefie przejściowej. Pola prędkości otrzymano z rozwiązania układu równań Naviera-Stokesa natomiast pola temperatury z rozwiązania równania Fouriera-Kirchhoffa z członem konwekcyjnym. Założono, że front krzepnięcia jest rozmyty, tzn. ciekły metal krzepnie w przedziale temperatury likwidus-solidus. Analizie poddano krystalizator o przekroju poprzecznym prostokątnym. Zadanie rozwiązano metodą elementów skończonych [1,3,7,8,10,11].

2. MODEL MATEMATYCZNY PROCESU KRZEPNIĘCIA METALU W KRYSTALIZATORZE COS

Proponowany model matematyczny do opisu procesu krzepnięcia metalu w krystalizatorze COS z uwzględnieniem ruchów fazy ciekłej opiera się na rozwiązaniu następującego układu równań różniczkowych [3,5,10,11]:

- równań Naviera-Stokesa i równania ciągłości:

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \rho \mathbf{g}, \quad \nabla \cdot \mathbf{v} = 0, \quad (1)$$

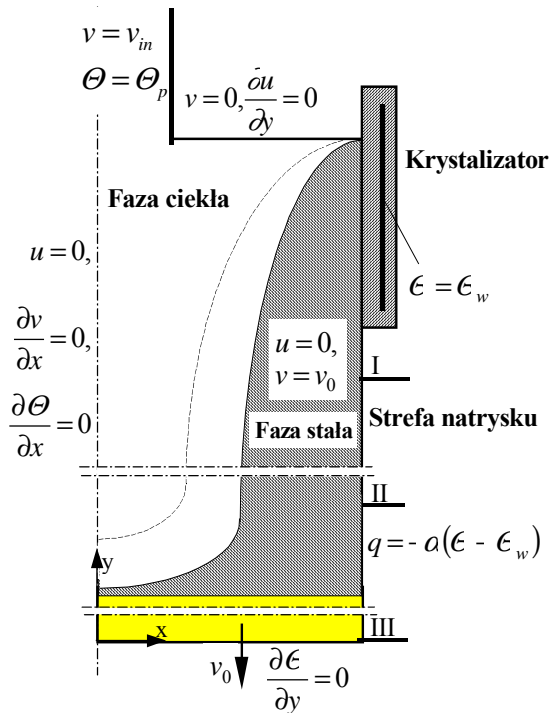
- równania przewodnictwa z członem konwekcyjnym:

$$\nabla \cdot (\lambda \nabla \Theta(\mathbf{x}, t)) - \rho C_{ef} \frac{\partial \Theta}{\partial t} - \rho C_{ef} \nabla \Theta \cdot \mathbf{v} = 0, \quad (2)$$

- równania stanu, które dla założonego modelu cieczy zredukowano do postaci:

$$f(p, \rho, \Theta) = \rho(\Theta). \quad (3)$$

gdzie: ρ - gęstość [kg/m³], \mathbf{v} - prędkość przepływu metalu [m/s], \mathbf{g} - przyspieszenie ziemskie [N/kg], p - ciśnienie [N/m²], Θ - temperatura [K], μ - współczynnik lepkości dynamicznej [Ns/m²], C_{ef} - efektywna pojemność cieplna strefy dwufazowej [J/(kgK)], λ - współczynnik przewodzenia ciepła [W/(mK)], t - czas [s], \mathbf{x} - wektor położenia [m].



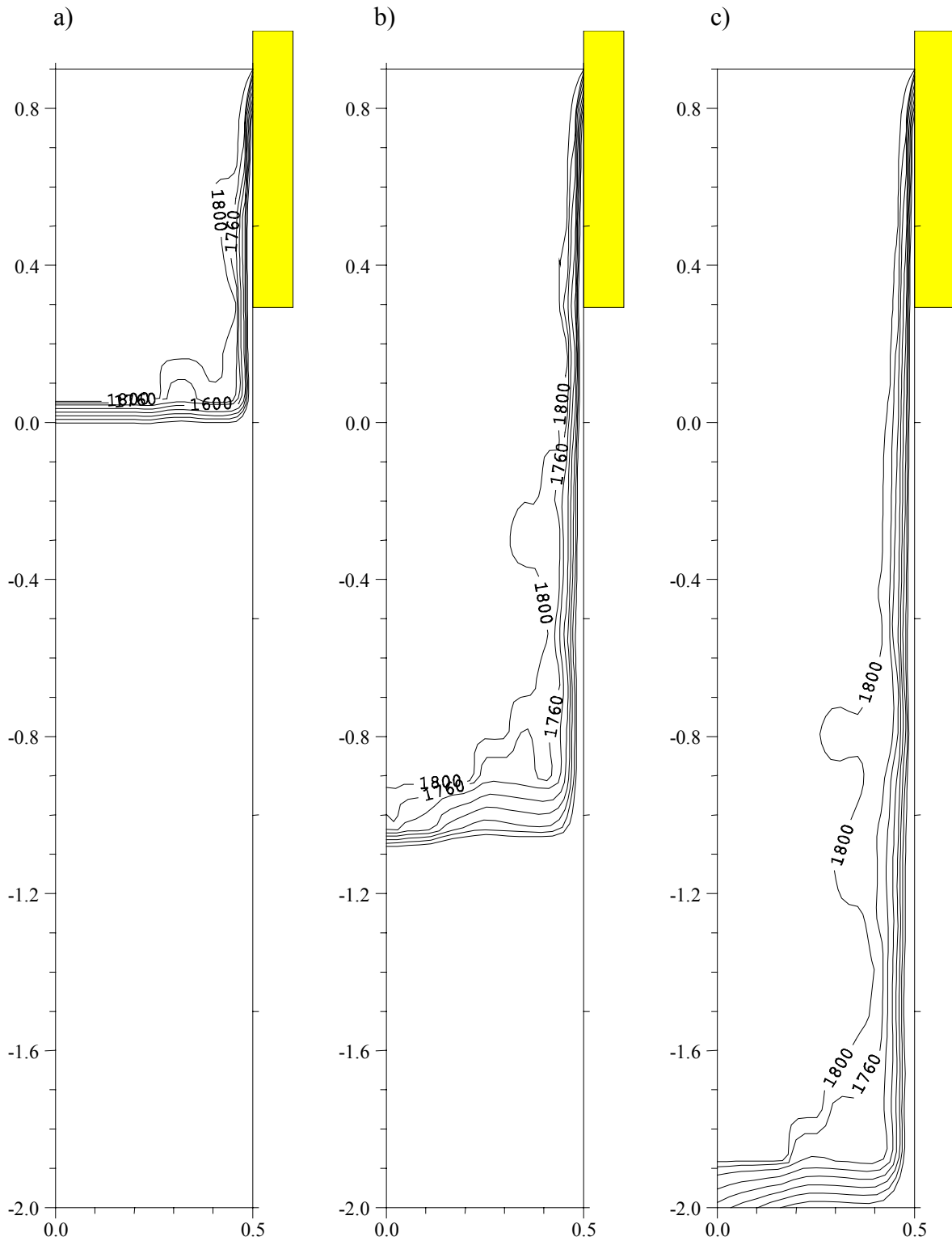
Rys.1. Rozważany układ i warunki brzegowe przyjęte w rozwiązywanym zadaniu
 Fig.1. Region and boundary conditions assumed in the problem under study

3. OBLICZENIA NUMERYCZNE

Przeprowadzono symulację numeryczną odlewania stali na urządzeniu COS z prędkością odlewania $v_0 = 0.01$ [m/s]. Dla założonej prędkości przesuwu wlewką (v_0) z bilansu masy obliczono prędkość zalewania (v_{in}) stali wylewem umieszczonym centralnie względem kryształizatora. Obliczenia wykonano dla układu wlewk-kryształizator o wymiarach wewnętrznych kryształizatora $0.25 \times 1 \times 0.7$ [m] i długości kontrolnej tworzącego się wlewką wynoszącej 2.9 [m]. Własności termofizyczne stali zaczerpnięto z prac [2,5,8]. Przyjęto następujące temperatury dla cieczy metalicznej: $\epsilon_p = 1810$ K, $\epsilon_L = 1800$ K, $\epsilon_S = 1760$ K. W pierwszym etapie prowadzono obliczenia bez ruchu wlewką, do czasu otrzymania odpowiedniej grubości narosłej fazy stałej na ściankach kryształizatora bezpośrednio po jego zalaniu, a następnie wprowadzono wlewkę w ruch łącznie z drągiem startowym. Analizowano zatem zjawiska cieplne i przepływowe zachodzące w obszarze wlewką ciągłego od chwili zalania kryształizatora ciekłym metalem do momentu opuszczenia przez drąg startowy rozważanego obszaru kontrolnego. Badano wpływ pola prędkości w fazie ciekłej na pole temperatury i narastanie fazy stałej wlewką w kolejnych etapach jego ruchu. Otrzymane pola temperatury przedstawiono na rys.2, a pola prędkości na rys.3.

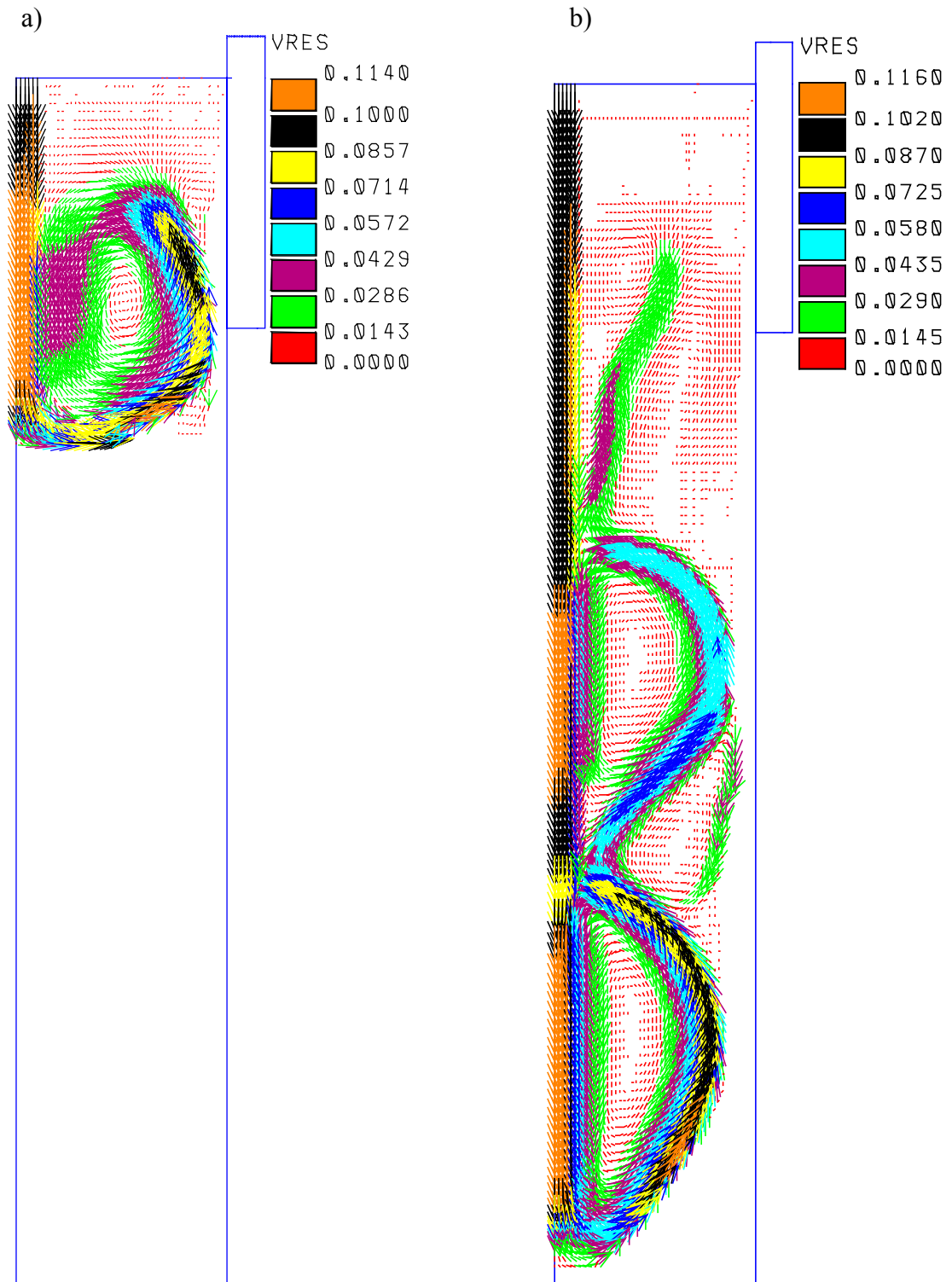
Powyższy układ równań uzupełniono warunkami początkowymi przyjętymi w odniesieniu do pól prędkości, ciśnienia i temperatury [3] i warunkami brzegowymi założonymi na zaznaczonych powierzchniach (rys.1) [3,4,5,9,10].

Postawione zadanie rozwiązano metodą elementów skończonych w sformułowaniu reszt ważonych. Podobszary rozważanego układu zdyskretyzowano siatką czterowęzłowych prostokątnych elementów skończonych. Do aproksymacji równań (1-3) zastosowano metodę Petrova-Galerkina z funkcjami bazowymi przesuwającymi punkty całkowania ("upwind function"), która zapewniła stabilność obliczeń numerycznych przy wymuszonej, ograniczeniach pamięciowymi komputera, ustalonej gęstości siatki elementów skończonych [1,3].



Rys. 2. Izolinie temperatury po osiągnięciu przez czoło ciekłego metalu: a) poziomu I ($t = 100s$), b) poziomu II ($t = 202s$), c) poziomu III ($t = 300s$)

Fig. 2. Temperature isolines when the face of melt metal reached: a) I level ($t = 100s$), b) II level ($t = 202s$), c) III level ($t = 300s$)



Rys. 3. Wektory prędkości po osiągnięciu przez czoło ciekłego metalu:
 a) poziomu I ($t = 100\text{s}$), b) poziomu III ($t = 300\text{s}$)

Fig. 3. Velocity vectors when the face of melt metal reached:
 a) I level ($t = 100\text{s}$), b) III level ($t = 300\text{s}$)

LITERATURA

- [1] Bokota A., Iskierka S., Finite element method for solving diffusion-convection problems in the presence of a moving heat point source. *Finite Elements in Analysis and Design*, 1994, vol. 17, s. 89-99.
- [2] Bokota A., Parkitny R., Model powstawania szczeliny skurczowej pomiędzy krystalizatorem a wlewką ciągłą. *Krzepnięcie Metali i Stopów*, 1997, vol. 30, s. 13-24.
- [3] Bokota A., Sowa L., Model przepływu ciepła i masy w krystalizatorze w początkowym stadium procesu COS. *Krzepnięcie Metali i Stopów*, 1997, vol. 30, s. 25-34.
- [4] Choudhary S.K., Mazumdar D., Mathematical modelling of transport phenomena in continuous casting of steel. *ISIJ International*, 1994, vol. 34, nr 7, s. 584-592.
- [5] Huang X., Thomas B.G., Najjar F.M., Modeling superheat removal during continuous casting of steel slabs. *Metallurgical Transactions B*, 1992, vol. 23B, s. 339-356.
- [6] Lally B., Biegler L., Henein H., Finite difference heat-transfer modeling for continuous casting. *Metallurgical Transactions B*, 1990, vol. 21B, s. 761-770.
- [7] Louhenkilpi S., Nieminen R., Real-time simulation of heat transfer in continuous casting. *Metallurgical Transactions B*, 1993, vol. 24B, nr 8, s. 685-693.
- [8] Mochnacki B., Suchy J., Modelowanie i symulacja krzepnięcia odlewów. PWN, W-wa 1993.
- [9] Parkitny R., Włodarczyk T., Anwendung der Segmentmethode zur Analyse der Konvektionsbewegungen eines flüssigen Metalls. *ZAMM*, 1995, vol. 75, s. 505-506.
- [10] Sowa L., Numerical model of solid phase growing in a continuous steel caster. *Acta Polytechnica*, 1996, vol. 36, nr 5, s. 57-68.
- [11] Taylor C., Hood P., A numerical solution of the Navier-Stokes equations using the finite element technique. *Computer & Fluid*, 1973, vol. 1, s. 73-100.

Praca finansowana przez KBN

**THERMAL AND VELOCITY FIELDS IN THE SYSTEM
CAST SLAB - CONTINUOUS CASTING MOULD**

ABSTRACT

Mathematical and numerical complex model of the growth of the solid metal phase within a rectangular cross-section continuous casting mould are presented in this paper. The thermal and fluid flow phenomena, which proceed in the continuous casting mould, from the moment of his pouring by molten metal until the starter bar leaves the cast slab control area, were analysed. The velocity fields are obtained by solving the Navier-Stokes equations and the continuity equation, whereas the thermal fields are calculated by solving the Fourier-Kirchhoff equation with the convection term. The problem was solved by the finite element method.