ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1995

Seria: MECHANIKA z. 122 Nr kol. 1267

Adam BOKOTA, Sławomir ISKIERKA, Leszek SOWA
Instytut Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn
Katedra Elektrotechniki i Elekrotechnologii
Politechnika Częstochowska

MODEL NUMERYCZNY NARASTANIA FAZY STAŁEJ W PROCESIE CIĄGŁEGO ODLEWANIA

Streszczenie. Przedstawiono model matematyczny i numeryczny narastania fazy stałej metalu w obrębie krystalizatora ciągłego odlewania o prostokątnym przekroju poprzecznym. Pola prędkości otrzymano z rozwiązania układu równań Naviera-Stokesa, natomiast pola temperatur z rozwiązania równania Fouriera-Kirchhoffa z członem konwekcyjnym, w których uwzględnia się zmianę parametrów termofizycznych od temperatury i od udziału fazy stałej w dwufazowej strefie przejściowej. Zadanie rozwiązano metodą elementów skończonych.

NUMERICAL MODEL OF SOLID PHASE GROWING IN A CONTINUOUS STEEL CASTING PROCESS

Summary. A mathematical and numerical models of growing of solid metal phase within a rectangular cross-section continuous steel caster are presented in the paper. The velocity field is obtained from the solution of Navier-Stokes equations whereas the thermal field is calculated from the solution of Fourier-Kirchhoff equation with the convection term in which there were considered the changes of thermophysical parameters depending on the temperature and the solid phase volume fractions in the mushy zone. The problem was solved by finite element method.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ МОДЕЛЬ НАРАСТАНИЯ ТВЁРДОЙ ФАЗЫ В ПРОЦЕССЕ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ

Резюме. В работе представлена математическая и вычислительная модель нарастания твёрдой фазы в области кристализатора машины непрерывной разливки стали, которого поперечное сечание является прямоугольником. Поля скорости получили решением систиемы урабниений Навьер-Стокеса, темпертурные поля получили из решения уравнении Фоуриера-Кирхофа с конвекционным членом. В этих уравниениях учтено измиениение термофизических параметров в зависимости от температуры и доли твёрдой фазы в двухфазной переходной зоне. Проблема решена методом конечных элементов.

1. WSTĘP

Staranna kontrola chłodzenia wlewka i szybkość narastania naskórka w krystalizatorze jest w centrum zainteresowania badaczy procesu ciągłego odlewania. Celem tej kontroli jest przede wszystkim eliminacja pęknięć i innych defektów, które mogą powstawać w odlewanym materiale. Aby uzyskać bezdefektowy produkt wlewek musi być chłodzony zgodnie z zaleceniami dla gatunku stali, jego wymiarów, prędkości odlewania i rodzaju krystalizatora. Kluczowym elementem w optymalizowaniu prędkości odlewania ze względu na jakość produkcji jest kontrola długości obszaru ciekłego [7], dlatego przepływ ciepła w tym procesie odgrywa bardzo ważną rolę szczególnie wtedy, gdy odlewa się gatunki stali skłonne do pęknięć. Do analizy stanu termicznego ciągłego odlewania używane są dwie metody: empiryczna korelacja wielu eksperymentalnych rezultatów i matematyczne symulacyjne modele poparte danymi eksperymentalnymi. Zarówno temperaturę, jak i grubość naskórka trudno jest mierzyć z odpowiednią dokładnością wewnątrz poruszającego się wlewka. Ponadto w modelach empirycznych trudno jest ekstrapolować wyniki poza zakres eksperymentalny oraz symulować stany chwilowe. Modele matematyczne przepływu ciepła są szeroko stosowane w celu ulepszania istniejących systemów chłodzenia oraz sterowania procesem ciągłego odlewania. Są one łatwe do zastosowania i porównywalne w symulowaniu stanów termicznych wlewka. W ostatnich latach opracowano wiele modeli matematycznych przepływu ciepła w procesie ciągłego odlewania [4,5,6], jednakże większość z nich może być stosowana tylko do symulacji stanów ustalonych. Dają one pole temperatury wlewka jako funkcję parametrów odlewniczych takich, jak: prędkość odlewania, przegrzanie, odbieranie ciepła przez krystalizator, prędkość natrysku wody chłodzącej, gatunek stali i wymiary wlewka. Pomimo że modele stanu ustalonego dostarczają ważnej wiedzy dotyczącej działania krystalizatora, to jednak nie mogą być stosowane do symulacji stanów chwilowych krystalizatora, które występują dosyć często w procesie odlewania. 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 wykorzystania w procesie nieustalonym [5,7]. W modelu takim czas obliczeń musi być wystarczająco krótki oraz powinno być uwzględnione rozpoczęcie i zakończenie odlewania.

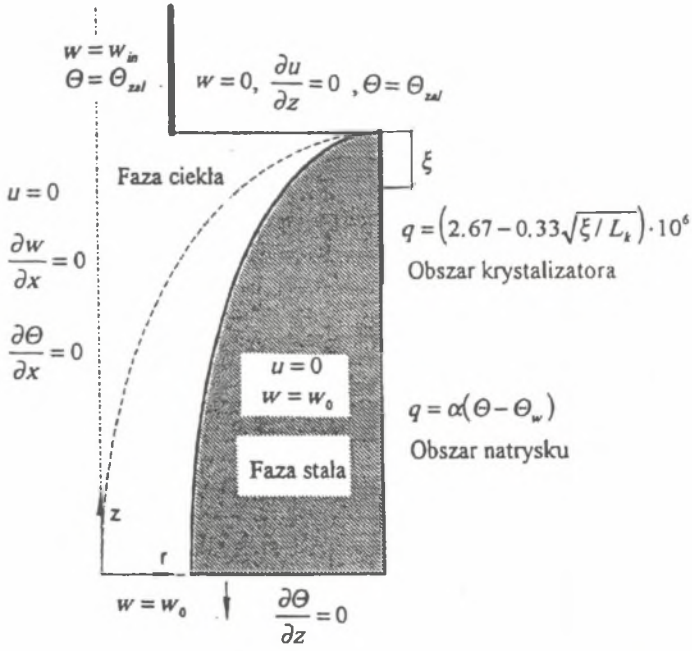
Celem pracy jest ocena, na drodze symulacji numerycznej, wpływu prędkości i temperatury zalewania na kinetykę narastania fazy stałej i na pola temperatur w obrębie krystalizatora do momentu ustalenia się procesu odlewania. Przedstawiono model matematyczny i numeryczny narastania fazy stałej metalu w obrębie krystalizatora ciągłego odlewania uwzględniając zmianę parametrów termofizycznych od temperatury i od udziału fazy stałej w dwufazowej strefie przejściowej. Dla przepływającego ciekłego metalu założono stałe natężenie przepływu na wejściu do krystalizatora ustalając w ten sposób prędkość przesuwu wlewka, czyli prędkość odlewania. Pola prędkości otrzymano z rozwiązania układu równań Naviera-Stokesa, natomiast pola temperatur z rozwiązania równania Fouriera-Kirchhoffa z członem konwekcyjnym. Założono, że front krzepnięcia jest rozmyty, tzn. ciekły metal krzepnie w przedziale temperatur likwidusu i solidusu. W symulacji numerycznej procesu narastania zastosowano metodę zapasu temperatury (Temperature Recovery Method) eliminując procesy iteracyjne w rozwiązywaniu zadania. Analizie poddano krystalizator o przekroju poprzecznym prostokątnym. Zadanie rozwiązano metodą elementów skończonych [1,2,3,8].

2. MODEL MATEMATYCZNY PRZEPŁYWU CIEPŁA

Proponowany model numerycznej symulacji narastania fazy stałej w krystalizatorze ciągłego odlewania opiera się na rozwiązywaniu równania Fouriera-Kirchhoffa w postaci ogólnej, tzn. z członem konwekcyjnym [3,4,7], opisującym przepływ ciepła w obszarze $\Omega_K \cup \Omega_S \cup \Omega_L$ (krystalizator, faza stała, faza ciekła) (rys.1)

$$\nabla\bullet(\lambda\nabla\theta(x,t))+\dot{Q} = C_{ef}\left(\frac{\partial\theta(x,t)}{\partial T}+\nabla\theta(x,t)\bullet v\right) \tag{1}$$

gdzie: $\dot{Q} = \rho L\frac{d\Phi(\theta(x,t))}{dt}$ - wydajność objętościowa wewnętrznego źródła ciepła [W/m3], Φ - objętościowy udział fazy stałej , $\Phi \in <0, 1>$, λ - współczynnik przewodzenia ciepła [W/(m K)], ρ - gęstość [kg/m3], C_{ef} - efektywne ciepło właściwe [J/(m3K)], v - prędkość przepływu metalu [m/s], L - ciepło krzepnięcia [J/kg], t - czas [s], x - wektor położenia we współrzędnych Eulera [m],



Rys.1. Schemat rozważanego obszaru i warunki brzegowe przyjęte w rozwiązywanym zadaniu

Fig.1. Considered region and boundary conditions assumed in the solved problem

Wektor prędkości występujący w równaniu (1) jest wynikiem rozwiązania równań Naviera-Stokesa pakietem "flowstar" programu COSMOS. W zastosowanym modelu narastania fazy stałej źródła ciepła nie występują jawnie w równaniu przewodnictwa, toteż równanie różniczkowe (1) przyjmuje postać:

$$\nabla\bullet(\lambda\nabla\theta) - C_{ef}\frac{\partial\theta}{\partial t} - C_{ef}\nabla\theta\bullet v = 0, \tag{2}$$

którego słaba forma (wyjściowa do metody elementów skończonych) ma postać [1,2,4]:

$$\int_{\Omega}\nabla\bullet(\lambda\nabla\theta)W d\Omega - \int_{\Omega}C_{ef}\frac{\partial\theta}{\partial t}W d\Omega - \int_{\Omega}C_{ef}\nabla\theta\bullet v W d\Omega = 0, \tag{3}$$

gdzie: $W = W(w_i)$ jest wektorem funkcji bazowych.

Aproksymację numeryczną równań (3) przeprowadzono metodą Petrova-Galerkina, zapewniającą stabilność rozwiązania dla szerokiej gamy prędkości.

3. MODEL MATEMATYCZNY PRZEPŁYWU CIEKŁEGO METALU

Przy dostatecznym przegrzaniu metale i ich stopy w stanie ciekłym można traktować jak ciecze newtonowskie [6,9], toteż w pracy korzysta się z układu równań opisujących laminarny przepływ nieściśliwego płynu lepkiego (równania ciągłości przepływu i Naviera-Stokesa) [8]:

$$\nabla\bullet v = 0 \tag{4}$$

$$\rho\frac{dv}{d}t = \rho F - \nabla p + \eta\nabla^2 v, \tag{5}$$

gdzie: F - wektor sił masowych [N/kg], η - współczynnik lepkości [Ns/m2].

Równanie stanu dla założonego modelu cieczy redukuje się do postaci:

$$f(p,\rho,\theta) = \rho(\theta) \tag{6}$$

Stosując do równań różniczkowych (3) i (4) metodę reszt ważonych

$$\int_{\Omega} \phi \nabla \bullet v d\Omega = 0,$$

$$\int_{\Omega} \phi \rho (\dot{v} - g) d\Omega + \int_{\Omega} \phi \nabla p d\Omega - \int_{\Omega} \phi \eta \nabla \bullet (\nabla v) d\Omega = 0, \tag{7}$$

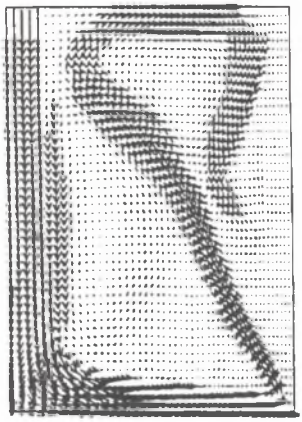
gdzie: ϕ - funkcja bazowa, g - przyspieszenie ziemskie,
otrzymuje się słabą formę (wyjściową do metody elementów skończonych) w postaci [8]:

$$\int_{\Omega} \phi \rho \dot{v} d\Omega + \int_{\Omega} \phi \nabla p d\Omega + \int_{\Omega} \eta \nabla \phi \bullet \nabla v d\Omega - \int_{\Gamma} \eta \phi \nabla v \bullet n d\Gamma = 0, \tag{8}$$

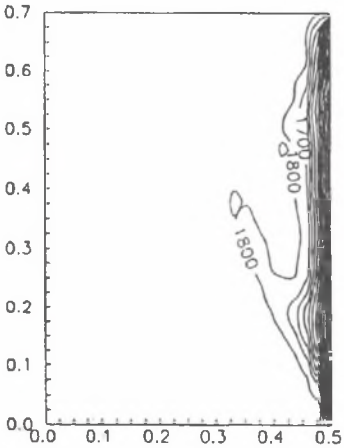
w której pominięto przyspieszenie ziemskie, gdyż rozważa się przepływ wymuszony. Powyższe równania wraz z równaniem przewodnictwa ciepła (1) tworzą zamknięty sprzężony układ równań opisujący laminarny przepływ cieczy. W zadaniu układ ten rozsprzęgnięto wyznaczając pole prędkości $v = v(x, t)$ z równań (7), a następnie z równań (3) wyznaczano pole temperatury $\Theta = \Theta(x, t)$. Równania przewodnictwa ciepła (3), bilans masy i równania Naviera-Stokesa (7) uzupełniono warunkami brzegowymi i początkowymi odpowiednimi dla modelu omawianego procesu. W pracy rozważano zalewanie przez pionową dyszę z jednym otworem wylotowym. Prędkość przepływu ciekłej stali przez dyszę (w_{in}) obliczano z równoważności przepływu masy przez powierzchnię wylotową dyszy i powierzchnię wlewka. Warunki brzegowe i początkowe dla równań opisujących omawiane zjawiska przedstawiono na rys.1. Warunek brzegowy wymiany ciepła przez obszar krystalizatora określano wzorem empirycznym na podstawie pracy [5].

4. PRZYKŁAD OBLICZENIOWY

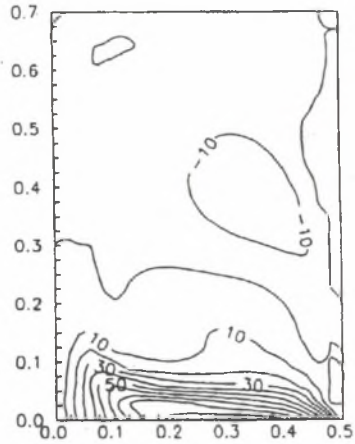
Obliczenia wykonano dla krystalizatora o wymiarach: 200x1000x7000. Przyjmując dwie różne prędkości przesuwu wlewka w_o = 10 i 20 [mm/s] obliczano prędkość w_{in} i badano jej wpływ na pole prędkości w fazie ciekłej oraz na pole temperatury i narastanie fazy stałej w obrębie krystalizatora (tworzenie się naskórka). Na podstawie uzyskanych wyników procesu narastania fazy stałej w krystalizatorze dokonano porównania kinetyk krzepnięcia dla różnych prędkości odlewania i różnych warunków początkowych (temperatura zalewania). Uwzględniono w ten sposób także wpływ temperatury zalewania ciekłego metalu na wielkość i szybkość narastania fazy stałej w analizowanym krystalizatorze. Informacje o szybkości narastania fazy stałej pozwalają oszacować rodzaj struktury odlewanej stali.



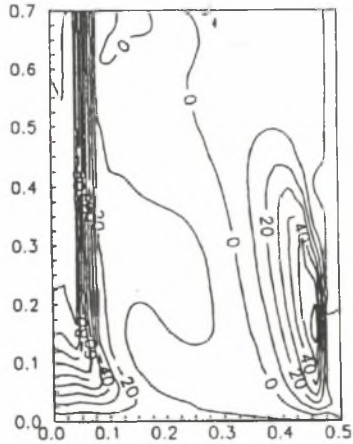
Rys.2. Pole prędkości po ustaleniu się procesu odlewania dla w_o = 20 mm/s
Fig.2. Velocity field in the steady state for w_o = 20 mm/s



Rys. 3. Pole temperatury po ustaleniu się procesu odlewania dla w_o = 20 mm/s
Fig. 3. Temperature field in steady state for w_o = 20 mm/s



Rys.4. Składowe prędkości *(u)* po czasie 30s dla w_o = mm/s
Fig.4. Velocity component *(u)* after 30 s for w_o = 10 mm/s



Rys.5. Składowe prędkości *(w)* po czasie 30s dla w_o = 10 mm/s
Fig.5. Velocity component *(w)* after 30 s for w_o = 10 mm/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, Vol. 17, 1994, pp. 89-99.

[2] Bokota A., Parkitny R.: Elastic-plastic states in solidifying casting. Arch. Mech. Vol. 43, 2-3, 1991, pp. 249-269.

[3] Bokota A., Sowa L.: Numeryczna symulacja krzepnięcia przepływającego metalu w kanale formy. Solidification of Metals and Alloys, Vol. 19, 1994, pp. 41-50.

[4] Chakraborty S., Sahai Y.: Effect of slag cover on heat loss and liquid steel flow in ladles before and during teeming to a continuous casting tundish. Metallurgical Transactions B, Vol. 36B, 1992, pp. 135-151.

[5] Choudhary S.K., Mazumdar D.: Mathematical modelling of transport phenomena in continuous casting of steel. ISIJ International, Vol. 34, Nr 7, 1994, ss. 584-592.

[6] Huang X., Thomas B.G., Najjar F.M.: Modeling superheat removal during continuous casting of steel slabs. Metallurgical Transactions B, Vol. 23B, 1992, pp. 339-356.

[7] Louhenkilpi S., Nieminen R.: Real-time simulation of heat transfer in continuous casting. Metallurgical Transactions B, Vol. 24B, 8, 1993, pp.685-693.

[8] Taylor C., Hood P.: A numerical solution of the Navier-Stokes equations using the finite element technique. Computer & Fluid, Vol. 1, 1973, pp. 73-100.

[9] Wyczółkowski S., Włodarczyk T.: Numerical modelling of the steatdy natural convection of liquid metal in enclosed space. Num. Meth. in Laminar and Turbulent Flow, ed. C. Taylor Pineridge Press, Swansea, 1993, pp.445-456.

Pracę wykonano w ramach Grantu KBN Nr 3 P404 014 05

Recenzent: prof. dr hab. inż. W. Nowacki

Wpłynęło do Redakcji w grudniu 1994 r.