

# ASPECTS REGARDING SIMULATION WITH CYLINDRICAL COORDINATES OF SOLIDIFICATION CASTING

# ASPECTE PRIVIND SIMULAREA ÎN COORDONATE CILINDRICE A SOLIDIFICĂRII PIESELOR TURNATE

Maria STOICĂNESCU, Ionuț IONESCU, Ioan CIOBANU, Ion Sorin MUNTEANU

Transilvania University of Brasov, Romania

**Abstract.** Specialized software for solidification simulation of casting with rotational symmetry was conducted at the Transilvania University of Brasov. It is based on a 2D finite difference mathematical model with cylindrical coordinates. The software in cylindrical coordinates has the advantage that it simulates volume solidification of parts with rotational symmetry through 2D. This simulation provides a considerable reduction in the simulation duration. Depending on the part configuration and the network dividing step, the simulation time can be reduced by tens or hundreds of times. Another advantage of software in cylindrical coordinates is the simpler dividing of the system in finite elements. Also, it do accurate the representation of the contour for parts with rotational symmetry.

**Key words:** casting, solidification simulation, hot spot, mathematical modeling

## 1. Introduction

At Transilvania University of Brasov were made two software modules to simulate the casting solidification. One for parts cast of alloys that solidify at constant temperature and another for parts cast of alloys that solidify in temperature in the range [1, 2]. These are based on 3D mathematical models in cartesian coordinates. Recently, a software module, specialized to simulate the solidification of casting with rotational symmetry was developed. The particularity of this software lies in that it is based on a 2D mathematical model in cylindrical coordinates [3, 4]. The software in cylindrical coordinates has the advantage that it simulates the solidification in the volume of parts with rotational symmetry through 2D simulation. The 2D simulation provides a considerable reduction in the simulation duration. Depending on the configuration and dimensions of the part and of the network step (in which system casting – mold is divided) the length of the simulation can be reduced by tens or hundreds of times. Another advantage of software in cylindrical coordinates consists of describing more accurate the contour of parts with rotational symmetry.

The software operation and the accuracy of the results obtained using this software were verified by three methods:

**Rezumat.** La Universitatea Transilvania din Braşov a fost realizat un soft specializat pentru simularea solidificării pieselor turnate cu simetrie de rotație. Acesta este bazat pe un model matematic 2D cu diferențe finite cu coordonate cilindrice. Softul în coordonate cilindrice prezintă avantajul că simulează solidificarea în volum a pieselor cu simetrie de rotație, prin simulare 2D. Simularea 2D asigură o reducere considerabilă a duratei de simulare. În funcție de configurația și dimensiunile piesei și de pasul rețelei de divizare a sistemului piesă turnată - formă, durata simulării se poate reduce de zeci sau sute de ori. Un alt avantaj al softurilor care utilizează coordonate cilindrice constă în divizarea mai simplă a sistemului în elemente finite. În plus este redat mai precis conturul pieselor cu simetrie de rotație.

**Cuvinte cheie:** piesă turnată, simularea solidificării, nod termic, modelare matematică

## 1. Introducere

La Universitatea Transilvania din Brasov au fost realizate două module de soft pentru simularea solidificării pieselor turnate. Unul pentru piese turnate din aliaje cu solidificare la temperatură constantă și altul pentru piese turnate din aliaje cu solidificare în interval de temperatură [1, 2]. Acestea sunt bazate pe modele matematice 3D cu coordonate carteziene. Recent a fost realizat un modul de soft specializat pentru simularea solidificării pieselor turnate cu simetrie de rotație. Particularitatea acestui soft constă în aceea că este bazat pe un un model matematic 2D în coordonate cilindrice [3, 4]. Softul în coordonate cilindrice prezintă avantajul că simulează solidificarea în volum a pieselor cu simetrie de rotație, prin simulare 2D. Simularea 2D asigură o reducere considerabilă a duratei de simulare. În funcție de configurația și dimensiunile piesei și de pasul rețelei de divizare a sistemului piesa turnată - formă, durata simulării se poate reduce de zeci sau sute de ori. Un alt avantaj al softurilor care utilizează coordonate cilindrice constă în redarea mai precisă a conturului pieselor cu simetrie de rotație.

Funcționarea softului și corectitudinea rezultatelor obținute cu ajutorul acestui soft a fost verificată prin trei metode:

- By comparing the results with results obtained with other software internationally used;
- Experimentally by thermal analysis;
- Experimentally by casting sample parts and analyzing the hot spots positions.

Solidification simulation software for casting with rotational profile, based on a 2D mathematical model in cylindrical coordinates, can be used for the following purposes [5, 6]:

- Applied studies on solidification of symmetrical rotationally casting, from workshops production, to design and optimize the casting technologies;
- Fundamental research on the influence of geometrical, constructive and technological factors on casting solidification, in order to establish general rules for casting technologies design of cylindrical parts.

In the first case there are usually determined the hot spot position inside the casting and the need to use feeders, coolers or insulating materials. Also it is determined their number, position and dimensions [7, 8].

Fundamental theoretical studies are designed to determine the influence of the parts geometry, of the feeders, coolers and gating on casting solidification, under progressive modification of parameters. It aims to finally find correlations about solidification process, in order to establish simple and general rules for quick and efficient design of casting technologies [7, 8]. Optimization technologies must take into account the implications of these correlations on the castings quality, on material consumption and finally on the manufacturing costs.

## 2. Aim of the work

Any software for casting solidification simulation, and generally for technological processes simulation, requires operation checking in terms of the accuracy of the mathematical model, software structure and accuracy of the final results provided.

An accessible method to verify the accuracy of the results provided by present software for casting solidification simulation consists in comparing the results obtained with this one with the results obtained by other software, recognized as correct. This methodology was applied in the case of 2D software in cylindrical coordinates developed at Transilvania University of Brasov. This paper presents the results of such tests.

- prin compararea rezultatelor cu rezultate obținute cu alte softuri utilizate pe plan internațional;
- experimental prin analiză termică;
- experimental prin turnarea unor piese de probă și analiza poziției nodurilor termice.

Softul destinat simulării solidificării pieselor turnate cu profil de rotație, realizat pe baza unui model matematic 2D în coordonate cilindrice, se poate utiliza în următoarele scopuri [5, 6]:

- pentru efectuarea de studii aplicative concrete asupra solidificării unor piese cu simetrie de rotație, din producția atelierelor de turnare în vederea proiectării și optimizării tehnologiilor de turnare;
- pentru efectuarea de cercetări fundamentale privind influența factorilor geometrici, constructivi și tehnologici asupra solidificării pieselor turnate, în vederea stabilirii unor reguli generale de proiectare a tehnologiilor de maselotiere - turnare a pieselor cilindrice.

În primul caz se stabilește de obicei poziția nodurilor termice în piesele turnate, necesitatea utilizării de maselote, răcitori sau materiale termoizolante. De asemenea se stabilește numărul, poziționarea și dimensiunile acestora [7, 8].

Studiile teoretice fundamentale au rolul de a stabili influența geometriei pieselor, a maselotelor, a răcitorilor și a rețelilor de turnare asupra solidificării pieselor turnate, în condițiile modificării progresive a unor parametri. Se urmărește în final stabilirea de corelații în procesul solidificării în vederea stabilirii unor reguli generale, simplificate de proiectare rapidă și eficientă a tehnologiilor pentru tipodimensiuni de piese. Optimizarea tehnologiilor trebuie să țină cont de implicațiile acestor corelații asupra calității pieselor turnate, asupra consumului de materiale și în final asupra costurilor de fabricație.

## 2. Scopul lucrării

Orice soft destinat simulării solidificării pieselor turnate, în general destinat simulării de procese tehnologice, necesită o verificare a funcționării din punct de vedere a corectitudinii modelului matematic, a structurii softului și în final a veridicității rezultatelor furnizate.

O metodă accesibilă de verificare a veridicității rezultatelor furnizate de un soft destinat simulării solidificării pieselor turnate constă în compararea rezultatelor obținute cu ajutorul softului respectiv cu rezultate obținute cu un alt soft, recunoscut ca fiind corect. Această metodologie s-a aplicat și în cazul softului 2D cu coordonate cilindrice realizat la Universitatea Transilvania din Brașov. În această lucrare sunt prezentate rezultatele unei astfel de verificări.

### 3. Procedure

To perform operation checking the solidification of several parts with rotational symmetry was simulated using 2D software in cylindrical coordinates and 3D software in Cartesian coordinates. In the first phase it was simulated to solidification of a cylindrical bar, with great length compared to diameter. Only the heat transmission in the radius direction it was considered. In the second stage it will be simulated the solidification of a part with rotational symmetry (profiled generatrices), such as a wheel with a flange provided with inner core. In cartesian coordinates it requires 3D solidification simulation, but in cylindrical coordinates it can be studied by 2D simulation.

In Figure 1 is shown the bar section and dimensions for which verification was done, in the first stage. The bar has a diameter  $D = 2r = 60$  mm. The section dividing is shown for the case of cylindrical coordinates and when using cartesian coordinates. The bar length was considered very long compared to diameter ( $L \gg 6D$ ) so that the heat transfer in axial direction is negligible for the cross-section located at the mid-length of the bar. To highlight the influence of the division step size, the simulations were performed for two cases of division: division step  $\Delta = 5$  mm, and division step  $\Delta = 2.5$  mm. The values of thermophysical characteristics considered in the simulation are given in Table 1 [9, 10]. These correspond for a casting of grey cast iron with eutectic composition in bentonite bonded sand moulds.

### 3. Mod de lucru

Pentru efectuarea verificării a fost simulată solidificarea mai multor piese cu simetrie de rotație, cu ajutorul softului în 2D în coordonate cilindrice și respectiv cu un soft 3D cu coordonate carteziene. Într-o primă fază s-a simulat solidificarea unor bare cilindrice pline, cu lungime mare în raport cu diametrul. S-a luat în considerare numai transmiterea căldurii în direcția razei. În etapa a doua s-a simulat solidificarea unor piese cu simetrie de rotație cu generatoare profilată, de tipul unei roți cu o flanșă prevăzută cu miez interior. În coordonate carteziene aceasta necesită simulare 3D, iar în coordonate cilindrice solidificarea se poate studia prin simulare 2D.

În Figura 1 sunt arătate secțiunea și dimensiunile barei pentru care s-a realizat verificarea în prima etapă. Bara are diametrul  $D = 2r = 60$  mm. Este aratăta divizarea secțiunii pentru cazul utilizării de coordonate cilindrice și pentru cazul utilizării de coordonate carteziene. Lungimea barei s-a considerat foarte mare în comparație cu diametrul ( $L \gg 6D$ ) astfel încât transmiterea căldurii în direcție axială să fie neglijabilă pentru secțiunea transversală situată la mijlocul lungimii barei. Pentru a pune în evidență și influența mărimii pasului de divizare, s-au efectuat simulări pentru două cazuri de divizare: cu pasul rețelei  $\Delta = 5$  mm și, respectiv, cu pasul  $\Delta = 2,5$  mm. Valorile caracteristicilor termofizice luate în considerare la simulare sunt date în Tabelul 1 [9, 10]. Acestea corespund turnării unei piese din fontă cenușie perlitică cu compoziție eutectică în forme de nisip cu liant bentonită.

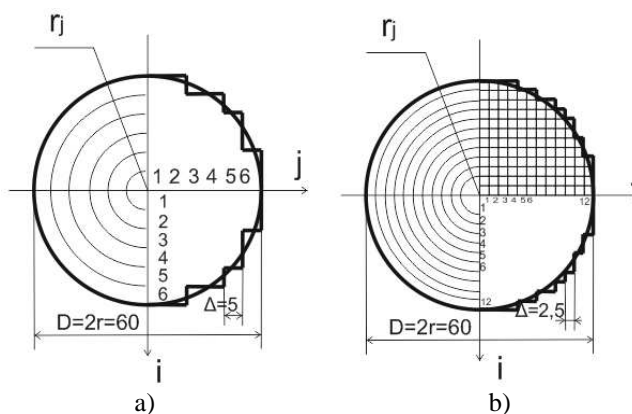


Figure 1. Division of the bar section with diameter  $D = 60$  mm, for simulation, in cylindrical coordinates and Cartesian coordinates: a) dividing step  $\Delta = 5$  mm; b) dividing step  $\Delta = 2.5$  mm

Figura 1. Divizarea secțiunii barei cu diametru  $D = 60$  mm, în vederea simulării, în coordonate cilindrice și în coordonate carteziene: a) pasul divizării  $\Delta = 5$  mm; b) pasul divizării  $\Delta = 2,5$  mm

### 2. Results and conclusions

In the Table 2 there are given the numerical results obtained by simulations with two software,

### 2. Rezultate și concluzii

În Tabelul 2 sunt date rezultatele numerice, care caracterizează solidificarea piesei din Figura 1,

which characterize the solidification of part shown in Figure 1. Figures 2÷6 show the curves relating to temperature evolution and the solid fraction in the center of the section (on the bar axis) and at the part surface, in the case of two types of simulations performed.

obținute prin simulările efectuate cu cele două softuri. În figurile 2÷6 sunt arătate alăturat curbe referitoare la evoluția temperaturii, a fracției de solid în centrul secțiunii (pe axa barei) și la suprafața piesei în cazul simulărilor efectuate.

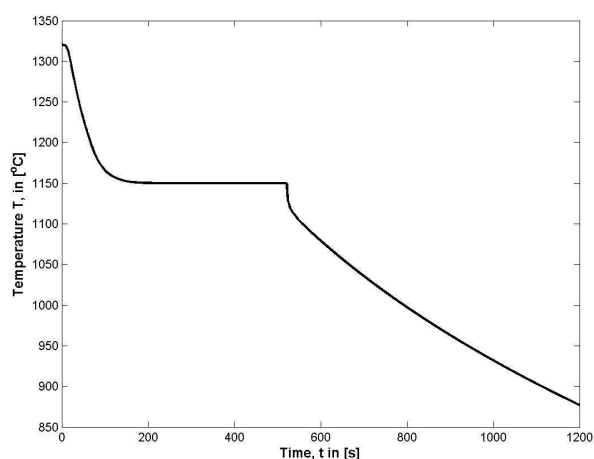
Table 1. Geometrical and thermophysical characteristics used in the simulation  
Tabelul 1. Caracteristicile geometrice și termofizice utilizate la simulare

No.	Parameter name Denumirea mărimii	Symbol Simbol	Measure unit Unitatea de măsură	Value Valoarea
1	Part diameter Diametrul piesei	D	m	0.06
2	Part length Lungimea piesei	L	m	0.4
3	Mold width Lățimea formei de turnare	$L_{Fo}$	m	0.2
4	Dividing step Pasul rețelei de divizare	$\Delta$	m	0.005 and 0.0025
5	Time division step Diviziunea de timp	$\tau$	s	0.01 or 0.5
6	Environment temperature Temperatura mediului exterior	$T_{ex}$	°C	20
7	Coefficient of heat exchange with the environment Coeficient de schimb termic cu mediul exterior	$\alpha_{ex}$	W/m <sup>2</sup> /K	20
8	Solidus temperature of the liquid alloy Temperatura solidus a aliajului lichid	$T_{sme}$	°C	1150
9	Coefficient of thermal conductivity of the mould Coeficientul de conductivitate termică a formei	$\lambda_{sfo}$	W/m/K	0.8
10	Coefficient of thermal conductivity of the solid alloy Coeficientul de conductivitate termică a aliajului solidificat	$\lambda_{sme}$	W/m/K	40
11	Coefficient of thermal conductivity of the liquid alloy Coeficientul de conductivitate termică a aliajului lichid	$\lambda_{lme}$	W/m/K	30
12	Specific heat of the mould Căldura specifică a formei	$C_{sfo}$	J/kg/K	1170
13	Specific heat of the liquid alloy Căldura specifică a aliajului lichid	$C_{lme}$	J/kg/K	850
14	Specific heat of the solid alloy Căldura specifică a aliajului solidificat	$C_{sme}$	J/kg/K	750
15	Mould density Densitatea formei	$\rho_{fo}$	Kg/m <sup>3</sup>	1550
16	Liquid alloy density Densitatea aliajului lichid	$\rho_{me}$	Kg/m <sup>3</sup>	7000
17	Latent heat of solidification of the alloy Căldura latentă de solidificare a aliajului turnat	$L_{me}$	J/kg	220,000
18	Initial temperature of the mould Temperatura inițială a formei	$T_{0fo}$	°C	20
19	Initial temperature of the liquid alloy Temperatura inițială a aliajului lichid	$T_{0me}$	°C	1320

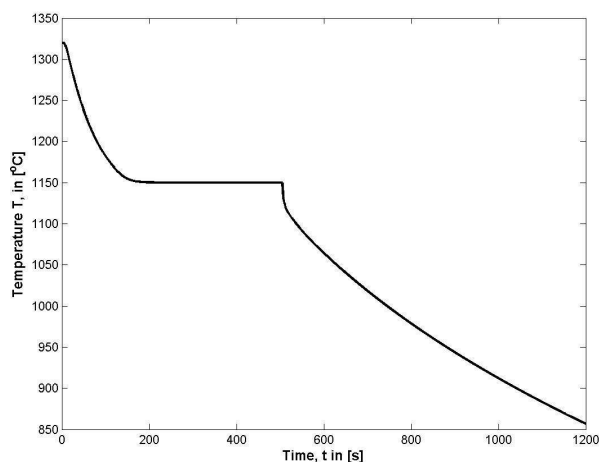
Table 2. Comparison of simulation results in cylindrical coordinates and Cartesian coordinates for cylindrical bar with  $D = 60$  mm

Tabelul 2. Comparația rezultatelor simulării în coordonate cilindrice și în coordonate carteziene a barei cilindrice cu  $D = 60$  mm

No.	Parameter analyzed	Division step $\Delta = 5$ mm		Division step $\Delta = 2.5$ mm	
		Cylindrical coordinates	Cartezian coordinates	Cylindrical coordinates	Cartezian coordinates
1	Time of solidification beginning, $t_{start}$ [s]	17.4	12.3	12.15	5.9
2	Time of hot point solidification beginning, $t_{start\ nod}$ [s]	437.0	411.5	419.7	405.1
3	Duration of complete solidification of the hot spot, $t_{solidus\ nod\ thermic}$ [s]	527.0	506.0	521.7	505.3
4	Temperature in center of part after 100 s, $T_{c100}$ [°C]	1168.15	1165.41	1165.94	1182.09
5	Temperature in center of part after 600 s, $T_{c600}$ [°C]	1082.58	1072.39	1079.36	1064.66
6	Maximum temperature of the mould at the contact surface, $T_{Fomax}$ [°C]	968.44	972.33	1042.88	1052.56
7	Duration of simulation, $t_{sim}$ [min]	0.25	2.5	1.5	15



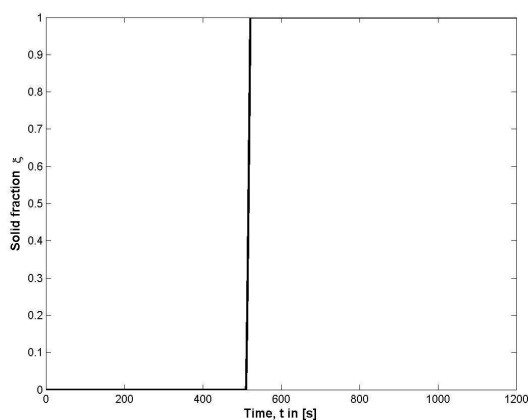
a) Cylindrical coordinates,  $\Delta = 2.5$  mm



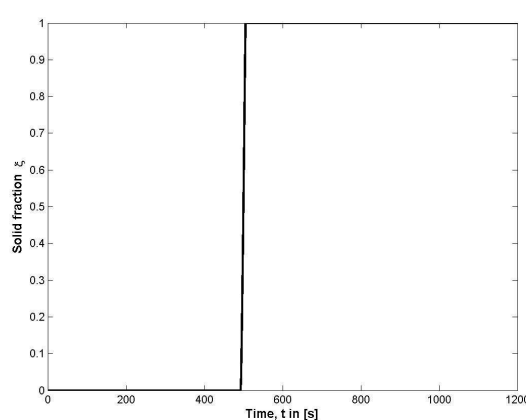
b) Cartezian coordinates,  $\Delta = 2.5$  mm

Figure 2. Temperature evolution in the center of section; cylindrical bar with  $D = 60$  mm

Figura 2. Evoluția temperaturii în centrul secțiunii barei cilindrice cu  $D = 60$  mm



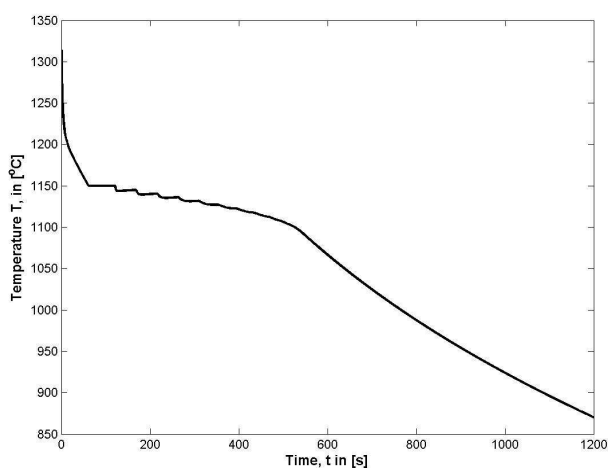
a) Cylindrical coordinates,  $\Delta = 2.5$  mm



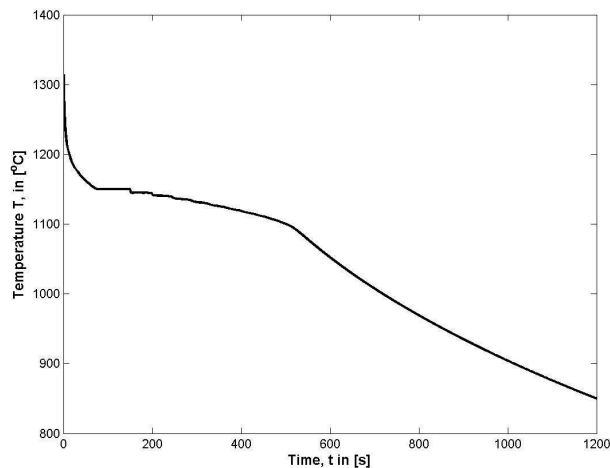
b) Cartezian coordinates,  $\Delta = 2.5$  mm

Figure 3. Solid fraction evolution in the center of section; cylindrical bar with  $D = 60$  mm

Figura 3. Evoluția fracției de solid în centrul secțiunii barei cilindrice cu  $D = 60$  mm



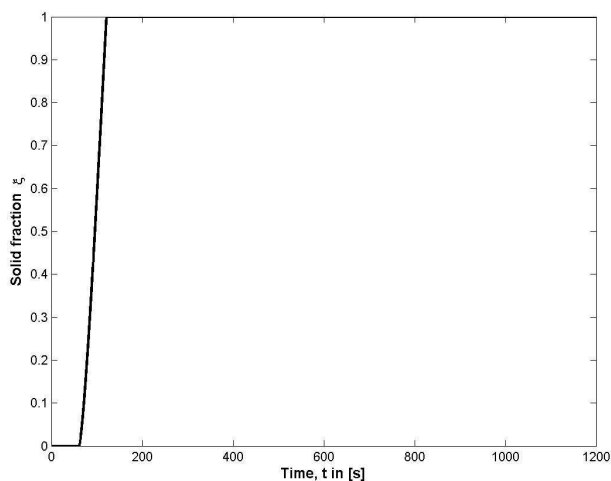
a) Cylindrical coordinates,  $\Delta = 2.5$  mm



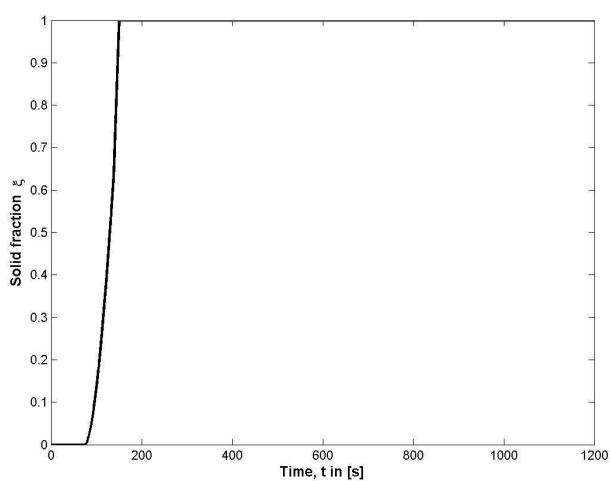
b) Cartesian coordinates,  $\Delta = 2.5$  mm

Figure 4. Temperature evolution at the part surface; cylindrical bar with  $D = 60$  mm

Figura 4. Evoluția temperaturii la suprafața barei cilindrice cu  $D = 60$  mm



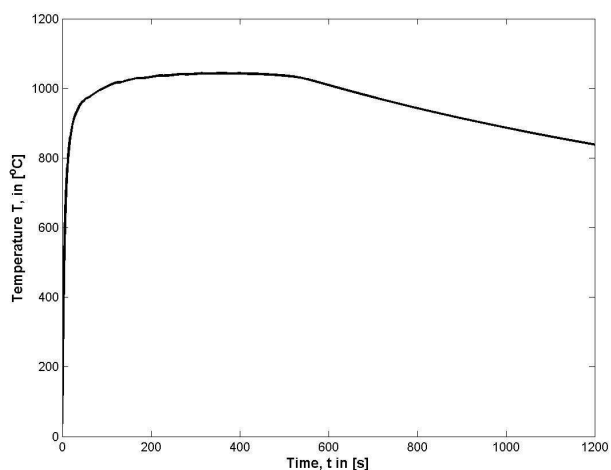
a) Cylindrical coordinates,  $\Delta = 2.5$  mm



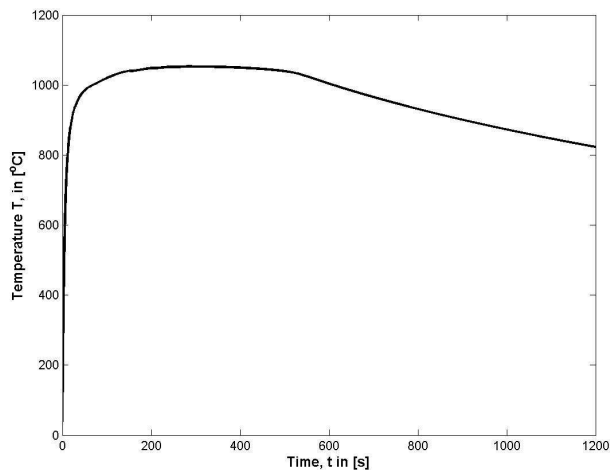
b) Cartesian coordinates,  $\Delta = 2.5$  mm

Figure 5. Solid fraction evolution at the part surface; cylindrical bar with  $D = 60$  mm

Figura 5. Evoluția fracției de solid la suprafața barei cilindrice cu  $D = 60$  mm



a) Cylindrical coordinates,  $\Delta = 2.5$  mm



b) Cartesian coordinates,  $\Delta = 2.5$  mm

Figure 6. Temperature evolution in the mould at the contact surface with part; cylindrical bar with  $D = 60$  mm

Figura 6. Evoluția temperaturii în stratul formei de turnare, situat în contact cu piesa turnată, la suprafața barei cilindrice cu  $D = 60$  mm

Analysis of the results in Table 2 leads to the following observations:

- Beginning of solidification (first appearance of solid fractions during part cooling) differs in the two types of simulation with approx. 5-6 seconds. Higher values were obtained at simulation in cylindrical coordinates.
- Reducing the division step from 5 mm to 2.5 mm, led in the both cases (both simulation in cylindrical coordinates and cartesian coordinates) at a shorter beginning of part solidification with 5-6 seconds.
- Time to complete solidification of the part is higher in cylindrical coordinates with 16 to 21 seconds that represents approx. 3 to 5% of the solidification time.
- Reducing the division step from 5 mm to 2.5 mm, led in both cases (both simulation in cylindrical coordinates and Cartesian coordinates) at a shorter time to complete solidification of the part with 1 - 6 seconds.
- As the division is finer (if the dividing step is smaller) the difference between the results of two types of mathematical modeling of simulation (in cylindrical coordinates and Cartesian coordinates) are closer.
- The temperature in the part center (in the hot spot) at different times ( $t_1 = 100$  s,  $t_2 = 600$  s) is of the same order of magnitude, the differences being of the order of 1 to 1.5%.
- The maximum temperature reached on the part surface in the two types of simulation is also of the same order of magnitude, differences of the order 0.5 - 1.0 %.
- Duration of simulation in the case of this part is about ten times longer in the simulation in cartesian coordinates relative to cylindrical coordinates.

Figures 2 and 4 show that between the temperature variation curves in the center of part section and periphery are not perceptible differences (at the representation scale of these curves). The same observation can be made to Figure 6, where the curves representing the temperature variation in the mold, in the layer located at the contact surface with casting (length  $\Delta = 2.5$  mm).

In conclusion, the differences regarding the solidification time, the distribution of the temperature in the system and the punctual variation of temperature and solid fraction are relatively small. These differences can be explained by the imprecision in dividing the circular perimeter of the

Analiza rezultatelor din tabelul 2 conduce la următoarele observații:

- Începutului solidificării piesei (aparitia primei fracții de solid în timpul răcirii piesei) diferă la cele două tipuri de simulare cu cca. 5-6 secunde. Valorile mai mari s-au obținut la simularea în coordonate cilindrice.
- Micșorarea pasului divizării de la 5 mm la 2,5 mm a condus în ambele cazuri (atât la simularea în coordonate cilindrice, cât și în coordonate carteziane) la o durată mai mică a începutului solidificării piesei (la suprafața piesei) cu 5-6 secunde.
- Timpul de solidificare completă a piesei este mai mare în cazul coordonatelor cilindrice cu 16 - 21 secunde, aceasta reprezentând cca. 3 - 5 % din valoarea timpului de solidificare.
- Micșorarea pasului divizării de la 5 mm la 2,5 mm a condus în ambele cazuri (atât la simularea în coordonate cilindrice, cât și în coordonate carteziane) la o durată mai mică a solidificării complete a piesei în centrul secțiunii piesei cu 1 - 6 secunde.
- Cu cât divizarea este mai fină (cu cât pasul rețelei de divizare este mai mic) diferența dintre rezultatele celor două tipuri de modelări matematice ale simulării (în coordonate cilindrice și în coordonate carteziane) sunt mai apropiate.
- Temperatura în centrul piesei (în nodul termic) la diverse momente ( $t_1 = 100$  s,  $t_2 = 600$  s) este de același ordin de mărime, diferențele fiind de ordinul 1 - 1,5 %.
- Temperatura maximă pe care o atinge suprafața formei la cele două tipuri de simulare este de asemenea de același ordin de mărime, diferențele fiind de ordinul 0,5 - 1,0 %.
- Durata simulării în coordonate carteziane în cazul acestei piese este de cca. zece ori mai mare la simularea în coordonate carteziane în raport cu coordonate cilindrice.

Figurile 2 și 4 arată că între curbele de variație a temperaturii în centrul secțiunii piesei și la periferia piesei nu sunt diferențe sesizabile (la scara de reprezentare a acestor curbe). Același observație se poate face și pentru Figura 6, în cazul curbelor care reprezintă variația temperaturii în forma de turnare, în stratul formei (cu grosimea  $\Delta = 2,5$  mm) situat la suprafața de contact cu piesa turnată.

În concluzie, diferențele privind timpul de solidificare, distribuția temperaturilor în sistem și cele privind curbele de variație punctuală a temperaturilor și a fracției de solid, sunt relativ mici. Aceste diferențe se explică prin imprecizia divizării perimetrului circular la suprafața exterioară

external surfaces of the part in the case of cartesian coordinates.

The great difference between the effective duration of the simulation in the two cases is explained by the fact that in 3D simulation in cartesian coordinates the number of cells in which it is divided whole system is much higher compared with the one obtained in 2D simulation in cylindrical coordinates. As result the number of equations to be solved in the case of simulation based on mathematical model in cartesian coordinates is much higher.

a piesei în cazul divizării în coordonate carteziene.

Diferența mare privind durata efectivă a simulărilor în cele două cazuri se explică prin faptul că în cazul divizării și simulării 3D în coordonate carteziene numărul de celule în care este divizat ansamblul este mult mai mare în raport cu cel care se obține la simularea 2D în coordonate cilindrice. Ca urmare numărul de ecuații care trebuie rezolvat în cazul simulării bazate pe model matematic în coordonate carteziene este mult mai mare.

## References

1. Ciobanu, I., Munteanu, S.I., Crișan, A. (2004): *Model matematic și soft 3D bazat pe metoda diferențelor finite pentru simularea solidificării pieselor turnate din aliaje eutectice (Mathematical model and 3D software for the casting solidification simulation in eutectic alloys)*. Metalurgia, ISSN 0461/9579, no. 12, p. 17- 24 (in Romanian)
2. Ciobanu, I., Monescu, V., Munteanu, S.I., Crișan, A. (2010): *Simularea 3D a solidificării pieselor turnate (3D Simulation of the castings solidification)*. Editura Universității Transilvania din Brașov, ISBN 978-973-598-678-0, Brașov, Romania (in Romanian)
3. Ionescu, I., Ionescu, D., Ciobanu, I., Jiman, V. (2012): *Mathematical Modelling of eutectic alloy cylindrical castings solidification*. Metalurgia, ISSN 0461-9579, vol. 64, no. 8, p. 10-20
4. Ionescu, I., Ionescu, Daniela, Ciobanu, I., Jiman, V. (2012): *Computation of the heat Exchange Coefficient in Cylindrical Coordinates Mathematical Modeling of Castings Solidification*. RECENT, ISSN 1582-0246, vol. 13, no. 3(36), p. 307-316
5. Soporan, V., Constantinescu, V. (1995): *Modelarea la nivel macrostructural a solidificării (Modelling of the Macro-structural Solidification)*. Edtura Dacia, ISBN 973-35-0526-9, Cluj-Napoca, Romania (in Romanian)
6. Ștefănescu, D. (2001): *Science and Engeneering of Casting Solidification*. ISBN 0-306-46750-X, Departament of Material Engineering, University of Alabama, Tuscalosa, USA
7. Bast, J., Kadauw, A., Malaschkin, A. (2009): *Optimising of Mould Parameters for Green Sand Compaction by Computer Simulation and a New Compaction Measuring Device*. International Journal of Metalcasting, ISSN 1939-598, vol. 3, issue 2, p. 55-65
8. Ștefănescu, D., Kanetkar, C. (1986): *Computer modeling of the solidification of eutectic alloys: Comparison of various models for eutectic growth of cast iron.*, Departament of Material Engineering, University of Alabama, Tuscalosa, p. 255-262
9. Ștefănescu, D. (2001): *Macro-modeling of solidification. Numerical approximation methods*. Departament of Material Engineering, University of Alabama, Tuscalosa, p. 94-115
10. Desai, P.D. (1986): *Thermodynamic Properties of Iron and Silicon*. Journal of Physical and Chemical Reference Data, ISSN 0047-2689, vol. 15, no. 3, p. 967-983

Received in September 2015

Lucrare primită în Septembrie 2015