

Wojciech KAPTURKIEWICZ, Andriy BURBELKO

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Odlewnictwa

Zdzisław KUDLIŃSKI, Jacek PIEPRZYCA

Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii

MODELOWANIE KOMPUTEROWE KRZEPNIĘCIA PÓŁPRZEMYSŁOWEGO WLEWKA STACJONARNEGO Z WYKORZYSTANIEM OPROGRAMOWANIA PROCAST

Dla modelowania procesu krzepnięcia wlewka stacjonarnego wykorzystano oprogramowanie ProCAST, stosowane dotychczas w modelowaniu procesów ściśle odnoszących się do procesów odlewniczych. Przedmiotem modelowania był proces stygnięcia stacjonarnego wlewka o wymiarach 100×100×1100 mm we wlewnicy, od momentu rozpoczęcia zalewania metalu do zakończenia krzepnięcia, wraz z procesami tworzenia struktury, skurczu metalu i tworzenia jam skurczowych. Analiza porównawcza dla dwóch typów stali wskazuje na istotne różnice w polu temperatury i kinetyce wzrostu fazy zakrzepłej w trakcie procesu zalewania i krzepnięcia wlewków. Rezultaty modelowania wskazują na duże możliwości symulacji komputerowej dla odtworzenia procesu krzepnięcia wlewka, a przez to przeprowadzenia eksperymentów numerycznych dla optymalizacji technologii.

Słowa kluczowe: modelowanie komputerowe, krzepnięcie, wlewek stalowy, ProCAST

COMPUTER MODELLING OF SOLIDIFICATION OF SEMI-INDUSTRIAL SQUARE CROSS-SECTION INGOT USING PROCAST SOFTWARE

For modeling of stationary ingot solidification process ProCAST software was used. So far, this software has been used in processes related strictly to foundry processes. The subject of modeling was cooling of stationary square ingot of 100×100×1100 mm in the mould, from the beginning of pouring liquid metal until the end of solidification, along with the processes of metal structure formation, metal shrinkage and formation of shrinkage cavities. The comparative analysis for two types of steel shows significant differences in temperature field and kinetics of solidified phase growth while pouring and solidification of ingots. The results of modeling show great possibilities of computer simulation for reproduction of the real solidification process, and thus for conducting numerical experiments for optimization of technology.

Key words: computer modelling, solidification, steel ingot, ProCAST

1. WSTĘP

Od lat kilkunastu coraz większe znaczenie w przygotowaniu technologii ma możliwość numerycznego, komputerowego modelowania procesów odlewniczych, czyli ich odtworzenia w postaci wirtualnej. Spośród różnych metod modelowania – najpierw z wykorzystaniem analogów elektrycznych, hydraulicznych i metod numerycznych – tylko te ostatnie wytrzymały próbę czasu, przy czym ich rozwój i wykorzystanie zachodzi prawie równoległe z eksplozywnym rozwojem mocy obliczeniowych sprzętu komputerowego. Modelowanie komputerowe procesów z wykorzystaniem metod numerycznych najlepiej odzwierciedla złożoną fizykochemię i mechanikę procesów odlewniczych [1].

Należy podkreślić, że uzyskanie poprawnych wyników modelowania za pomocą programu komputerowego wymaga wprowadzenia tzw. warunków jednoznaczności, czyli wszystkich parametrów opisujących stan początkowy procesu (np. początkowy rozkład tempera-

tury w rozpatrywanym układzie), parametrów termofizycznych metalu i formy, warunków wymiany ciepła pomiędzy odlewem i poszczególnymi częściami formy, formą i otoczeniem itp. Wiarygodność przeprowadzonego modelowania zależy od wiarygodności tych warunków, co niestety w praktyce nie zawsze wykonane jest zadawalająco wskutek np. braku precyzyjnych praktycznych danych wyjściowych procesu lub danych termofizycznych z dostępnych źródeł literaturowych [2].

Prace w obszarze modelowania komputerowego procesu krzepnięcia wlewka sięgają wczesnych lat 70. XX wieku [3, 4] i prowadzone są, w odniesieniu do różnych zjawisk, występujących w czasie procesu kształtowania się wlewka, do obecnej chwili [5–14]. Brak jest pracy, która do modelowania procesu w stacjonarnym wlewkowi wykorzystywałaby profesjonalny program symulacji komputerowej. W niniejszej pracy wykorzystano oprogramowanie ProCAST, stosowane dotychczas w modelowaniu procesów ściśle odnoszących się do procesów odlewniczych.

2. OBIEKT MODELOWANIA I PARAMETRY PROCESU

Przedmiotem modelowania był proces stygnięcia stacjonarnego wlewka metalowego o wymiarach 100×100×1100 mm we wlewnicy, od momentu rozpoczęcia zalewania do zakończenia krzepnięcia, wraz z procesem tworzenia struktury, skurczu metalu i tworzenia jam skurczowych. Fotografiją i schemat poprzecznego przekroju stacjonarnej doświadczalnej wlewnicy pokazano na rys. 1.

Celem modelowania było odtworzenie procesu zalewania, stygnięcia metalu i jego krystalizacji dla dwóch gatunków stali według tablicy 1.

Dla przeprowadzenia modelowania wykorzystano pakiet oprogramowania ProCAST v. 2008 i 2009. Parametry termofizyczne wyznaczono dla składu chemicznego stali według tablicy 1, wykorzystując bazę danych oprogramowania ProCAST. Określono temperatury

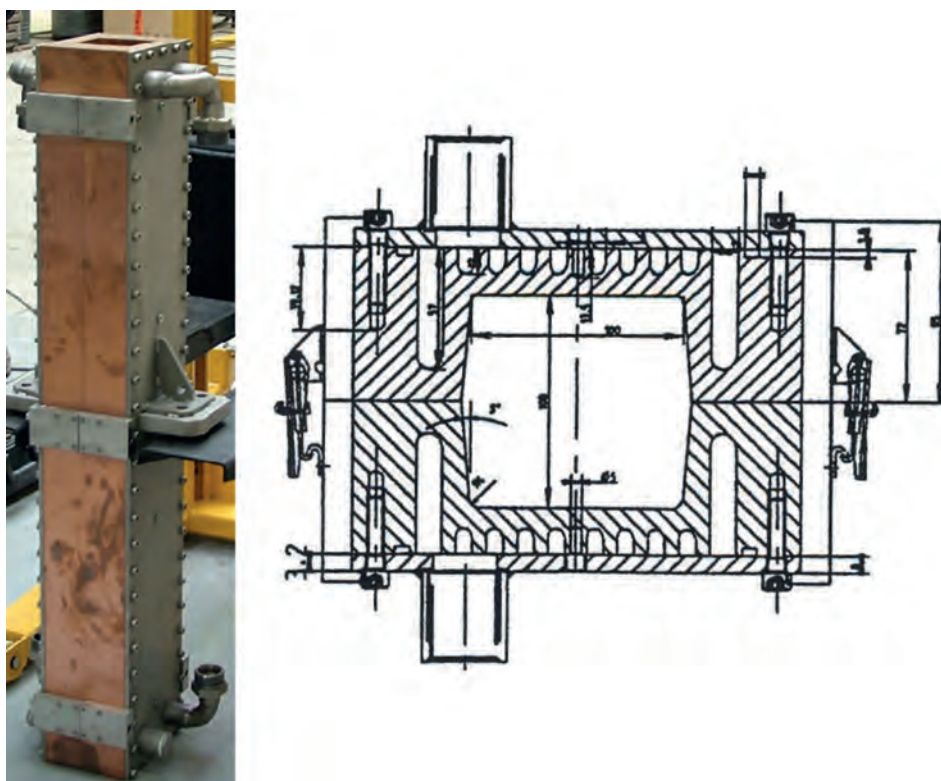
likwidus i solidus (tablica 2), umieszczając w tej tablicy założone początkowe temperatury metalu (to samo przegrzanie: 20 K) oraz czas zalewania.

Wartości poszczególnych parametrów dla obu stali, takich jak: temperatury likwidus i solidus (tablica 2), jak również gęstość, współczynnik przewodzenia ciepła i entalpia w zależności od temperatury (rys. 2–4) wykazują wyraźne zróżnicowanie.

3. REZULTATY MODELOWANIA

3.1. KINETYKA ZALEWANIA, KRZEPNIĘCIA I POLE TEMPERATURY WLEWKA

Obraz zalewania wraz z rozkładem temperatury pokazano na rys. 5 i 6 dla około 30 i 100% wypełnienia wlewnicy. Wyniki wskazują, że przy tym samym wypełnieniu występują wyraźne różnice w polu temperatury dla obu gatunków stali.



Rys. 1. Fotografia i przekrój poprzeczny doświadczalnej wlewnicy stacjonarnej

Fig. 1. Photograph and cross section of experimental ingot mold

Tablica 1. Skład chemiczny stali do modelowania

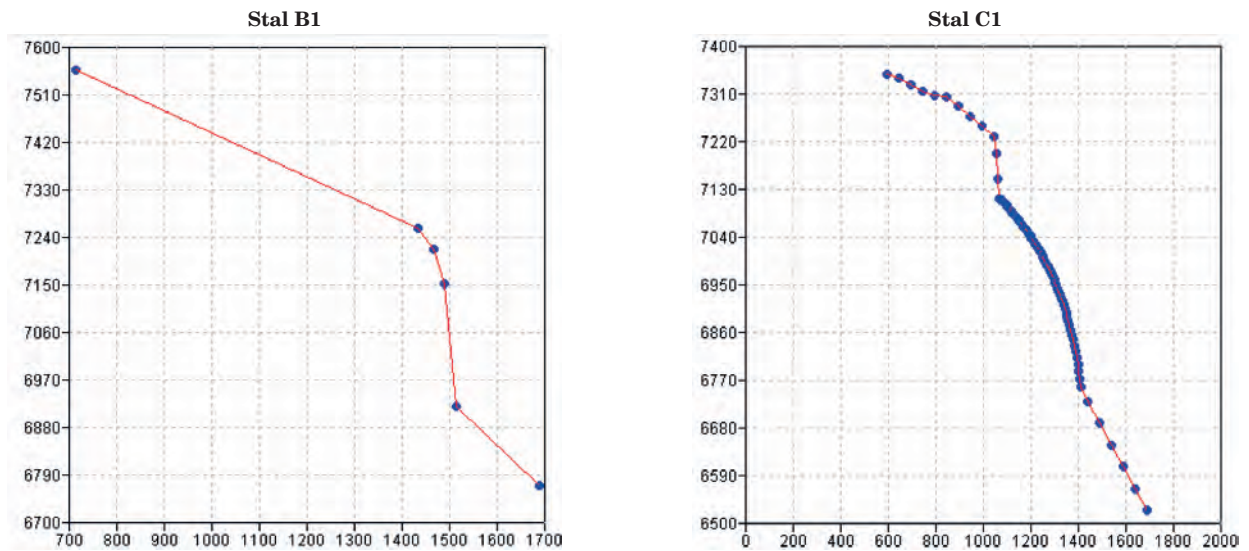
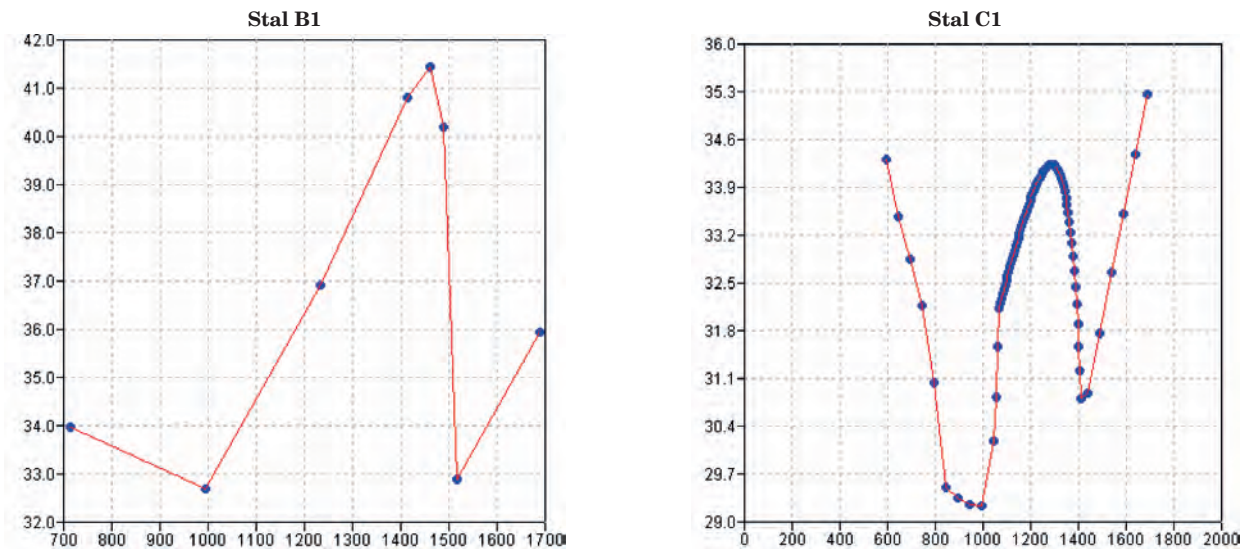
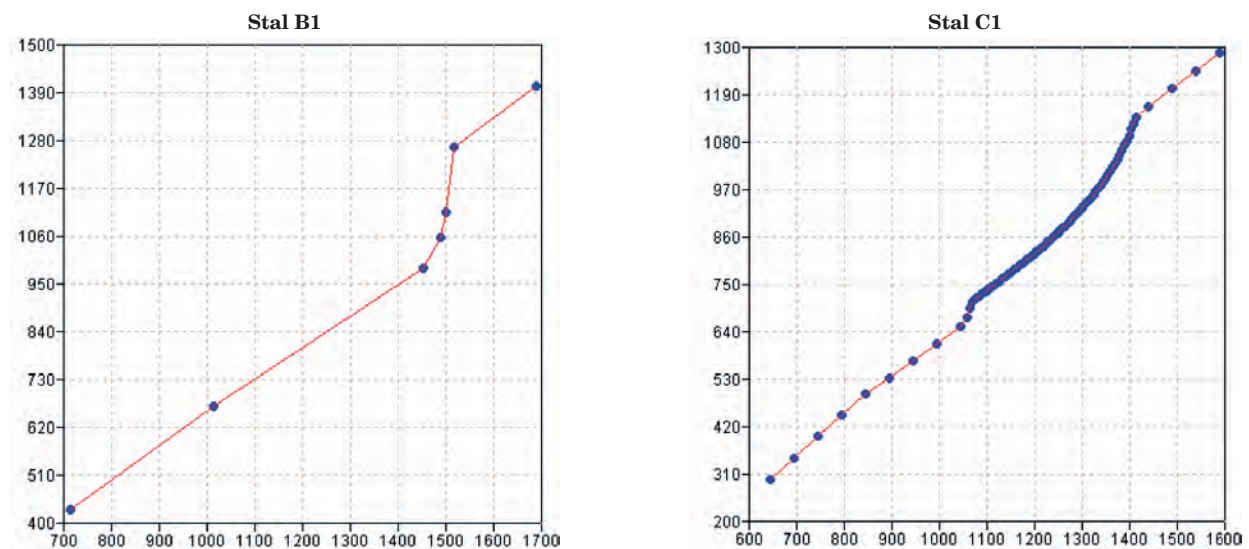
Table 1. Chemical composition of steel for modelling

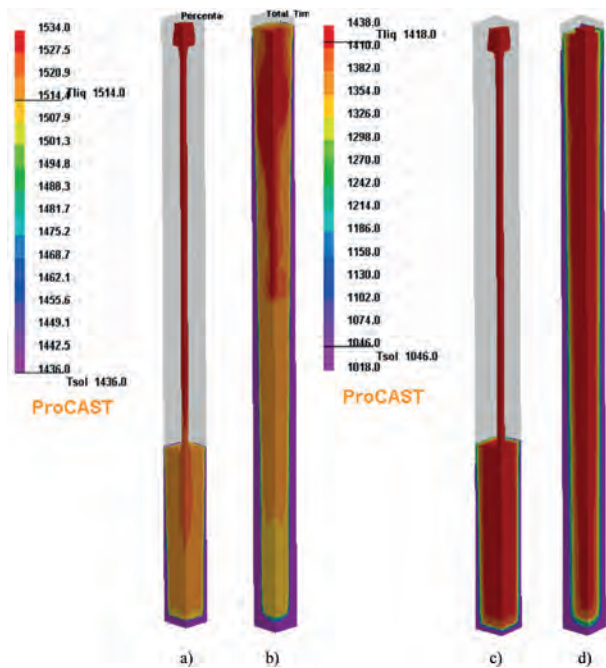
Ozn. stali	% masowe													
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Co	V	Nb	Ti	Al	Cu
B1	0,10	1,55	0,41	0,011	0,011	0,32	0,22	<0,01	<0,05	<0,005	<0,01	0,13	0,045	0,22
C1	0,84	2,10	1,74	0,008	0,011	0,017	0,02	0,36	1,54	0,094	<0,01	0,002	0,036	0,018

Tablica 2. Temperatury likwidus, solidus i temperatura początkowa badanych stali

Table 2. Liquidus, solidus and initial temperature for subject steels

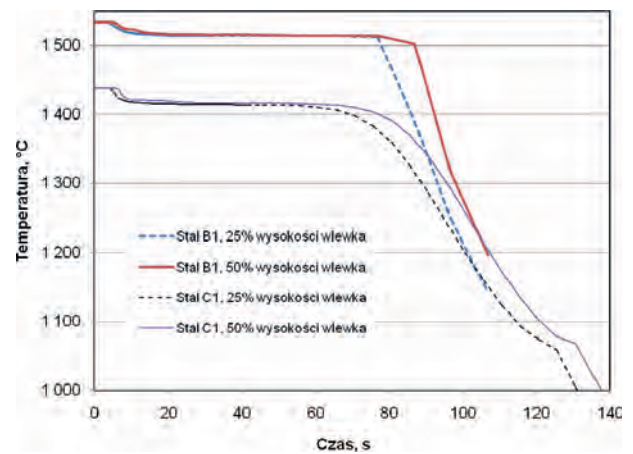
Stal	Likwidus, °C	Solidus, °C	Temp. początkowa, °C	Czas zalewania, s
B1	1514	1418	1534	20
C1	1418	1046	1438	30

Rys. 2. Zależność gęstości stali B1 i C1 (kg/m^3) od temperatury ($^{\circ}\text{C}$)Fig. 2. Relationship between density (kg/m^3) and temperature ($^{\circ}\text{C}$) for steel B1 and C1Rys. 3. Zależność współczynnika przewodzenia ciepła badanych stali ($\text{W/m}^2\cdot\text{K}$) stali od temperatury ($^{\circ}\text{C}$)Fig. 3. Relationship between thermal conductivity of examined steels ($\text{W/m}^2\cdot\text{K}$) and temperature ($^{\circ}\text{C}$)Rys. 4. Zależność entalpii badanych stali (kJ/kg) od temperatury ($^{\circ}\text{C}$)Fig. 4. Relationship between enthalpy (kJ/kg) and temperature ($^{\circ}\text{C}$) for examined steels



Rys. 5. Kształt fazy ciekłej i pole temperatury dla dwóch etapów zalewania; a) stal B1, czas 6,1 s, wypełnienie 29,5%; b) stal B1, czas 20,8 s, wypełnienie 100 %; c) stal C1, czas 9,2 s, wypełnienie 30,1%; d) stal C1, czas 30,4 s, wypełnienie 100%

Fig. 5. Shape of liquid phase and thermal field for two stages of pouring; a) steel B1, time 6.1 s, filling 29.5%; b) steel B1, time 20.8 s, filling 100 %; c) steel C1, time 9.2 s, filling 30.1%; d) steel C1, time 30.4 s, filling 100%

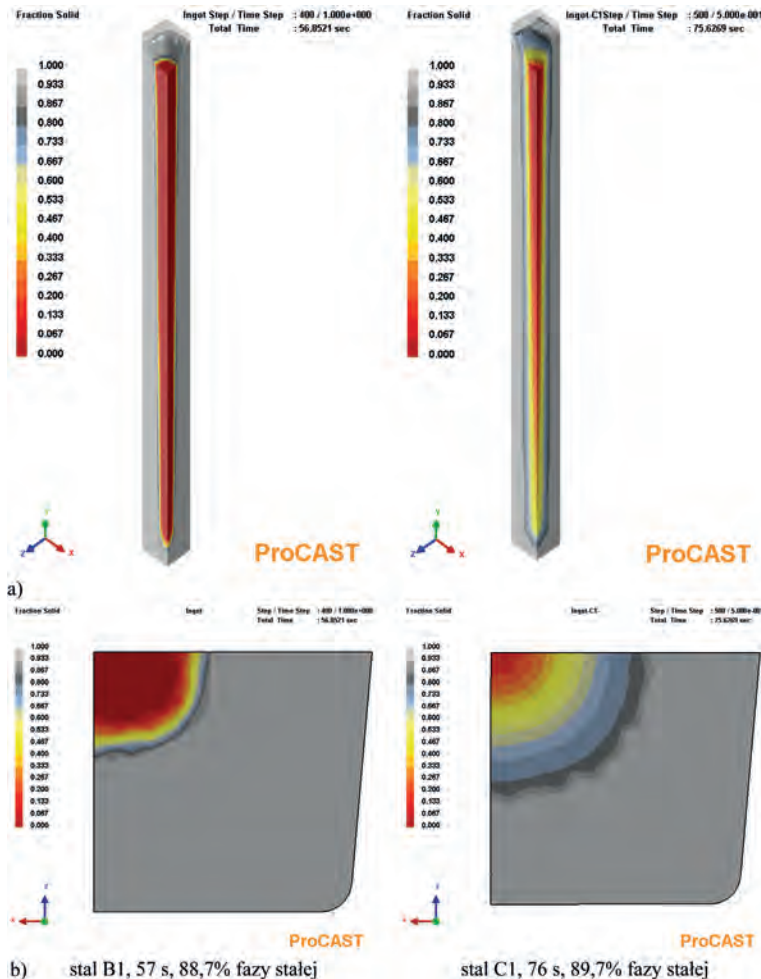


Rys. 6. Temperatury dla stali B1 i C1 w środku wlewka w połowie i w $\frac{1}{4}$ jego wysokości od dolnej powierzchni

Fig. 6. Temperature for steel B1 and C1 at middle of ingot and at $\frac{1}{4}$ of distance from bottom surface

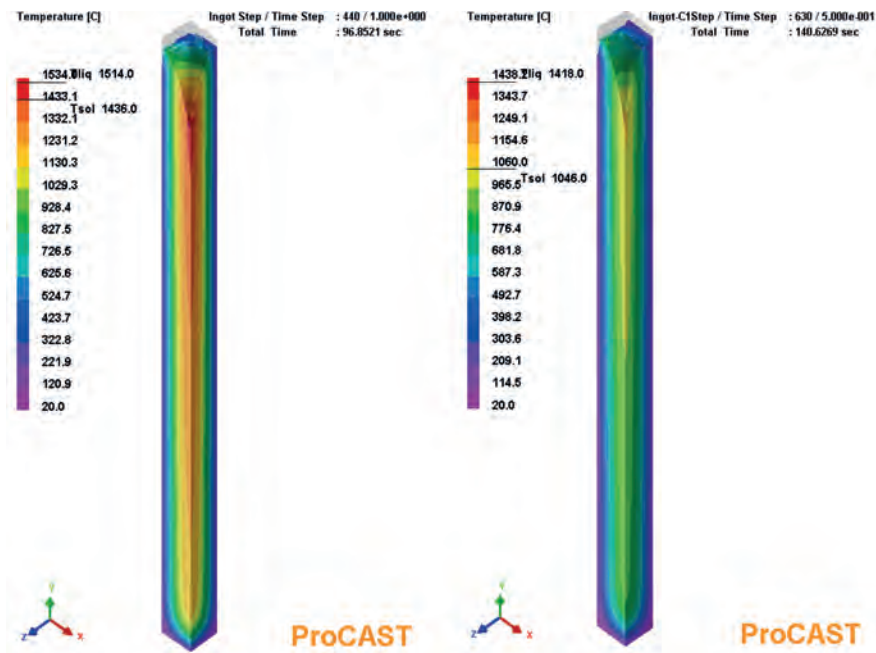
Różnice w kinetyce procesu widoczne są również na wykresach temperatury dla dwóch punktów w środku wlewka: w połowie i w $\frac{1}{4}$ jego wysokości od dolnej powierzchni (rys. 6). Różnice pomiędzy temperaturą w połowie i $\frac{1}{4}$ wysokości wskazują na wpływ odprowadzenia ciepła przez dolną powierzchnię wlewka.

Na rys. 7 widoczne są różnice w rozkładzie ilości fazy zakrzepłej pod koniec krzepnięcia (szerokości strefy

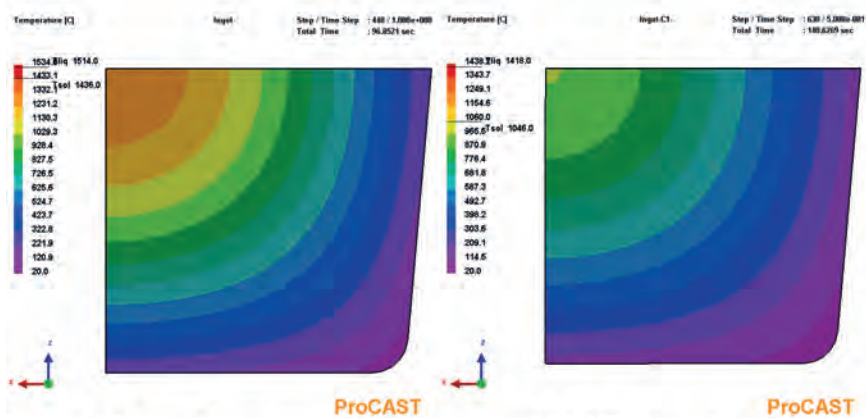


Rys. 7. Rozkład ilości fazy zakrzepłej pod koniec krzepnięcia w pionowym (a) i poziomym przekroju (b) w połowie wysokości wlewka

Fig. 7. Distribution of solid fraction at the end of solidification in vertical (a) and cross section (b) at a half of the ingot height



a)

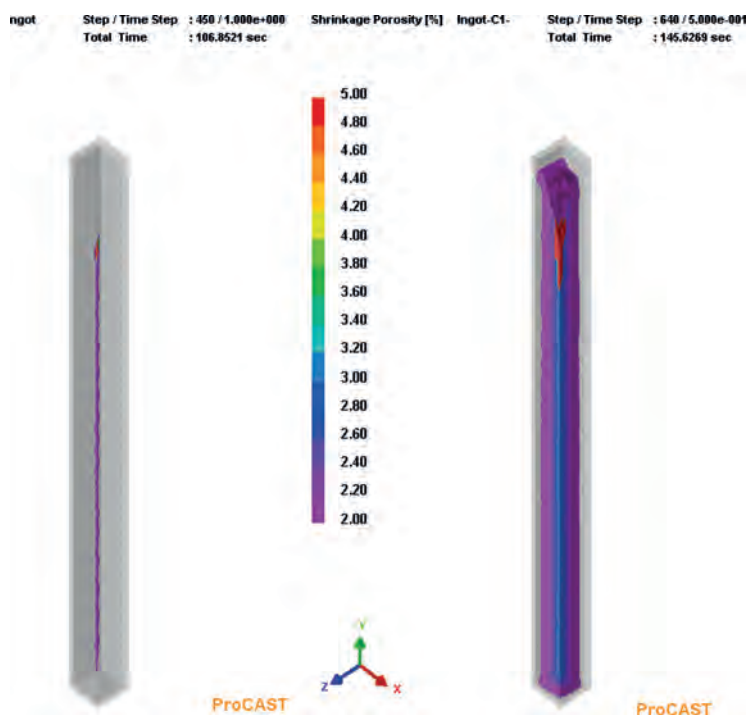


b) stal B1, 97 s, koniec krzepnięcia

stal C1, 141 s, koniec krzepnięcia

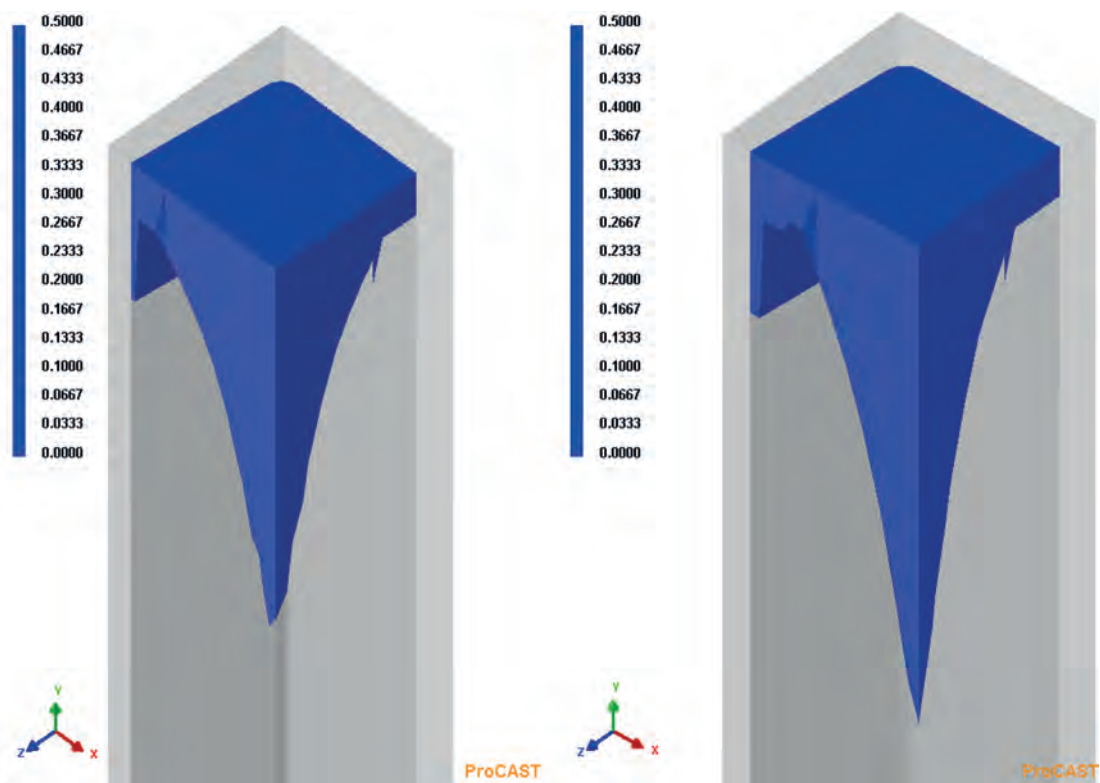
Rys. 8. Pole temperatury we wlewkach w momencie końca krzepnięcia w pionowym (a) i poziomym (b) przekroju w połowie wysokości wlewka

Fig. 8. Thermal field in ingots at the end of solidification in vertical (a) and cross section (b) at a half of the ingot height



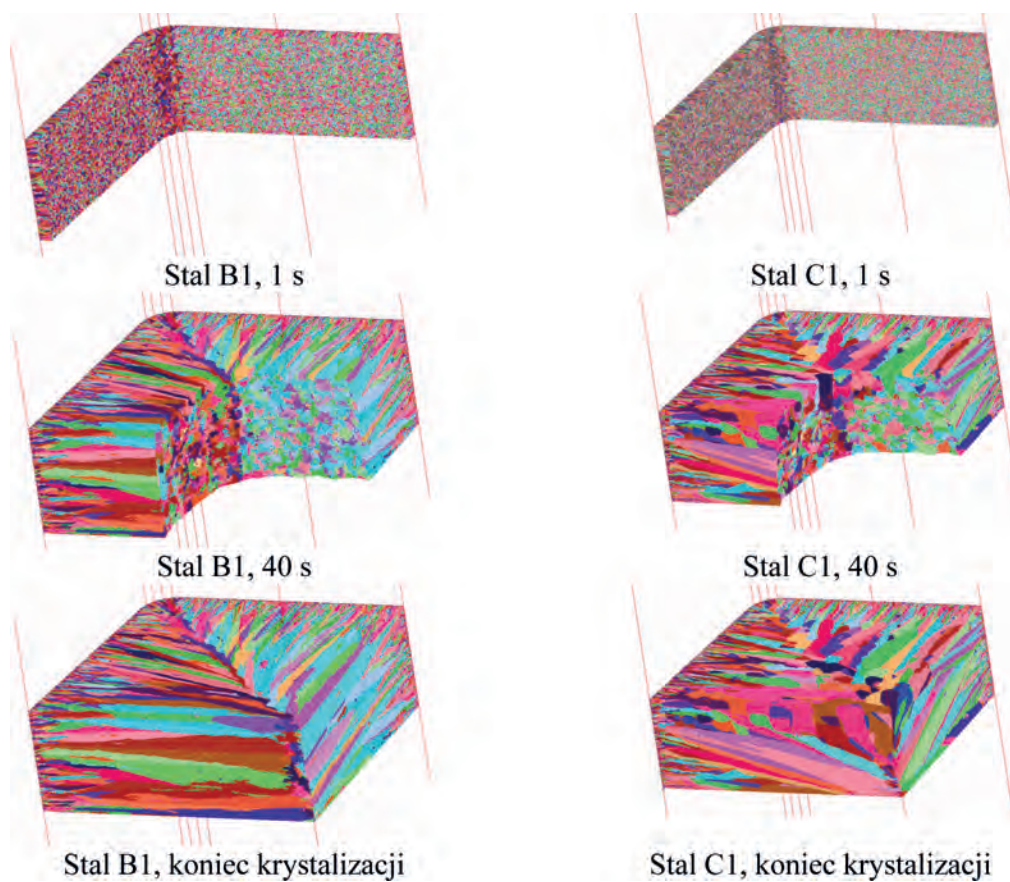
Rys. 9. Rozkład porowatości skurczowej we wlewkach po zakończeniu krzepnięcia dla stali B1 (po lewej) i C1 (po prawej)

Fig. 9. Shrinkage cavity at the end of solidification in steel B1 (left) and C1 (right).



Rys. 10. Kształt jamy skurczowej po zakrzepnięciu wlewka dla stali B1 i C1

Fig. 10. Shape of shrinkage cavity after solidification for B1 and C1 steel



Rys. 11. Wybrane etapy tworzenia się mikrostruktury dla czasów 1 s, 40 s i dla końca krzepnięcia, odpowiednio dla stali B1 (lewa strona) i stali C1 (prawa strona)

Fig. 11. Selected stages of microstructure formation for time 1 s, 40 s and for the end of solidification for steel B1 (left) and C1 (right side)

dwufazowej przy zakrzepnięciu ok. 89% metalu) oraz w polu temperatury w momencie końca krzepnięcia – rys. 8.

3.2. POROWATOŚĆ I JAMA SKURCZOWA

Różny przebieg krzepnięcia skutkuje różnicami w końcowej porowatości skurczowej wlewka (rys. 9). Dla obydwóch stali porowatość koncentruje się w środku wlewka, jednak dla stali C1 obliczone wartości porowatości są wyraźnie większe, co jest spowodowane przede wszystkim większą grubością warstwy ciekło-stałej w czasie krzepnięcia (rys. 7).

Niekorzystnym efektem procesów skurczowych jest jama skurczowa o podobnym kształcie dla obu gatunków stali, lecz o większej objętości dla stali C1 (rys. 10).

3.3. MODELOWANIE MIKROSTRUKTURY

Wykorzystując modul CAFE (Cellular Automaton + Finite Elements) przeprowadzono modelowanie tworzenia się mikrostruktury w kolejnych etapach procesu. Na rys. 11 pokazano rezultaty dla wybranych momentów procesu – po 1, po 40 sekundzie i w momencie końca krzepnięcia dla stali B1 i C1. Pokazano wycinek wlewka w połowie jego wysokości. Dla obydwu gatunków stali obserwuje się tworzenie strefy drobnych kryształów zamrożonych, przechodzącej w strefę kryształów kolumnowych. Brak jest wyraźnego zróżnicowania pomiędzy obydwoma gatunkami stali; dla stali B1 struktura jest nieznacznie bardziej rozdrobniona, a kryształy kolumnowe mają bardziej równomierne geometrycznie kształt, z ukierunkowaniem do osi wlewka.

4. WNIOSKI

1. Analiza porównawcza wyników modelowania procesu zalewania i krzepnięcia dla dwóch typów stali B1 i C1 wskazuje na istotne różnice w polu temperatury i kinetyce wzrostu fazy zakrzepłej.
2. Różny przebieg krzepnięcia skutkuje różnicami w końcowej porowatości skurczowej wlewka. Dla obydwóch stali porowatość koncentruje się w środku wlewka, jednak dla stali C1 wartości porowatości są wyraźnie większe, co jest spowodowane przede wszystkim większą grubością strefy ciekło-stałej w czasie krzepnięcia.
3. Niekorzystnym efektem procesów skurczowych jest jama skurczowa, o podobnym kształcie dla obu gatunków stali, lecz większej objętości dla stali C1.
4. Rezultaty modelowania mikrostruktury wskazują, że brak jest wyraźnego zróżnicowania pomiędzy obydwoma gatunkami stali; dla stali B1 struktura jest nieznacznie bardziej rozdrobniona, a kryształy kolumnowe mają bardziej równomierny geometrycznie kształt, z ukierunkowaniem do osi wlewka.
5. Rezultaty modelowania wskazują na duże możliwości symulacji komputerowej odtworzenia procesu krzepnięcia wlewka, a przez to przeprowadzenia eksperymentów numerycznych dla optymalizacji technologii.

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. Kapturkiewicz W., Fraś E., Burbelko A.A.: Dlaczego modelowanie komputerowe jest w odlewnictwie potrzebne? Przegląd Odlewnictwa, t. 55. 2005, nr 1, s. 15.
2. Kapturkiewicz W.: Eksperyment numeryczny jako metoda wyjaśnienia mechanizmu procesu. Mechanika, nr 253/99, z. 59, Zesz. Nauk., Politechnika Opolska, 1999, s. 181.
3. Flemings M.C.: Solidification Processing, McGraw-Hill, New York TMS, NY, 1974.
4. Kapturkiewicz W.: Analiza przepływu ciepła w układzie wlewk – wlewnica płaska z punktu widzenia czasu krzepnięcia wlewka i pola temperatur w przekroju ścianki wlewnicy. Prace Komisji Metal. Odlewn. PAN, Metalurgia 21, Kraków 1974, s. 51.
5. Thomas, B.G., Samarasekera, I.V., Brimacombe, J.K.: Mathematical model of the thermal processing of steel ingots: Part I. Heat flow model Metallurgical Transactions B, 18 March 1987, s. 119, Part II: Stress Model, s. 131.
6. Gu J.P., Beckermann C.: Simulation of convection and macrosegregation in a large steel ingot. Metall. Mater. Trans. A, 1999, Vol. 30A, s. 1357.
7. Lesoult G.: Macroseggregation in steel strands and ingots: Characterisation, formation and consequences. Materials Science and Engineering: A Volumes 413–414, 15 December 2005, s. 19.
8. Radovic Z., Lalovic M.: Numerical simulation of steel ingot solidification process. Journal of Materials Processing Technology, Volume 160, Issue 2, 20 March 2005, s. 156.
9. Combeau H., Založnik, M., Hans S., Richy P.E.: Prediction of macrosegregation in steel ingots: Influence of the motion and the morphology of equiaxed grains. Metall. Mater. Trans. B, 2009, Vol. 40, Nr 3, s. 289.
10. Bellet M., Cerri O., Bobadilla M., Chastel Y.: Modeling hot tearing during solidification of steels: Assessment and improvement of macroscopic criteria through the analysis of two experimental tests. Metall. Mater. Trans. A, 2009, Vol. 40, Nr 11, s. 2705.
11. Kumar A., Založnik M., Combeau H.: Prediction of equiaxed grain structure and macrosegregation in an industrial steel ingot: comparison with experiment. Int J Adv Eng Sci Appl Math, December 2010, Vol. 2, Nr 4, s.140.
12. Li W. S., Shen H. F.: Three-dimensional simulation of thermosolutal convection and macrosegregation in steel ingots. Steel Research International, 2010, Vol. 81, Nr 11, s. 994.
13. Liu B. Xu, Q., Jing T., Shen H., Han Z.: Advances in multi-scale modeling of solidification and casting processes JOM, 2011, Vol. 63, Nr 4, s.19.
14. Wang L., Shi W.: Numerical simulation of macrosegregation during steel ingot solidification using continuum model. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 2011, Vol.16, Nr 2, s. 145.