

Marcin JANIK, Dariusz RYDZ

Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów  
Instytut Przeróbki Plastycznej i Inżynierii Bezpieczeństwa

## ANALIZA WPŁYWU UŻYCIA WYLEWU ZANURZENIOWEGO NA ROZKŁAD POLA TEMPERATUR I PRĘDKOŚCI WEWNĄTRZ WLEWKA CIĄGŁEGO

*Technologia ciągłego odlewania stali (COS) jest ostatnim etapem jej wytwarzania. W ostatnich latach stała się podstawową metodą wytwarzania wsadu do procesów przeróbki plastycznej. Nie mniej jednak częstym problemem przy wprowadzaniu nowych gatunków stali stanowi właściwy dobór parametrów ciągłego odlewania, który zapewni uzyskanie półwyrobu bez wad wewnętrznych i powierzchniowych. W pracy przedstawiono wpływ odlewania strumieniem nieosłoniętym oraz z zastosowaniem wylewu zanurzeniowego na rozkład temperatur wewnątrz i na powierzchni wlewka ciągłego o przekroju 160x160 mm ze stali BSt500s, odlewane z użyciem mieszadła elektromagnetycznego. Określono również wpływ sposobu odlewania na grubość naskórka i pole prędkości wewnątrz fazy ciekłej. Do obliczeń wykorzystano własny model numeryczny procesu COS utworzony przy zastosowaniu komercyjnego oprogramowania ANSYS.*

*Słowa kluczowe:* ciągle odlewanie, wylew zanurzeniowy, modelowanie numeryczne, metoda elementów skończonych, wlewki ciągłe

## ANALYSIS OF INFLUENCE OF IMMERSION NOZZLE ON THE DISTRIBUTION OF TEMPERATURE FIELD AND SPEED INSIDE A CONTINUOUS BILLET

*Continuous casting technology (CCS) is the last stage of steel production. In recent years, has become the primary method of producing ingots for plastic forming processes. Nevertheless, a common problem with new grades of steel is an appropriate choice of parameters of continuous casting, which ensures billets without surface and internal defects. The paper presented the influence of pouring a liquid steel stream with and without using an immersion nozzle on the distribution of temperatures inside and on the surface of the continuous billet BSt500S. The presented work concerning square billet 160x160 mm with an electromagnetic stirring. In article also was determined the effect of casting method for shell thickness and velocity field inside the liquid phase. For the calculation of the numerical model of CCS, the commercial software ANSYS was used.*

*Key words:* Continuous casting, immersion nozzle, numerical modeling, finite element method, continuous billet

### 1. WPROWADZENIE

Obecnie wsad do przeróbki plastycznej najczęściej wytwarzany jest metodą ciągłego odlewania stali [1–3]. Do zalet tej metody wytwarzania wsadu do walcowania należą: niskie koszty produkcji stali, wysoka jakość otrzymywanego wyrobu, powtarzalność jego parametrów oraz mniejszy niż w innych metodach negatywny wpływ na środowisko naturalne.

Odlewanie można prowadzić strumieniem nieosłoniętym lub za pomocą wylewu zanurzeniowego. W pierwszym przypadku strumień ciekłej stali zasilającej krystalizator ma kontakt z atmosferą, co może być przyczyną wtórnego utleniania stali i absorpcji azotu z powietrza. W drugim przypadku ciekły metal jest chroniony ściankami wylewu, jednak może dochodzić do jego stopniowego zarastania lub erozji materiałów ceramicznych, a co za tym idzie zmiany przekroju czynnego wylewu.

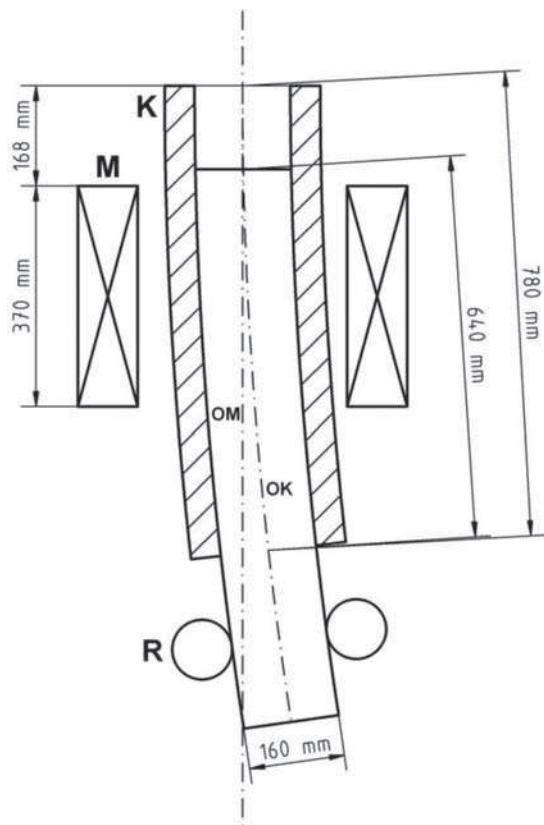
### 2. MODEL NUMERYCZNY PROCESU COS

Do obliczeń zastosowano własny model matematyczny ciągłego odlewania stali z mieszaniem elektromagnetycznym. Model opiera się na numerycznym rozwiązaniu układu następujących równań różniczkowych cząstkowych [4, 5]:

- równanie ciągłości przepływu dla cieczy nieściśnialnej,
- równania Naviera-Stokesa,
- równanie przepływu ciepła,
- równania modelu turbulencji  $k-\epsilon$ ,
- równania Maxwella,
- równanie określające siłę Lorentza.

Do obliczeń wykorzystano bazujące na metodzie elementów skończonych oprogramowanie ANSYS.

Do badań numerycznych przyjęto, że proces ciągłego odlewania stali prowadzony jest na urządzeniu typu łukowego, z krystalizatorem wyposażonym w mieszadło elektromagnetyczne. Na rysunku 1 przedstawiono



Rys. 1. Widok obszaru krystalizatora i mieszanicy elektromagnetycznej

Fig. 1. View of the mould and electromagnetic stirrer

Tabela 1. Wybrane parametry procesu

Table 1. Selected parameters of the process

Parametr	Wartość
Promień urządzenia COS	7000 mm
Przekrój odlewanej wlewką	160 × 160 mm
Natężenie prądu zasilającego mieszanicy elektromagnetycznej	300 A
Częstotliwość prądu zasilającego mieszanicy	5 Hz
Średnica nieosłoniętej strugi metalu zasilającej krystalizator	17 mm
Średnica osłoniętej strugi metalu zasilającej krystalizator	30 mm
Temperatura stali w kadzi pośredniej	1549 °C
Prędkość odlewania	2 m/min
Natężenie przepływu wody chłodzącej w strefie 1	1450 l/min
Natężenie przepływu wody chłodzącej w strefie 2	230 l/min
Natężenie przepływu wody chłodzącej w strefie 3	77 l/min

Tabela 2. Skład chemiczny stali BSt500S dla wybranych wlewków

Table 2. Chemical composition for selected billets BSt500S

Gatunek stali	Numer wytopu	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Mo	Sn	N
BSt500s	19011	0,16	0,7	0,2	0,021	0,045	0,09	0,09	0,34	0,003	0,016	0,024	0,010
	19021	0,16	0,73	0,21	0,023	0,04	0,06	0,08	0,28	0,003	0,014	0,022	0,009
	Średnia	0,16	0,72	0,20	0,022	0,043	0,07	0,09	0,31	0,003	0,015	0,023	0,009

fragment urządzenia zawierający krystalizator i mieszanicy elektromagnetycznej, gdzie: OK – oś krystalizatora, OM – oś mieszanicy elektromagnetycznej, K – krystalizator, M – mieszanicy elektromagnetycznej, R – rolki prowadzące pasmo.

Na omawianym urządzeniu możliwe jest odlewanie stali przy użyciu wylewu zanurzeniowego (strumień osłonięty) lub strumieniem nieosłoniętym. Urządzenie posiada trzy strefy chłodzenia natryskowego o długościach 500, 2000 oraz 2500 mm. Podstawowe parametry procesu przedstawiono w tabeli 1.

Do badań przyjęto stal BSt500s, której skład chemiczny określono na podstawie wyników analizy chemicznej dokonanej dla losowo wybranych wytopów. W tabeli 2 przedstawiono skład chemiczny (w % masowych) dla 2 wytopów oraz obliczono wartości średnie.

Niezbędne do przeprowadzenia w pracy obliczeń numerycznych jest określenie temperatur likwidusu i solidusu, które w pracy wyznaczono z następujących zależności [6, 7]:

$$T_{lik} [^{\circ}\text{C}] = 1537 - 88(\%C) - 25(\%S) - 5(\%Cu) + - 8(\%Si) - 5(\%Mn) - 2(\%Mo) - 4(\%Ni) - 1,5(\%Cr) + - 18(\%Ti) - 2(\%V) - 30(\%P) \quad (1)$$

$$T_{sol} [^{\circ}\text{C}] = 1535 - 200(\%C) - 12,3(\%Si) + - 6,8(\%Mn) - 124,5(\%P) - 183,9(\%S) + - 4,3(\%Ni) - 1,4(\%Cr) - 4,1(\%Al) \quad (2)$$

Wyznaczona temperatura likwidusu wyniosła 1514 °C, a solidus 1485 °C. W tabeli 3 przedstawiono przyjęte wartości gęstości badanej stali [8] dla całego zakresu temperatur występujących podczas COS. Do wyznaczenia wartości pośrednich użyto interpolacji funkcją liniową.

Współczynnik przewodności cieplnej w funkcji temperatury przedstawiono w tabeli 4 [7]. Podobnie jak w tabeli 3, wartości pośrednie interpolowano funkcją liniową.

Ciepło właściwe jest funkcją temperatury i zostało opisane wzorem 3 [9–12]. Zastosowany dla fazy półciekłej opis ciepła właściwego uwzględnia utajone ciepło krzepnięcia, co umożliwia pominięcie w różniczkowym równaniu przewodzenia ciepła objętościowego źródła ciepła [10, 11]. Założono przy tym, że udział fazy ciekłej zmienia się w sposób liniowy pomiędzy temperaturami solidusu i likwidusu [13, 14]. Utajone ciepło krzepnięcia (dla czystego żelaza) wynosi 272 kJ/kg [13, 15]. Ciepło to wydziela się wewnątrz fazy półciekłej, podczas krzepnięcia. W tabeli 5 przedstawiono zastosowane wartości ciepła właściwego dla badanego gatunku stali [5].

$$\begin{aligned} C_w &= C_{sol} & T &\leq T_{sol} \\ C_w &= C_{sol} \frac{L}{T_{lik} - T_{sol}} & T_{sol} < T < T_{lik} \\ C_w &= C_{lik} & T &\geq T_{lik} \end{aligned} \quad (3)$$

gdzie:

- $C_w$  – ciepło właściwe,
- $C_{sol}$  – ciepło właściwe dla strefy stałej,
- $C_{lik}$  – ciepło właściwe dla strefy ciekłej,
- $L$  – utajone ciepło krzepnięcia.

Tabela 3. Gęstość badanej stali w różnych temperaturach

Table 3. Density as a function of temperature

Temperatura [°C]	Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]
30	7800
840	7740
$T_{sol}$	7420
$T_{lik}$	7040
1560	7008
powyżej $T_{lik}$	43

Tabela 4. Współczynnik przewodności cieplnej badanej stali w różnych temperaturach

Table 4. Thermal conductivity as a function of temperature

Temperatura [°C]	Przewodność cieplna [W/mK]
30	52
800	26
$T_{Sol}$	32

Tabela 5. Ciepło właściwe badanej stali w różnych temperaturach

Table 5. Specific heat as a function of temperature

Temperatura [°C]	Ciepło właściwe [J/kg·K]
poniżej 1485 (1758 K)	712
1485÷1514 (1758÷1787 K)	10091
powyżej 1514 (1787 K)	776

Przyjęte elektryczne właściwości fizyczne stali przedstawiono w tabeli 6 [17].

Tabela 6. Właściwości elektryczne użyte w modelu numerycznym

Table 6. Electrical properties used in the numerical model

Przewodność elektryczna ciekłej stali [1/Ωm]	Względna przenikalność magnetyczna [-]			
	ciekłej stali	miedzi	wody	magneto-wodu
$7,14 \cdot 10^5$	1	1	1	1000

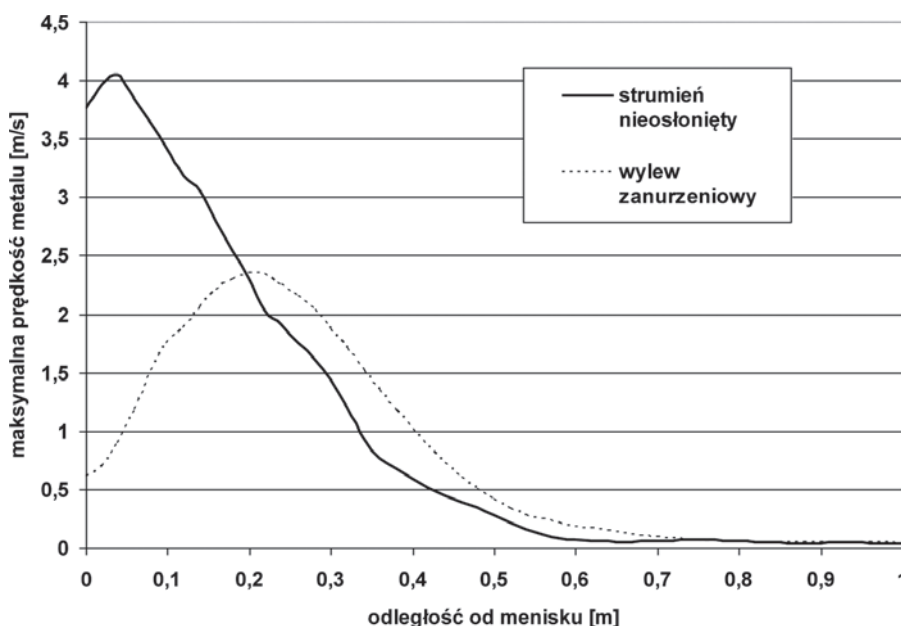
### 3. WYNIKI OBLICZEŃ I ICH ANALIZA

Na rys. 2 przedstawiono wpływ sposobu odlewania na maksymalną prędkość metalu w ciekłym rdzeniu, dla kolejnych przekrojów poprzecznych usytuowanych co 2 cm wzdłuż osi odlewania.

W przypadku odlewania za pomocą wylewu zanurzeniowego prędkość początkowa ciekłej stali jest niska (około 0,6 m/s), następnie wzrasta wraz ze zbliżaniem się do punktu maksymalnej intensywności mieszania elektromagnetycznego (na głębokości 0,2 m od poziomu menisku). Poniżej głębokości 0,2 m, prędkość metalu ponownie spada, osiągając na głębokości około 0,7 m wartość poniżej 0,1 m/s.

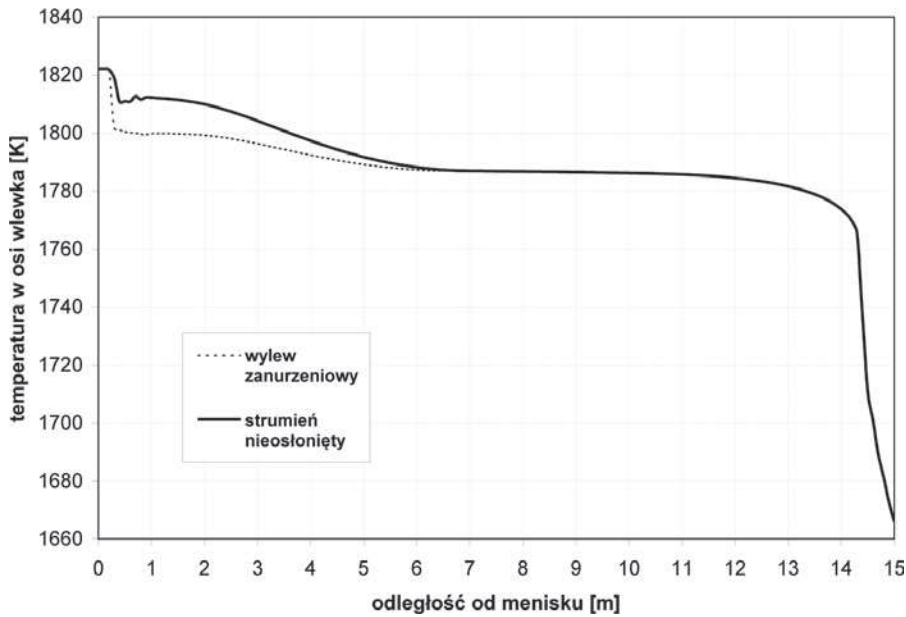
W przypadku przejścia na odlewanie strumieniem nieosłoniętym widoczny jest znaczny wzrost prędkości metalu na poziomie menisku. Jest to spowodowane mniejszą średnicą strugi zasilającej, a co za tym idzie wyższą prędkością zalewania metalu (prędkość zalewania w rozważanym modelu zależy od odwrotności kwadratu promienia otworu zalewowego). Poniżej głębokości 0,5 m, prędkość metalu systematycznie spada osiągając na głębokości 0,74 m taką samą wartość jak przy odlewaniu za pomocą wylewu zanurzeniowego. Wpływ mieszania elektromagnetycznego na maksymalną prędkość jest w tym przypadku niewielki, prędkość strugi zasilającej krystalizator jest wyższa niż ruchu metalu wytworzonego przez mieszadło elektromagnetyczne.

Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono wartości temperatur w osi i na powierzchni wlewką w funkcji odle-



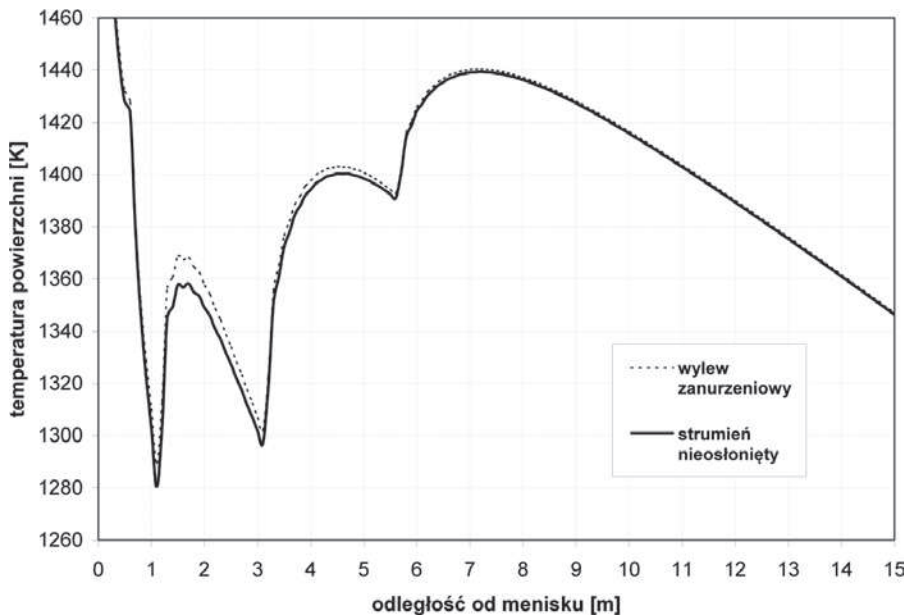
Rys. 2. Wpływ odlewania „strumieniem nieosłoniętym” / „wylewem zanurzeniowym” na maksymalną prędkość metalu wewnątrz fazy ciekłej, dla gatunku stali BSt500s

Fig. 2. Effect of casting ‘naked jet’ / ‘immersion nozzle’ at a maximum speed of the metal inside the liquid phase, for steel grade BSt500S



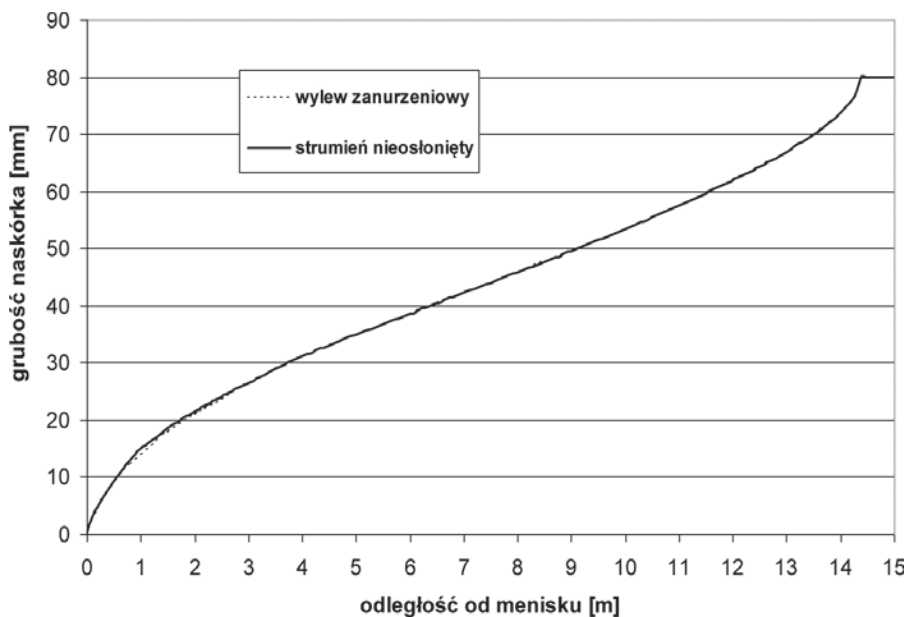
Rys. 3. Temperatura metalu w osi wlewka dla gatunku stali BSt500s w funkcji odległości od menisku i odlewania „strumieniem nieosłoniętym” / ”wylewem zanurzeniowym”

Fig. 3. The temperature of the metal in the ingot axis for BSt500S grade as a function of distance from the meniscus and the casting of ‘naked jet’ / ‘immersion nozzle’



Rys. 4. Temperatura na powierzchni wlewka dla gatunku stali BSt500S w funkcji odległości od menisku i odlewania „strumieniem nieosłoniętym” / ”wylewem zanurzeniowym”

Figure 4. Surface temperature for the type of steel ingot BSt500S in function of distance from the meniscus and casting ‘naked jet’ / ‘immersion nozzle’



Rys. 5. Grubość naskórka ściany wewnętrznej dla gatunku stali BSt500s w funkcji odległości od menisku i odlewania „strumieniem nieosłoniętym” / ”wylewem zanurzeniowym”

Fig. 5. The thickness of the epidermis to the inner wall of the steel grade BSt500S as a function of distance from the meniscus and the casting of ‘naked jet’ / ‘immersion nozzle’

głości od menisku. Użycie wylewu zanurzeniowego skutkuje niższą temperaturą w osi wlewka i wyższą na powierzchni wlewka. Wskazuje to, w przypadku użycia wylewu, na bardziej jednorodne pole temperatur wewnątrz strefy ciekłej. Spowodowane to może być bardziej wydajnym, mimo mniejszych prędkości maksymalnych, mieszaniem się stali wewnątrz ciekłego rdzenia i przewagą w tym przypadku ujednorodniającego ruchu obrotowego stali pochodzącego od mieszadła elektromagnetycznego nad składową prędkość pochodzącą od strugi zasilającej krystalizator.

Na rysunku 5 przedstawiono wartości grubości naskórka w funkcji odległości od menisku. Widoczny jest brak wyraźnego wpływu użycia wylewu zanurzeniowego na grubość zakrzepniętego naskórka (różnice w grubości nie przekraczają 1 mm), a co za tym idzie, nie zmienia się w sposób istotny długość metalurgiczna.

#### 4. WNIOSKI

W pracy dokonano analizy wpływu użycia wylewu zanurzeniowego na proces ciągłego odlewania stali z mieszaniem elektromagnetycznym. Na podstawie przeprowadzonych symulacji numerycznych można stwierdzić, że w rozpatrywanej konfiguracji parametrów odlewania, użycie wylewu zanurzeniowego powoduje:

- zmniejszenie maksymalnej prędkości metalu wewnątrz ciekłej fazy,
- spadek temperatury stali w osi wlewka i wzrost temperatury na jego powierzchni,
- bardziej wydajne mieszanie się stali w obszarze krystalizatora,
- bardziej jednorodne pole temperatur wewnątrz strefy ciekłej,
- znikomy wpływ na grubość naskórka i długość metalurgiczną.

#### LITERATURA

1. Brimacombe J.K., Samarasekera I.V., Lait J.E.: Continuous casting, Heat flow, Solidification and Crack formation. Iron and Steel Society, 1984
2. Derda W.: Ciągłe odlewanie stali – zaawansowana technologia XXI wieku. Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference „Iron and Steelmaking”, Szczyrk, (Polska), t. II, s. 1-6, 2000.
3. Irving W.R.: Continuous casting of steel. The Institute of Materials: London 1993
4. Anagnostopoulos J., Bergeles G.: Three-dimensional modeling of the flow and the interface surface in a continuous casting mold model. Metallurgical And Materials Transactions B. Vol. 30B, December 1999
5. Janik M.: Wpływ parametrów technologicznych i mieszania elektromagnetycznego na proces krzepnięcia stalowego wlewka ciągłego. Praca doktorska, Czestochowa 2005
6. Santos C.A., Spim J.A., Garcia A.: Mathematical modeling and optimization strategies (genetic algorithm and knowledge base) applied to the continuous casting of steel. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 16, 511-527, Elsevier, 2003
7. Thomas B.G., Samasakera I.V., Brimacombe J.K.: Mathematical model of the thermal processing of steel ingots: part I. heat flow model. Metallurgical Transactions B, vol 18B, 1987
8. Mizukami H., Yamanaka A., Watanabe T.: Prediction of density of carbon steels. ISIJ International, vol. 42, no. 4, pp. 375-384, 2002
9. Ha J.S., Cho J.R., Lee B.Y., Ha M.Y.: Numerical analysis of secondary cooling and bulging in the continuous casting of slabs. Journal of Material Processing Technology, 113, 2001
10. Konishi J., Militzer M., Brimacombe J.K., Samasakera I.V.: Modeling the formation of longitudinal facial cracks during continuous casting of hypoperitectic steel. Metallurgical And Materials Transactions B. Vol. 33B, June 2002
11. Mochnecki B., Suchy J.: Modelowanie i symulacja krzepnięcia odlewów. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1993
12. Sharma D.G.R., Krishnan M., Ravindran C.: Determination of the rate of latent heat liberation in binary alloys. Materials Characterization 44, 309-320, Elsevier, 2000
13. Lan X.K., Khodadadi J.M.: Liquid steel flow, heat transfer and solidification in mold of continuous casters during grade transition. International Journal of Heat and Mass Transfer 44, Elsevier Science, 2001
14. Tieu A.K., Kim I.S.: Simulation of the continuous casting process by a mathematical model. International Journal of Mechanical Science, vol. 39, 1997
15. Santos C.A., Spim J.A., Garcia A.: Modeling of solidification in twin-roll strip casting. Journal of Material processing Technology, 102, 33 - 39, Elsevier 2000
16. Lan X.K., Khodadadi J.M.: Fluid flow, heat transfer and solidification in the mould of continuous casters during ladle change. International Journal of Heat and Mass Transfer 44, Elsevier Science, 2001
17. Li B., Okane T., Umeda T.: Modeling of biased flow phenomena associated with the effects of static magnetic-field application and argon gas injection in slab continuous casting of steel. Metallurgical And Materials Transactions B. Vol. 32B, December 2001