

**ASPECTE PRIVIND SIMULAREA
SOLIDIFICĂRII PIESELOR TURNATE
CU SIMETRIE DE ROTAȚIE**

**ASPECTS REGARDING SOLIDIFICATION
SIMULATION OF CASTING
WITH ROTATIONAL SYMMETRY**

Maria STOICĂNESCU, I. IONESCU, I. CIOBANU, S.I. MUNTEANU, A. CRIȘAN

Universitatea Transilvania din Brașov, România

Person contact: stoican.m@unitbv.ro

REZUMAT / ABSTRACT

La Universitatea Transilvania din Brașov 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 în 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 de 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, și de asemenea 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 mai multe metode. În aceasta lucrare sunt prezentate rezultatele verificării softului cu coordonate cilindrice prin compararea rezultatelor obținute cu ajutorul softului respectiv, cu rezultate obținute cu un soft 3D în coordonate carteziane.

Piesa supusă simulării solidificării este o bară cilindrică din fontă cenușie perlitică, cu diametrul $D = 2r = 60$ mm și lungime mare ($L \gg 6D$). S-au efectuat simulări pentru divizarea sistemului piesă turnată - formă, cu pasul rețelei $\Delta = 5$ mm, și respectiv $\Delta = 2,5$ mm,

Analiza rezultatelor a condus următoarele observații:

- În cazul simulării în coordonate cilindrice începutul solidificării, cât și sfârșitul solidificării piesei sunt întârziate în raport cu simularea în coordonate carteziane.
- Micșorarea pasului divizării a condus la ambele tipuri de simulare (în coordonate cilindrice, cât și în coordonate carteziane) la o durată mai mică a începutului și sfârșitului solidificării.
- Cu cât divizarea este mai fină, diferența între rezultatele celor două tipuri de simulări (cu coordonate cilindrice și cu coordonate carteziane) sunt mai apropiate.
- Durata simulării în coordonate carteziane în cazul piesei studiate este de circa 10 ori mai mare la simularea în coordonate carteziane în raport cu coordonate cilindrice.

În concluzie, diferențele între rezultatele obținute prin cele două tipuri de simulare sunt nesemnificative, nu afectează dinamica solidificării în ansamblul piesei turnate.

Specialized software for solidification simulation of casting with rotational symmetry was conducted at the Transilvania University of Brașov. 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 simulation that 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 elements and more accurate representation of the contour for parts with rotational symmetry.

The software operation and accuracy of the results obtained have been verified by several methods. This paper presents the results of software verification by comparing the results obtained with software in cylindrical coordinates with the results obtained with 3D software in cartesian coordinates. The part subject of solidification simulation is a cylindrical bar cast of pearlitic gray iron, with diameter $D = 60$ mm, and great length ($L \gg 6D$). Simulations were performed for network dividing step of the system casting - mould $\Delta = 5$ mm, and $\Delta = 2.5$ mm. Analysis of the results led the following observations:

- In the case of solidification simulation in cylindrical coordinates the beginning and the end of solidification of are delayed comparing to simulation in cartesian coordinates.

- *The reduction of the division step, led to both simulation to a shorter start and end of solidification.*
- *The difference between the results of both types of simulations is closer when dividing is finer.*
- *Duration of simulation in cartesian coordinates is about 10 times greater relative to cylindrical coordinates.*

In conclusion, the differences between the results obtained by the two types of simulation are insignificant so do not affect whole casting solidification dynamics.

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

1. INTRODUCERE

La Universitatea Transilvania din Brașov au fost realizate două module de soft pentru simularea solidificării pieselor turnate. Unul pentru piese turnate din aliaje cu solidificare la temperatura constantă și altul pentru piese turnate din aliaje cu solidificare în interval de temperatură (de tip soluție solidă) [1, 2]. Acestea sunt bazate pe modele matematice 3D cu coordonate carteziane.

Recent a fost realizat un nou modul de soft specializat pentru simularea solidificării pieselor turnate cu simetrie de rotație. Particularitatea acestui soft constă în aceea că este bazat pe un model matematic 2D cu coordonate cilindrice [3, 4]. Softul în coordonate cilindrice prezintă avantajul că poate simula 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 de rețelei de divizare a sistemului piesă turnată - formă, durata simulării se poate reduce de zeci sau sute de ori.

În cazul pieselor cu simetrie de rotație softurile care utilizează coordonate cilindrice mai prezintă încă două avantaje:

- permite redarea mai precisă a conturului circular al pieselor cu simetrie de rotație;
- permite modelarea matematică mai exactă a fluxurilor termice convergent / divergente care caracterizează transmisia căldurii în piesele cu simetrie de rotație.

În cazul pieselor cu simetrie de rotație, la modelare în coordonate cilindrice, piesele sunt divizate în elemente de volum inelare, iar căldura se transmite în lungul razei, prin fluxuri divergente / convergente. În cazul modelelor matematice în coordonate carteziane, piesa este divizată în elemente cubice, iar transferul de căldură între elemente și în interiorul elementelor are loc prin fluxuri paralele perpendiculare pe suprafețele elementelor [9, 10].

În coordonate cilindrice, în cazul fluxurilor de căldură convergent / divergente, coeficientul de conductibilitate termică echivalent al unor straturi concentrice din materiale cu conductibilitati diferite (de exemplu între piesă și formă sau în interiorul elementelor de volum în curs de solidificare) se calculează prin relația:

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 new software module, specialized to simulate the solidification of casting with rotational symmetry was developed. The peculiarity 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. 2D simulation provide 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.

In the case of rotationally symmetric parts, software that uses cylindrical coordinates still shows two advantages:

- *Allows you to describe more accurate the circular contour of rotational symmetric parts.*
- *Allows more accurate mathematical modeling of convergent / divergent heat flows that characterize the heat transmission in rotationally symmetric parts.*

In the case of parts with symmetry of rotation, modeled in the cylindrical coordinate, they are divided in ring volume elements, and the heat is transmitted along the beam, through divergent / convergent fluxes. In the case of mathematical models in cartesian coordinates, the part is divided into cubic elements and heat transfer between the elements and within the elements occurs through parallel flows, perpendicular to the surfaces of elements [9, 10].

In cylindrical coordinates, in the case of convergent / divergent heat flows the equivalent coefficient of thermal conductivity for concentric layers of materials with different conductivity (eg. between part and mold or inside the volume elements during solidification) is calculated by the equation:

$$\lambda_{ECHIV} = \frac{\ln \frac{r_n}{r_0}}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{r_i}{r_{i-1}}} \quad (1)$$

unde:

n - numărul de straturi inelare,
 i - numărul de ordine (indexul) al stratului de la interior spre exterior,
 r_i - raza exterioară a stratului "i",
 λ_i - coeficientul de conducție al stratului "i".
 În cazul coordonatelor carteziene, coeficientul de conducție termică echivalent la transmiterea căldurii prin straturi paralele din materiale diferite (când fluxul termic este orientat perpendicular pe suprafața straturilor) este dat de relația:

$$\lambda_{ECHIV} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} x_i}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{x_i}{\lambda_i}} = \frac{x}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{x_i}{\lambda_i}} \quad (2)$$

unde

n - numărul total de straturi,
 "i" - numărul de ordine al stratului,
 x_i - grosimea stratului "i",
 x - grosimea totală a peretelui,
 λ_i - coeficientul de conductibilitate termică a stratului "i".

Datorită acestui aspect este posibil ca în cazul simulării solidificării pieselor turnate cu simetrie de rotație pe baza unor modele matematice cu coordonate cilindrice și respectiv în coordonate carteziene să existe diferențe între rezultate. Este important să se cunoască cât de mari sunt aceste diferențe. De asemenea, la realizarea unor softuri este necesar să se verifice veridicitatea rezultatelor. În cazul softului pentru simularea solidificării pieselor cu simetrie de rotație în coordonate cilindrice, realizat la Universitatea Transilvania, funcționarea softului și corectitudinea rezultatelor a fost verificată prin trei metode:

- 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

where:

n - number of ring layers,
 i - ordinal number (index) of the layer from inside to outside,
 r_i - external radius of the layer "i",
 λ_i - the conductivity coefficient of the layer "i".
 In the case of cartesian coordinates, the equivalent coefficient of thermal conduction at heat transfer to through parallel layers of different materials (when the heat flux is oriented perpendicular to the layer surface) is given by:

where:

n - total number of layers,
 i - index number of the layer,
 x_i - thickness of the layer "i",
 x - total thickness of the wall,
 λ_i - coefficient of thermal conductivity of the layer "i".

So, it is possible to appear differences between the results obtained in the case of casting solidification simulation of parts with rotational symmetry based on mathematical models in cylindrical coordinates and those in cartesian coordinates. It is important to know how big are these differences. Also in software development it is necessary to verify the veracity of the results. In the case of solidification simulation software for parts with rotational symmetry in cylindrical coordinates, conducted at Transilvania University of Braşov, software operation and accuracy of the results have been verified by three methods:

- 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;

- 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 maselote - turnare a pieselor cilindrice.

În primele cazuri se stabilește de obicei poziția nodurilor temice în piesele turnate, necesitatea utilizării de maselote, răcitori, materiale termoizolante. De asemenea se stabilește numărul, poziționarea și dimensiunile acestora [7].

Studiile teoretice fundamentale au rolul de a stabili influența geometriei pieselor, a maselotelor, a răcitorilor și a rețelelor 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 [7].

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 și 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 [8, 9]. 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. MOD DE LUCRU

Pentru efectuarea verificării a fost simulată solidificarea mai multor piese cu simetrie de rotație, cu ajutorul softului 2D în coordonate cilindrice și respectiv cu un soft 3D cu coordonate carteziane. 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 transmisia căldurii în direcția razei.

În etapa a doua s-a simulat solidificarea unor piese cu simetrie de rotație cu generatoare profilată, de tipul

- *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].

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].

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 [8, 9]. This methodology was applied in the case of 2D software in cylindrical coordinates developed at Transilvania University of Brașov.

This paper presents the results of such tests.

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

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** este aratăta secțiunea și dimensiunile barei pentru care s-a realizat verificarea în prima etapă. Bara are diametrul $D = 2r = 60$ mm. Este arătată 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: divizare cu pasul rețelei $\Delta = 5$ mm, și respectiv divizare cu pasul $\Delta = 2,5$ mm. Valorile caracteristicilor termofizice luate în considerare la simulare sunt date în **Tabelul 1** [7, 12, 13]. Acestea corespund turnării unei piese din fontă cenușie perlitică cu compoziție eutectică în forme de nisip cu liant bentonită.

(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** [7, 12, 13]. These correspond for casting a pearlitic gray cast iron part with eutectic composition in bentonite bonded sand molds.

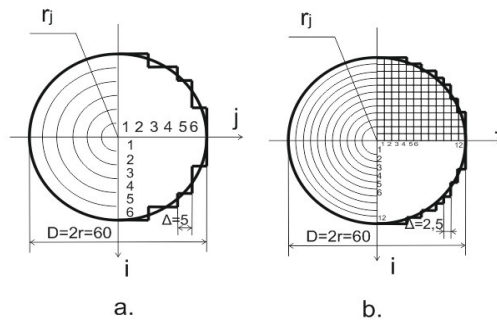


Fig. 1. Divizarea secțiunii barei cu diametru $D = 60$ mm în vederea simulării în coordonate cilindrice și în coordonate carteziene a) pasul divizării $\Delta = 5$ mm; b) pasul divizării $\Delta = 2,5$ mm
Division of the bar section with diameter $D = 60$ mm for simulation in cylindrical coordinates and Cartesian coordinates; a) dividing step $\Delta = 5$ mm; b) dividing step $\Delta = 2.5$ mm

Tabelul 1. Caracteristicile geometrice și termofizice utilizate la simulare în cazul pieselor din Figura 1
Table 1. Geometrical and thermophysical characteristics used in the simulation for parts of Figure 1

No.	Parameter name	Symbol	Measure unit	Value
1	Part diameter	D	m	0.06
2	Part length	L	m	0.4
3	Mold width	L_{Fo}	m	0.2
4	Mold dividing step	Δ	m	0.005 and 0.0025
5	Time division step	τ	s	0.01 or 0.5
6	Environment temperature	T_{ex}	°C	20
7	Coefficient of heat exchange with the environment	α_{ex}	W/m ² /K	20
8	Solidus temperature of the liquid alloy	T_{sme}	°C	1150
9	Coefficient of thermal conductivity of the mould	λ_{sfo}	W/m/K	0.8
10	Coefficient of thermal conductivity of the solid alloy	λ_{sme}	W/m/K	40
11	Coefficient of thermal conductivity of the liquid alloy	λ_{lme}	W/m/K	30
12	Specific heat of the mould	C_{sfo}	J/kg/K	1170
13	Specific heat of the liquid alloy	C_{lme}	J/kg/K	850
14	Specific latent heat of the solid alloy	C_{sme}	J/kg/K	750

No.	Parameter name	Symbol	Measure unit	Value
15	Mould density	ρ_{fo}	Kg/m^3	1550
16	Liquid alloy density	ρ_{me}	Kg/m^3	7000
17	Latent heat of solidification of the alloy	Lme	J/kg	220000
18	Initial temperature of the mould	T0fo	$^{\circ}\text{C}$	20
19	Initial temperature of the liquid alloy	T0me	$^{\circ}\text{C}$	1320

4. REZULTATE

În **Tabelul 2** sunt date rezultatele numerice care caracterizează solidificarea piesei din **Figura 1**, obținute prin simulările efectuate cu cele două softuri. În **Figurile 2 - 6** sunt prezentate curbele referitoare la evoluția temperaturii, a fracției de solid în centrul secțiunii (pe axa barei) și la suprafața piesei în cazul simulărilor efectuate.

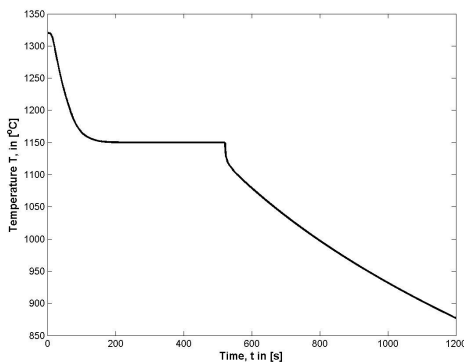
4. RESULTS

In the **Table 2** there are given the numerical results obtained by simulations with two softwares, 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 2 types of simulations performed.

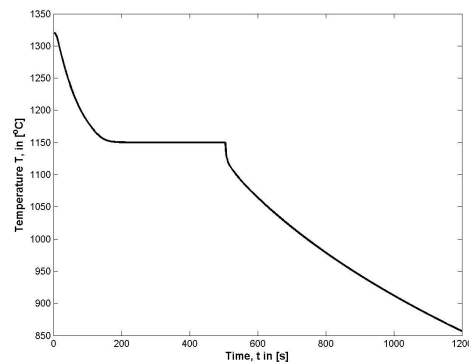
Tabelul 2. Comparația rezultatelor simulării în coordonate cilindrice și în coordonate carteziene a barei cilindrice cu $D = 60$ mm

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

No.	Parameter analyzed	Symbol (measure unit)	Division step $\Delta = 5$ mm		Division step $\Delta = 2.5$ mm	
			Cylindrical coordinates	Cartesian coordinates	Cylindrical coordinates	Cartesian 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 termic (s)	527.0	506.0	521.7	505.3
4	Temperature in center of part after 100s	Tc100 ($^{\circ}\text{C}$)	1168.15	1165.41	1165.94	1182.09
5	Temperature in center of part after 600s	Tc600 ($^{\circ}\text{C}$)	1082.58	1072.39	1079.36	1064.66
6	Maximum temperature of the mould at the contact surface	TFomax ($^{\circ}\text{C}$)	968.44	972.33	1042.88	1052.56
7	Duration of simulation	t-sim (min)	0.25	2.5	1.5	15

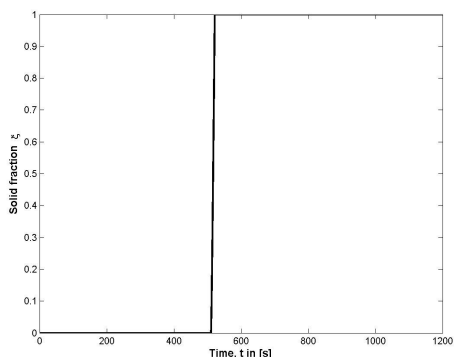


a) coordonate cilindrice $\Delta=2,5\text{mm}$
Cylindrical coordinates $\Delta=2,5\text{mm}$

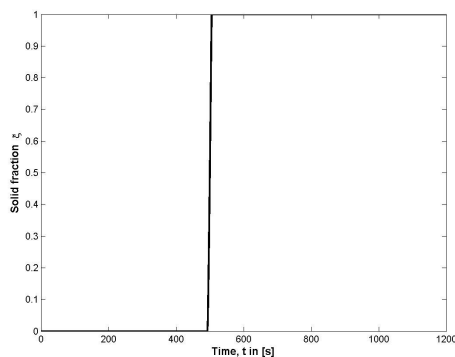


b) coordonate carteziene $\Delta=2,5\text{mm}$
Cartesian coordinates $\Delta=2,5\text{mm}$

Fig. 2. Evoluția temperaturii în centrul secțiunii barei cilindrice cu $D = 60$ mm, în cazul simulării cu $\Delta = 2,5$ mm
Temperature evolution in the center of section; cylindrical bar with $D = 60$ mm, simulation with $\Delta = 2.5$ mm



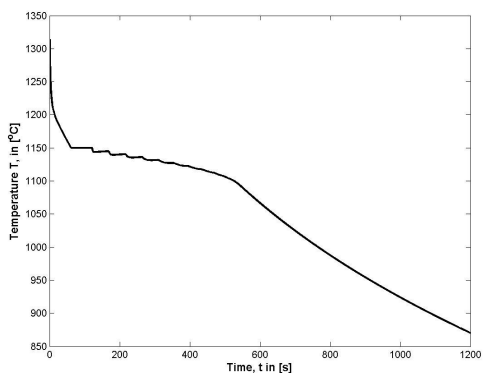
a) coordonate cilindrice $\Delta = 2,5$ mm
Cylindrical coordinates $\Delta = 2.5$ mm



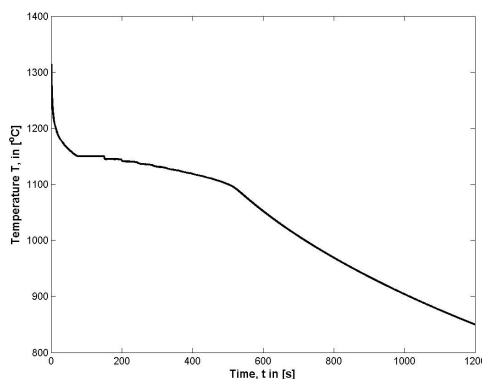
b) coordonate carteziene $\Delta = 2,5$ mm
Cartesian coordinates $\Delta = 2.5$ mm

Fig. 3. Evoluția fracției de solid în centrul secțiunii barei cilindrice cu $D = 60$ mm, în cazul simulării cu $\Delta = 2,5$ mm

Solid fraction evolution in the center of section; cylindrical bar with $D = 60$ mm, simulation with $\Delta = 2.5$ mm



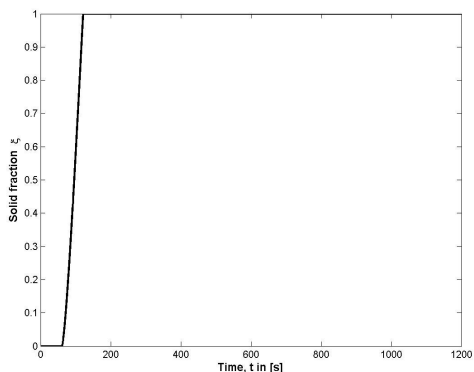
a) coordonate cilindrice $\Delta = 2,5$ mm
Cylindrical coordinates $\Delta = 2.5$ mm



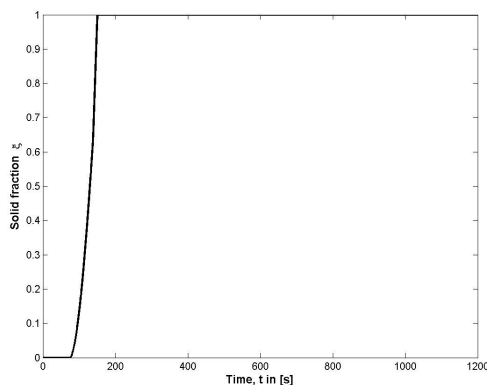
b) coordonate carteziene $\Delta = 2,5$ mm
Cartesian coordinates $\Delta = 2.5$ mm

Fig. 4. Evoluția temperaturii la suprafața barei cilindrice cu $D = 60$ mm, în cazul simulării cu $\Delta = 2,5$ mm

Temperature evolution at the part surface; cylindrical bar with $D = 60$ mm, simulation with $\Delta = 2.5$ mm



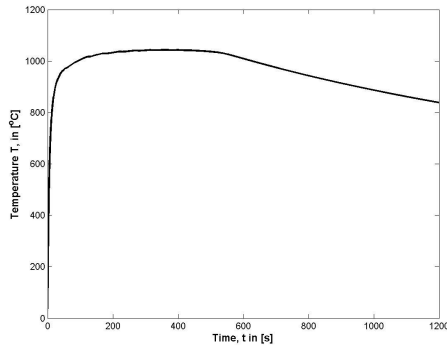
a) coordonate cilindrice $\Delta = 2,5$ mm
Cylindrical coordinates $\Delta = 2.5$ mm



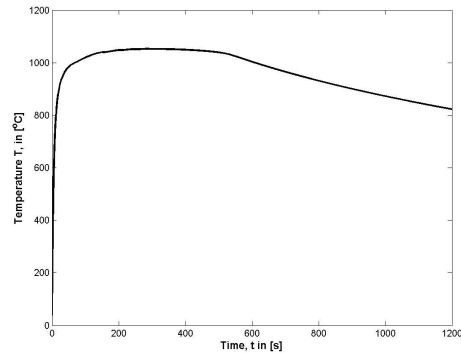
b) coordonate carteziene $\Delta = 2,5$ mm
Cartesian coordinates $\Delta = 2.5$ mm

Fig. 5. Evoluția fracției de solid la suprafața barei cilindrice cu $D = 60$ mm, în cazul simulării cu $\Delta = 2,5$ mm

Solid fraction evolution at the part surface; cylindrical bar with $D = 60$ mm, simulation with $\Delta = 2.5$ mm



a) coordonate cilindrice $\Delta = 2,5$ mm
Cylindrical coordinates $\Delta = 2.5$ mm



b) coordonate carteziene $\Delta = 2,5$ mm
Cartezian coordinates $\Delta = 2.5$ mm

Fig. 6. Evoluția temperaturii în stratul forme de turnare, situat în contact cu piesa turnată, la suprafața barei cilindrice cu $D = 60$ mm, în cazul simulării cu $\Delta = 2,5$ mm
Temperature evolution in the mould at the contact surface with part; cylindrical bar with $D = 60$ mm, simulation with $\Delta = 2.5$ mm

5. CONCLUZII

Analiza rezultatelor din **Tabelul 2** conduce la următoarele observații:

1. Începutul solidificării piesei (aparitia primei fracții de solid în timpul răcirii piesei) diferă la cele două tipuri de simulare cu circa 5 - 6 secunde. Valorile mai mari s-au obținut la simularea în coordonate cilindrice.
2. Micșorarea pasului divizării de la 5 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.
3. Timpul de solidificare completă a piesei este mai mare în cazul coordonatelor cilindrice cu 16 - 21 secunde, aceasta reprezentând circa 3 - 5% din valoarea timpului de solidificare.
4. 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.
5. Cu cât divizarea este mai fină (cu cât pasul rețelei de divizare este mai mic) diferența între rezultatele celor două tipuri de modelări matematice ale simulării (în coordonate cilindrice și în coordonate carteziane) sunt mai apropiate.
6. 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%.
7. Temperatura maximă pe care o atinge suprafața forme la cele două tipuri de simulare este de asemenea de același ordin de mărime, diferențele

5. CONCLUSIONS

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

1. Beginning of solidification (first appearance of solid fractions during part cooling) differs in the two types of simulation with approximately 5 - 6 seconds. Higher values were obtained at simulation in cylindrical coordinates.
2. 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 beginning of part solidification with 5 - 6 seconds.
3. Time to complete solidification of the part is higher in cylindrical coordinates with 16 to 21 seconds, that represents approximately 3 to 5% of the solidification time.
4. 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 sec.
5. 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.
6. 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%.
7. 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

fiind de ordinul 0,5 - 1,0%.

8. Durata simulării în coordonate carteziene în cazul acestei piese, este de circa 10 ori mai mare la simularea în coordonate carteziene în raport cu coordonatele 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). Aceeași observație se poate face și pentru **Figura 6**, în cazul curbelor care reprezintă variația temperaturii în forma de turnare în stratul formeii (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 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.

6. VERIFICARE EXPERIMENTALĂ

În partea a doua a lucrării s-a realizat și o verificare experimentală a veridicității rezultatelor obținute cu ajutorul softului în coordonate cilindrice. Verificarea s-a realizat prin analiză termică.

În acest scop s-a turnat o piesă cilindrică de probă. În interiorul formeii de turnare s-au montat două termocupluri care au înregistrat variația temperaturii în două puncte ale piesei, în timpul răcirii și solidificării aliajului.

În **Figura 7** este arată forma de turnare utilizată pentru verificarea experimentală. Sunt date dimensiunile formeii și ale piesei turnate și poziția termocuplurilor. S-a înregistrat temperatura în centrul piesei și la mijlocul razei. Piesa a fost turnată din aliaj Al - 12%Si.

În **Figurile 8 și 9** sunt arătate aspecte de la efectuarea experimentului (forma de turnare și înregistrarea experimentală a temperaturii). Pentru verificare, curbele de variație a temperaturii determinate experimental s-au comparat ca cele determinate prin simulare.

order 0.5 - 1.0%.

8. Duration of simulation in the case of this part is about 10 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 (thickness $\Delta = 2.5$ 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 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.

6. EXPERIMENTAL VERIFICATION

In the second part of the paper it was performed and an experimental verification of the accuracy of the results obtained using the software in cylindrical coordinates. Verification was done by thermal analysis.

For this purpose it was cast a cylindrical sample. Two thermocouples were mounted inside the mold which recorded the temperature variations in two points of the part, during cooling and solidification of the alloy.

In **Figure 7** is shown the mold used for experimental verification. There are given the dimensions of the mold and casting and the thermocouples positions. The temperature in the center of part and at the middle of radius it was recorded. The part was cast in Al - Si 12% alloy.

The **Figures 8 and 9** show aspects from experiment (the mould for casting and temperature experimental registration). For verification the temperature variation curves experimentally determined were compared with those determined by simulation.

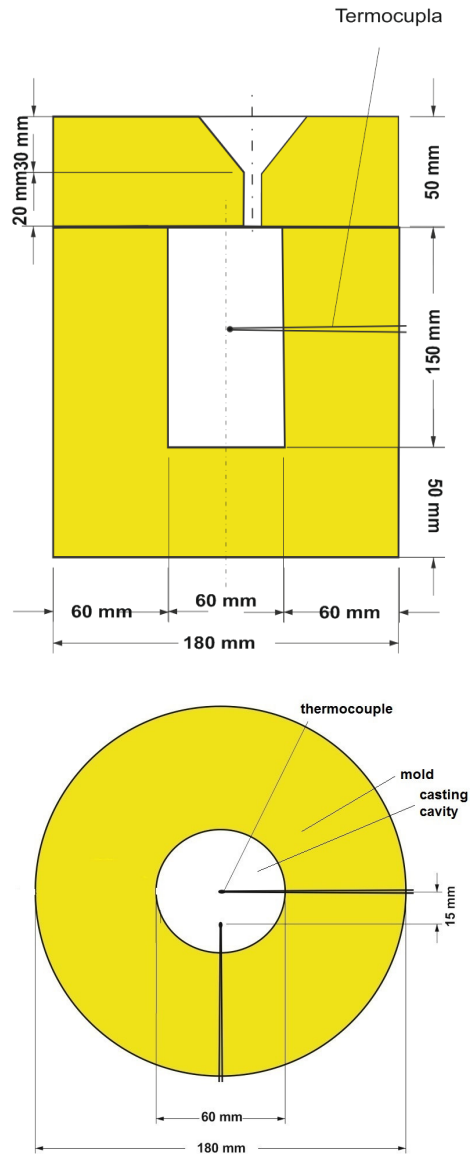


Fig. 7. Dimensiunile formei utilizate la verificarea experimentală (piesa cilindrică cu $D = 60$ mm)
Dimensions of the mold used in the experiments (cylindrical sample with $D = 60$ mm)



Fig. 8. Forma de turnare cu termocupluri
Mould with thermocouples

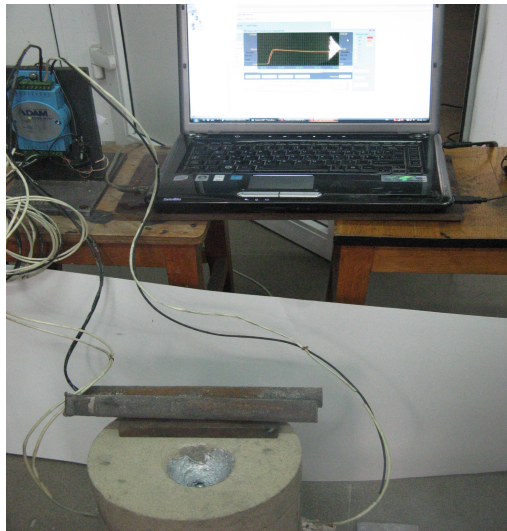


Fig. 9. Înregistrarea variației temperaturii
Registration of temperature variation

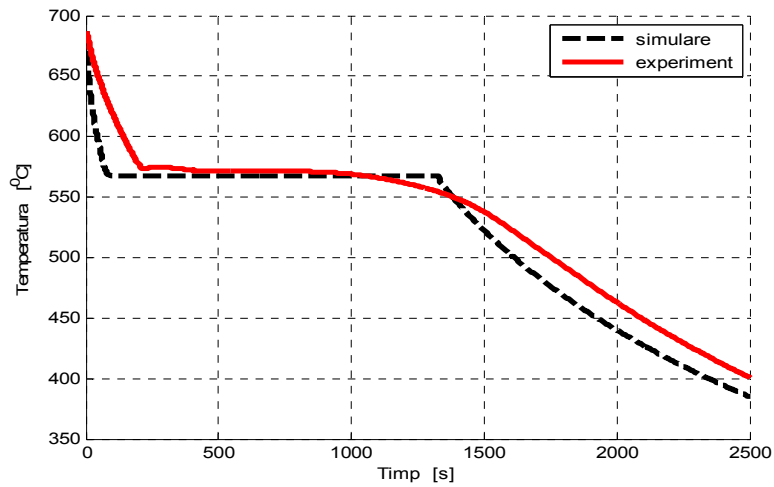


Fig. 10. Curbele de răcire experimentală și teoretică (prin simulare) pentru punctul din centrul secțiunii
Experimental and theoretical (by simulation) cooling curves in the center point of the section

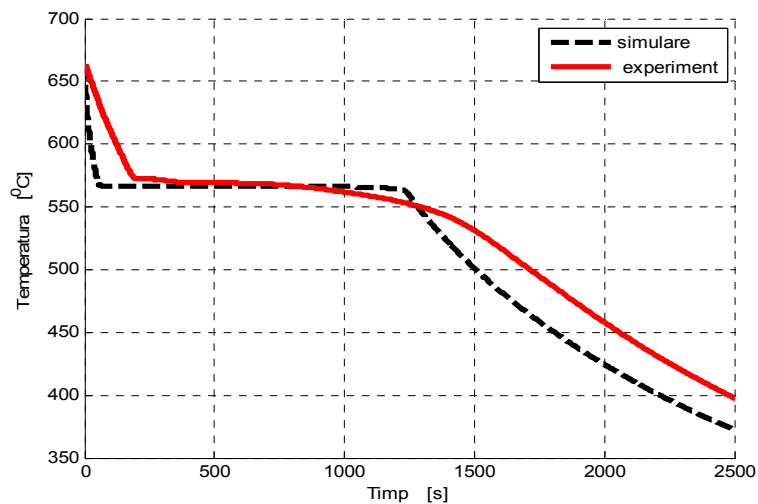


Fig. 11. Curbele de răcire experimentală și teoretică (prin simulare) pentru punctul din mijlocul razei
Experimental and theoretical (simulation) cooling curves in a point at the middle of radius

În **Figurile 10 și 11** sunt arătate curbele de variație a temperaturii determinate experimental și prin simulare pentru cele două puncte.

Aceste figuri arată o concordanța bună între rezultatele obținute prin simulare și cele experimentale. Concordanța este mai apropiată în special în zona răcirii în stare lichidă și a solidificării. Apar mici diferențe la răcirea în stare lichidă. Acestea se explică prin eventuale abateri ale valorilor caracteristicilor termofizice ale materialelor, utilizate la simulare.

In **Figures 10 and 11** are shown the curves of temperature variation determined experimentally and by simulation for the two points.

These figures show a good agreement between simulation and experimental results. Concordance is closer especially during cooling in the liquid state and during solidification. Slightly differences appear during cooling in solid state. These are explained by the possible deviations of the values used in the simulation for thermo-physical characteristics of materials.

BIBLIOGRAFIE / REFERENCES

- [1] **I. CIOBANU, S.I. MUNTEANU, A. CRIȘAN** - *Model matematic și soft 3D bazat pe metoda diferențelor finite pentru simularea solidificării pieselor turnate din aliaje eutectice*, Metalurgia, nr. 12, 2004, pag. 17- 24, ISSN 0461/9579.
- [2] **I. CIOBANU, S.I. MUNTEANU, A. CRIȘAN** - *Simularea 3D a solidificării pieselor turnate*, Editura Universității Transilvania din Brașov, Brașov (Ro), 2010, ISBN 978-973-598-678-0.
- [3] **I. IONESCU, Daniela IONESCU, I.CIOBANU, V. JIMAN** - *Mathematical Modelling of eutectic alloy cylindrical castings solidification*, Metalurgia, vol. 64, no. 8, 2012, pp. 10-20, ISSN 0461/9579.
- [4] **I. IONESCU, Daniela IONESCU, I.CIOBANU, V. JIMAN** - *Computation of the heat Exchange Coefficient in Cylindrical Coordinates Mathematical Modeling of Castings Solidification*, Recent, vol. 13, no. 3 (36) noiembrie, 2012, pp. 307-316, ISSN 1582-0246.
- [5] **V. SOPORAN, V. CONSTANTINESCU** - *Modelarea la nivel macrostructural a solidificării*, Ed. Dacia, Cluj-Napoca, 1995, ISBN 973-35-0526-9.
- [6] **D. ȘTEFĂNESCU** - *Science and Engeneering of Casting Solidification*, Departament of Material Engineering, University of Alabama, Tuscalosa, 2001, ISBN 0-306-46750-X.
- [7] **J. BAST, A. KADAUW, A. MALASCHKIN** - *Optimising of Mould Parameters for Green Sand Compaction by Computer Simulation and a New Compaction Measuring Device*, International Journal of Metalcasting, Schaumburg, Illinois, USA, Vol. 3, Issue 2, pp. 55-65.
- [8] **S.G.R. BROWN, J.A. SPITTLE** - *Computer simulation of grain growth and macrostructure development during solidification*, Materials Science and Technology, April 1989.
- [9] **D. ȘTEFĂNESCU, C. KANETKAR** - *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, 1986, pp. 255-262.
- [10] **D. ȘTEFĂNESCU** - *Macro-modeling of solidification. Numerical approximation methods*, Departament of Material Engineering, University of Alabama, Tuscalosa, 2001, pp. 94-115.
- [11] **LL. SVENSON, E. LUNDBÄCK** - *Computer simulation of the solidification of castings*, Royal Institute of Techonogy, E-MRS- Strasbourg, June 1986, pp. 57-64.
- [12] **M.M.A. RAFIQUE, J. IQBAL** - *Modeling and Simulation of Heat Transfer Phenomena During Investment Casing*, International Journal of Heat and Mass Transfer, no. 52, 2009, pp. 2132-2139.
- [13] **P.D. DESAI** - *Thermodynamic Properties of Iron and Silicon*, Journal Physic Chem. Ref. Data, vol. 15, no. 3, pp. 967-983, 1986.