

STUDY BY SIMULATION AND EXPERIMENTAL THERMAL ANALYSIS ON SOLIDIFICATION OF A PART CAST OF Al-Si-12 ALLOY

STUDIUL PRIN SIMULARE ȘI ANALIZĂ TERMICĂ EXPERIMENTALĂ PRIVIND SOLIDIFICAREA UNEI PIESE TURNATE DIN Al-Si-12

Béla VARGA, Ionuț IONESCU, Ioan CIOBANU, Tibor BEDŐ,
Aurel CRIȘAN, Sorin Ion MUNTEANU
Transilvania University of Brașov, Romania

Abstract. Software for solidification simulation of parts with rotational symmetry, using cylindrical coordinates was developed. This allows simulation of solidification in the volume of parts with rotational symmetry through 2D simulation. It was made an experimental verification of the results provided by software through thermal analysis. A cylindrical sample with diameter $D = 60$ mm and length $L = 150$ mm it was cast. The part was cast in Al-Si eutectic alloy (ATSi12). Temperature variation was recorded in three-point of the casting; in the center, at $1/2R$ and at the surface of the part. The experimental results were compared with those determined by computer solidification simulation, using software developed. The experiment revealed that the tested software provides accurate data on castings solidification.

Key words: solidification, casting, solidification simulation, Al-Si-12 alloy

1. Introduction

Software for solidification simulation of parts with rotational symmetry, cast of eutectic alloys, was done at Transilvania University of Brașov. The software is based on a 2D mathematical model with finite difference, in cylindrical coordinates. The cross section through the assembly mould - casting is divided into annular elements with 1 mm square section. The use of cylindrical coordinates has the advantage that in the case of parts with rotational symmetry, it is possible to simulate solidification in volume using 2D simulation. Therefore the duration of simulation is much smaller compared to simulation in Cartesian coordinates [1, 2]. Cylindrical coordinates have also the advantage of allowing a precise reproduction of round contour of cylindrical parts, and the system dividing into finite elements is simpler.

The software can be used for the following purposes [5, 6, 7]:

- Practical studies development on the solidification of parts with rotational symmetry;
- Casting technologies optimization for this type of parts;

Rezumat. A fost realizat un soft destinat simulării solidificării pieselor cu simetrie de rotație, care utilizează coordonate cilindrice. Acesta permite simularea solidificării în volum a pieselor cu simetrie de rotație, prin simulare 2D. A fost efectuată o verificare experimentală prin analiză termică a rezultatelor furnizate de soft. A fost turnată o piesă cilindrică de probă cu diametrul $D = 60$ mm și lungime $L = 150$ mm. Piesa a fost turnată din aliaj Al-Si (ATSi12). A fost înregistrată variația temperaturii în trei puncte ale piesei turnate, în centru, la $r = 30$ mm și la 1 mm de suprafața piesei. Rezultatele experimentale au fost comparate cu cele determinate prin simularea solidificării cu ajutorul softului realizat. Experimentul a pus în evidență că softul verificat furnizează date corecte privind solidificarea pieselor turnate.

Cuvinte cheie: solidificare, turnare, simularea solidificării, aliaj Al-Si-12

1. Introducere

La Universitatea Transilvania din Brașov a fost realizat un soft destinat simulării solidificării pieselor cu simetrie de rotație, turnate din aliaje eutectice. Softul are la bază un model matematic 2D, cu diferențe finite în coordonate cilindrice. Secțiunea transversală prin ansamblul formă – piesă turnată este divizată în elemente cilindrice inelare cu secțiuni pătrate. Utilizarea coordonatelor cilindrice prezintă avantajul că în cazul pieselor cu simetrie de rotație este posibilă simularea solidificării în volum, prin simulare 2D. Ca urmare durata efectivă a simulărilor este mult mai mică, în comparație cu simularea în coordonate carteziene [1, 2]. Coordonatele cilindrice au de asemenea avantajul că permit o reproducere precisă a conturului rotund al pieselor cilindrice, iar divizarea sistemului în elemente finite este mai simplă.

Softul se poate utiliza în următoarele scopuri [5, 6, 7]:

- pentru realizarea de studii concrete privind solidificarea pieselor cu simetrie de rotație;
- pentru optimizarea tehnologiilor de turnare a pieselor de acest tip;

- Conducting fundamental research on the influence of geometrical, constructive and technological factors on casting solidification, in order to establish general rules for designing the casting technologies for parts with rotational symmetry.

The correctness of the results provided by this software was checked by three methods:

- By comparing the results obtained with this software with the results provided by other recognized and verified software;
- Experimentally by thermal analysis;
- Experimentally by analyzing the position and size of the shrinkage inside castings.

In this paper are presented the results of the experimental verification by thermal analysis.

2. Procedure

Verification by thermal analysis was done by casting some sample parts, recording the experimental curves of temperature variation in various points of casting and comparing them with similar curves obtained by solidification simulation of casting.

Casting sample is a cylinder with diameter $D = 60$ mm and length $L = 150$ mm. The assembly casting - mold is shown in Figure 1. The part was cast of aluminum alloy - 12% silicon (ATSi12). This alloy is close to the eutectic composition of binary equilibrium diagram Al - Si. The chemical composition of the alloy used to cast the experimental samples is given in Table 1. The molds were made from sand (SiO_2) with sodium silicate binder hardened with carbon dioxide (CO_2). Three thermocouples were installed inside the molds. Thermocouples were placed at half height of the castings. Thermocouples position and points where temperature was registered during cooling and solidification of the cast alloy are also shown in Figure 1.

- pentru cercetări fundamentale privind influența factorilor geometrici, constructivi și tehnologici asupra solidificării pieselor turnate, în vederea stabilirii unor reguli generale, simplificate, de proiectare a tehnologiilor de turnare a pieselor cu simetrie de rotație.

Corectitudinea rezultatelor furnizate de acest soft a fost verificată prin trei metode:

- prin compararea rezultatelor obținute cu ajutorul lui, cu cele furnizate de alte softuri recunoscute și verificate,
- experimental, prin analiza termică;
- experimental, prin analiza poziției și dimensiunilor retasurilor din piesele turnate.

În cadrul acestei lucrări sunt prezentate rezultatele verificării experimentale prin analiză termică.

2. Mod de lucru

Verificarea prin analiză termică s-a realizat prin turnarea unor piese de probă, înregistrarea experimentală a curbelor de variație a temperaturii în diverse puncte ale piesei turnate și compararea acestora cu curbele similare obținute prin simularea solidificării pe calculator.

Piesa de probă turnată este un cilindru plin cu diametrul $D = 60$ mm și lungimea $L = 150$ mm. Forma de turnare utilizată în acest scop este arătată în figura 1. Piesa s-a turnat din aliaj aluminiu cu 12% siliciu (ATSi12). Acest aliaj este apropiat de compoziția eutectică din diagrama de echilibru binară Al - Si. Compoziția chimică a aliajului utilizat pentru turnarea probelor experimentale este dată în tabelul 1. Formele de turnare au fost executate din nisip (SiO_2) cu liant silicat de sodiu, întărit cu bioxid de carbon (CO_2). În interiorul formelor de turnare au fost montate trei termocupluri. Termocuplurile au fost plasate la jumătatea înălțimii pieselor turnate. Poziția termocuplurilor și a punctelor în care s-a înregistrat temperatura pe parcursul răcirii și solidificării aliajului turnat sunt arătate în figura 1.

Table 1. Chemical composition of the alloy cast in experimental samples

Element	Al%	Si%	Fe%	Cu%	Mn%	Mg%	Cr%	Zn%	Ti%	Pb%	Sn%	Ni%	V%
Content	87.293	9.732	0.794	0.816	0.141	0.277	0.026	0.724	0.031	0.074	0.055	0.024	0.013
Reference ATSi12		9.6-12.0	0-0.9	1.50-3.50	0-0.50	0-0.30	0-0.10	0-1.0	-	0-0.10	0-0.20	0-0.50	-

The alloying elements (the other relative to silicon) change eutectic temperature of the binary alloy Al - Si (which is $T_{E0} = 577$ °C). The relationship for calculating the theoretical eutectic temperature for industrial alloys is:

$$T_{Ecalc} = T_{E0} - (12,5/[Si]) \cdot \{(4,43[Mg] + 1,43[Fe] + 1,93[Cu] + 1,7[Zn] + 3[Mn] + 4[Ni])\}, \quad (1)$$

where:

T_{E0} - represent the eutectic temperature of thermal equilibrium in binary diagram Al-Si,

T_{Ecalc} - eutectic temperature of the alloys that contains other alloying elements,

[Mg] - concentration of alloying element (in this case magnesium).

Applying this relation it follows that the theoretical eutectic temperature of the alloy cast in the experiment is:

$$T_{Ecalc} = 577 - 12.5/9.732 \{ 4.43[0.277] + 1.43[0.794] + 1.93[0.816] + 1.7[0.724] + 3[0.141] + 4[0.024] \} = 577 - 7.3 = 569.7 \text{ } ^\circ\text{C} \approx 570 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (2)$$

unde:

T_{E0} - reprezintă temperatura eutectică din diagrama binară de echilibru termic Al-Si,

T_{Ecalc} - temperatura eutectică pentru aliajul care conține și alte elemente de aliere,

[Mg] - concentrația elementului de aliere (în acest caz magneziu).

Aplicând această relație rezultă că temperatura eutectică teoretică a aliajului turnat în cadrul experimentului este:

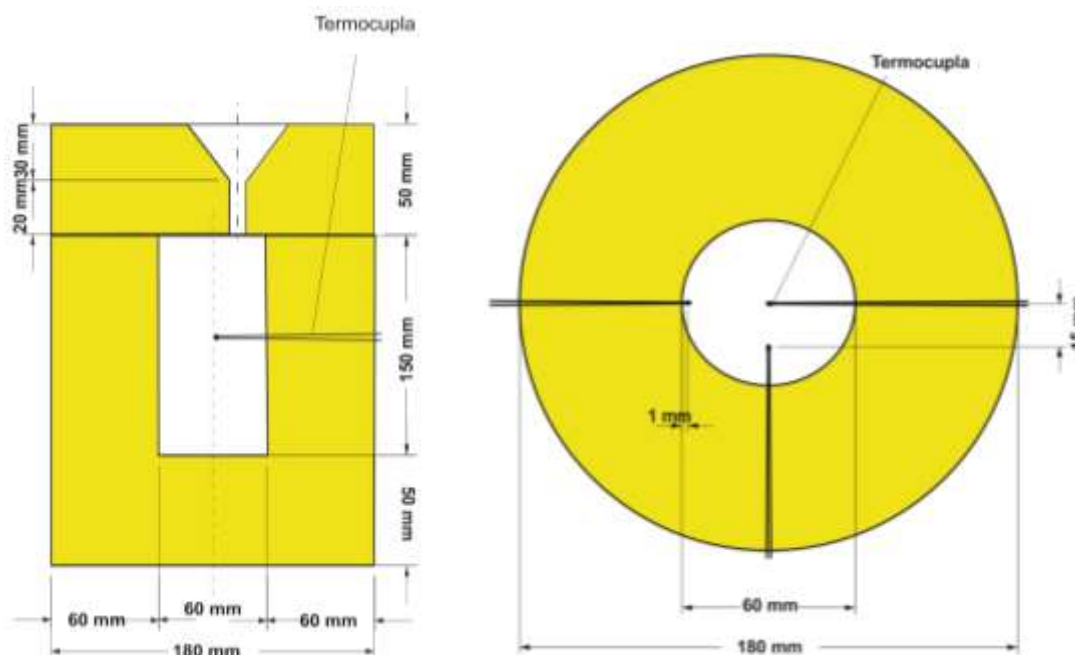


Figure 1. Dimensions of the mold used in the experiments (cylindrical sample with $D = 60$ mm and $L = 150$ mm)

3. Experimental results

Figure 2 shows aspects from experimentations. Temperature variation curves represented based on experimental measurements with thermocouples are given in Figure 3. Based on numerical values recorded by thermocouples, for each measurement point were determined: maximum temperature at starting the cooling of liquid alloy, temperature and time of beginning and ending of solidification. The values of these parameters are given in Table 2. The calculated value of eutectic temperature ($570 \text{ } ^\circ\text{C}$) is close to the corresponding values of the level on the cooling curves recorded in the three experimental determinations. The experimental curves revealed that for the alloy cast in samples the measured temperature of eutectic transformation is different in the three points. Transformation temperature measured near the interface part - mold is slightly smaller than the other two points. This can be

3. Rezultate experimentale

În figura 2 sunt arătate aspecte de la efectuarea experimentelor. Curbele de variație a temperaturii reprezentate pe baza măsurătorilor experimentale efectuate cu ajutorul termocupurilor sunt date în figura 3. Pe baza valorilor numerice înregistrate cu ajutorul termocupurilor, pentru fiecare punct de măsurare, s-a determinat temperatura maximă la momentul inițial al răcirii aliajului lichid, temperatura și timpul de început și sfârșit de solidificare. Valorile acestor mărimi sunt date în tabelul 2. Valoarea calculată a temperaturii eutectice ($570 \text{ } ^\circ\text{C}$) este apropiată de valorile corespunzătoare palierelor de pe curbele de răcire înregistrate la cele trei determinări experimentale. Curbe experimentale au pus în evidență că pentru aliajul turnat în probe, temperatura măsurată a transformării eutectice este diferită în cele trei puncte. Temperatura de transformare măsurată, în apropierea interfeței piesă -

explained by the influence of local cooling rate on subcooling at transformation, coupled with an error of positioning the thermocouple tip in the mold (distance less than 1mm to interface part- mold).

formă, este mai mică decât în celelalte două puncte. Aceasta se poate explica prin influența vitezei de răcire locală asupra subrăcirii la transformare, corelată cu o eroare de măsurare cauzată de poziționarea vârfului termocuplului în formă.



a. mold cavity



b. assembled mold



c. pouring



d. cooling curves recoding

Figure 2. Aspects from casting the experimental samples

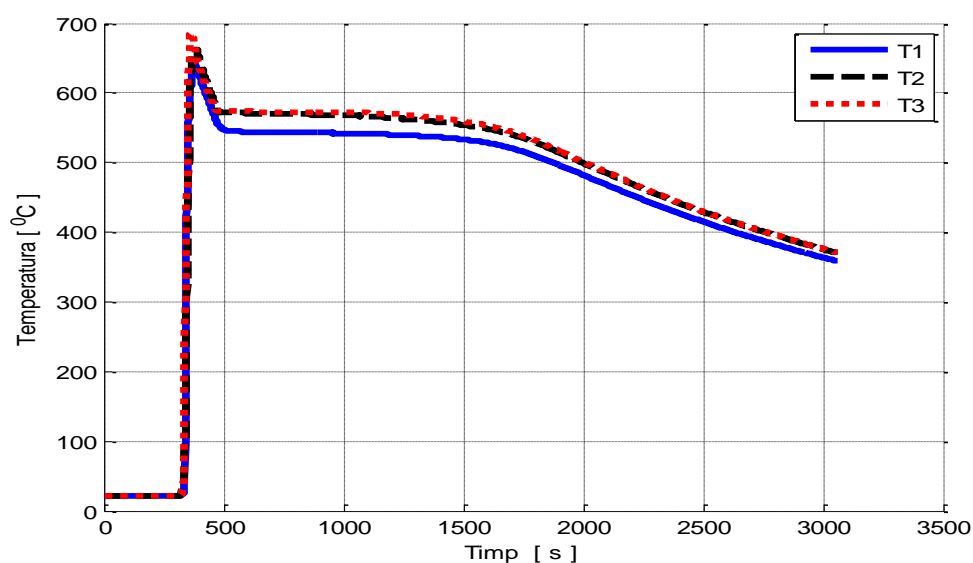


Figure 3. Temperature variation recorded by thermocouples for sample 1; T1 – point "a" located at 1 mm from the casting surface; T2 - point "b" located at 15 mm from the casting axis; T3 - point "c" located on the middle axis of the casting

Table 2. Experimental Results

No.	Measure point	Initial temperature (max.)	Cooling start time	Start solidification temperature	Experimental eutectic temperature	Start solidification time	End solidification time	Cooling in liquid state time	Solidification time
	-	T_0	t_0	T_L	T_{Exp}	t_{os}	t_{ss}	$\Delta t_L = t_{os} - t_0$	$\Delta t_s = t_{ss} - t_{os}$
	-	[°C]	[s]	[°C]	[°C]	[s]	[s]	[s]	[s]
1	a (T3)	687.519	366	573.546	567.922	586	1411	200	813
2	b (T2)	663.562	385	572.145	566.710	590	1190	205	600
3	c (T1)	638.769	384	547.331	541.310	621	1224	235	603

In Figure 4 is plotted the time dependence of the cooling rate (the derivative of temperature relative to time, for the three experimental cooling curves) determined based on experimental measurements. This is in fact the rate of alloy temperature changes (cooling rate) vs. momentary time. The moment of the solidification beginning is highlighted by positive heating rate (recalescence phenomenon). This occurs at the time of 586-590 seconds in the center of the sample (C) and in the point of the middle of radius (M). For the point placed near the part surface (curve S - 1mm surface) temperature variation is always negative. It follows that in this point the alloy cools continuously. So in this point the cooling rate in the moments preceding the solidification is higher than in the other locations (in the center and at R/2). This may explain the higher subcooling at eutectic transformation.

În figura 4 este reprezentată grafic dependența de timp a vitezei de răcire (derivata temperaturii în raport cu timpul pentru cele trei curbe de răcire experimentale) determinată pe baza măsurătorilor experimentale. Aceasta reprezintă în fapt viteza de variație a temperaturii (viteza de răcire) momentană a aliajului în raport cu timpul. Momentul începutului solidificării este pus în evidență de viteza de încălzire pozitivă (fenomenul de recalescență). Acesta apare la timpi de 586-590 secunde, pentru centrul probei (C) și pentru punctul situat la mijlocul razei (M). Pentru punctul plasat lângă suprafața piesei (curba S - la 1 mm de suprafață) variația temperaturii este tot timpul negativă. Rezultă că în acest punct aliajul se răcește încontinuu. Deci în acest punct viteza de răcire în momentele premergătoare solidificării este mai mare decât în celelalte două puncte (centru și la R/2).

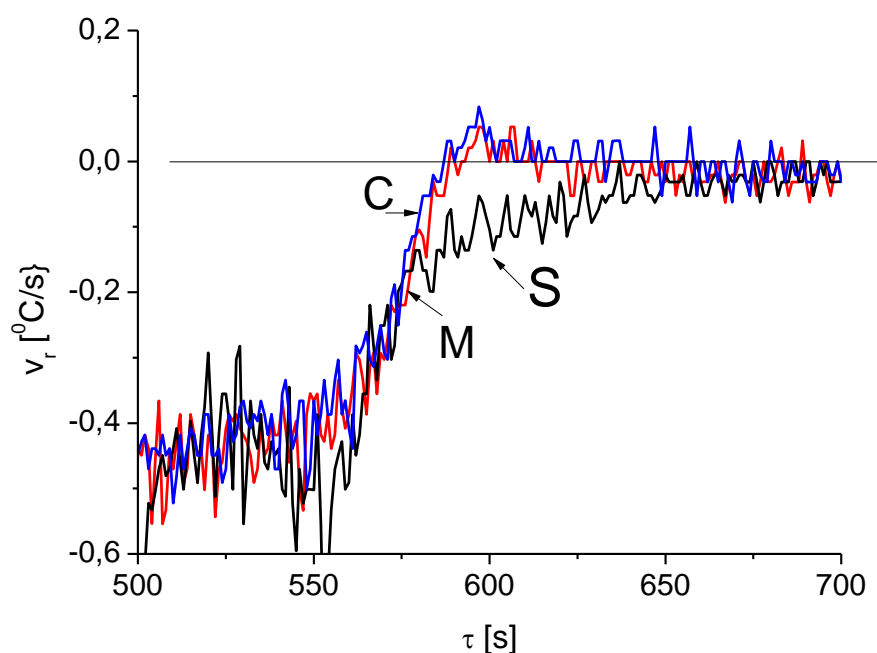


Figure 4. The first derivative of the experimental cooling curves (cooling-heating speed) recorded by thermocouples for the sample in experiment 1. (S – in point "a" located at 1mm from the casting surface; M – in point "b" located at 15 mm from the casting axis; C – in point "c" located on the middle axis of the casting)

4. Results obtained by simulation

Cooling and solidification of the experimental casting was simulated using software subject to verification. The values of the thermophysical parameters used in the simulation are given in Table 3 [8, 9]. Temperature variation curves obtained by simulation for the three points where thermocouples were installed are shown in Figure 5. For a better comparison of simulation results with experimental ones in Figures 6 ÷ 9 the curves obtained experimentally are presented next to those determined by simulation.

4. Rezultate obținute prin simulare

Răcirea și solidificarea piesei turnate experimental a fost simulată cu ajutorul softului supus verificării. Valorile mărimilor termofizice utilizate la simulare sunt date în tabelul 3 [8, 9]. Curbele de variație a temperaturii obținute prin simulare pentru cele trei puncte în care s-au montat termocupluri sunt arătate în figura 5. Se observă că ele sunt foarte apropiate. Aceasta se explică prin conductibilitatea termică foarte mare a aliajului Al - Si. Pentru o comparare mai bună a rezultatelor obținute prin simulare cu cele experimentale, în figurile 6 ÷ 9 sunt reprezentate alăturat curbele obținute prin simulare și cele determinate experimental.

Table 3. Geometrical and thermophysical characteristics used in the simulation

No.	Parameter name	Symbol	Measure unit	Value
1	Part diameter	D	m	0.06
2	Part length	L	m	0.15
3	Mold width	L_{Fo}	m	0.18
4	Mold dividing step	Δ	m	0.001
5	Time division step	τ	s	0.005
6	Environment temperature	T_{ex}	$^{\circ}C$	20
7	Coefficient of heat exchange with the environment	α_{ex}	W/m^2K	10
8	Solidus temperature of the liquid alloy	T_{sme}	$^{\circ}C$	567.92
9	Coefficient of thermal conductivity of the mould	λ_{sfo}	W/mK	0.6
10	Coefficient of thermal conductivity of the solid alloy	λ_{sme}	W/mK	200
11	Coefficient of thermal conductivity of the liquid alloy	λ_{lme}	W/mK	100
12	Specific heat of the mould	C_{sfo}	J/kgK	1000
13	Specific heat of the liquid alloy	C_{lme}	J/kgK	1200
14	Specific latent heat of the solid alloy	C_{sme}	J/kgK	1000
15	Mould density	ρ_{fo}	Kg/m^3	1550
16	Liquid alloy density	ρ_{me}	Kg/m^3	2650
17	Latent heat of solidification of the alloy	L_{me}	J/kg	545000
18	Initial temperature of the mould	T_{0fo}	$^{\circ}C$	20
19	Initial temperature of the liquid alloy	T_{0me}	$^{\circ}C$	687.52

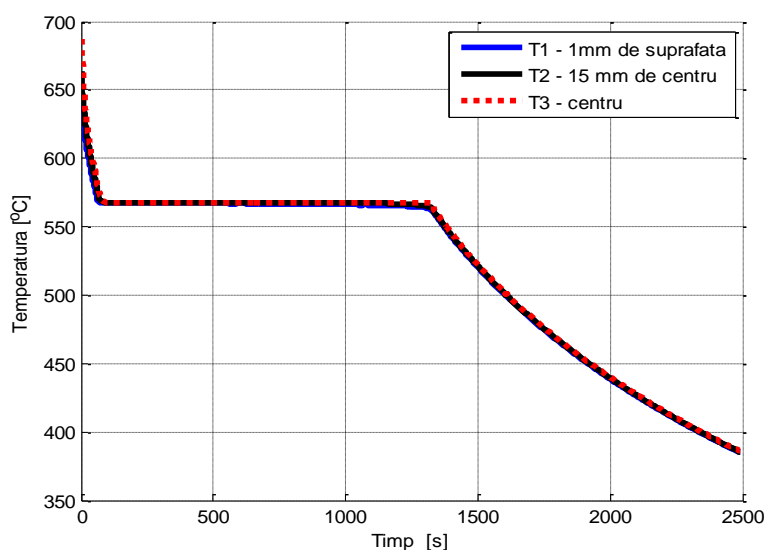


Figure 5. Temperature variation curves, determined by simulation for sample 1; T1 – point "a" located at 1mm from the casting surface; T2 - point "b" located at 15 mm from the casting axis; T3 - point "c" located on the axis of the casting

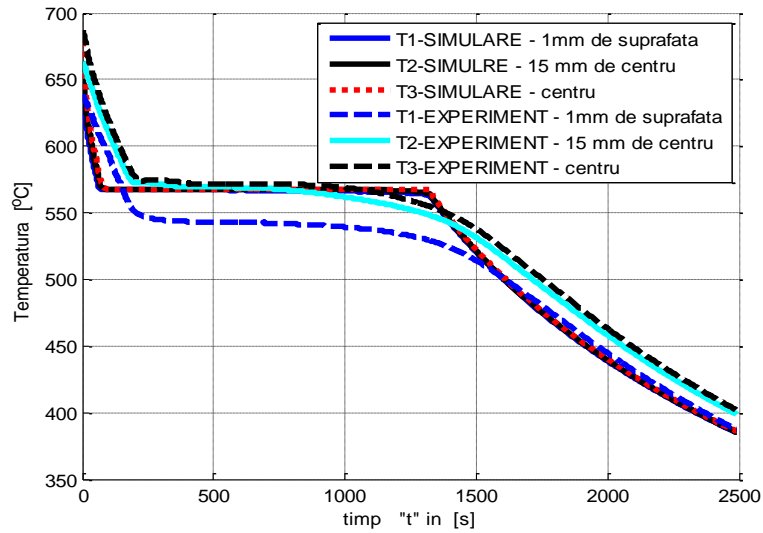


Figure 6. Temperature variation determined experimentally and by simulation for experiment 1; T1 – point "a" located at 1mm from the casting surface; T2 - point "b" located at 15 mm from the casting axis; T3 - point "c" located on the middle axis of the casting

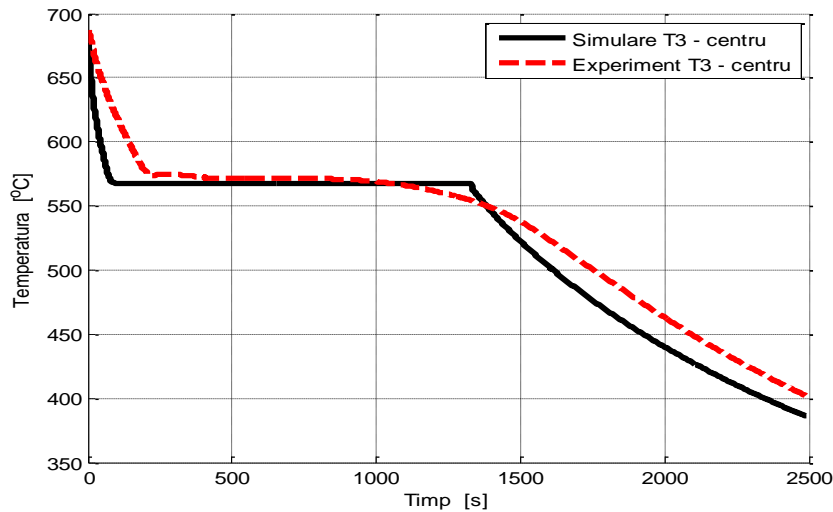


Figure 7. Experimental and theoretical cooling curves (obtained by simulation) in the center point of the section (T3)

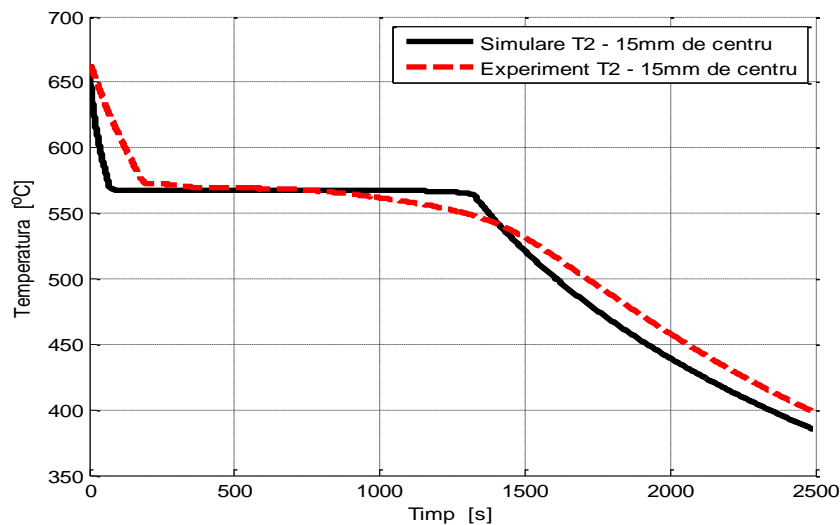


Figure 8. Experimental and theoretical cooling curves (obtained by simulation) in a point at the middle of radius (T2)

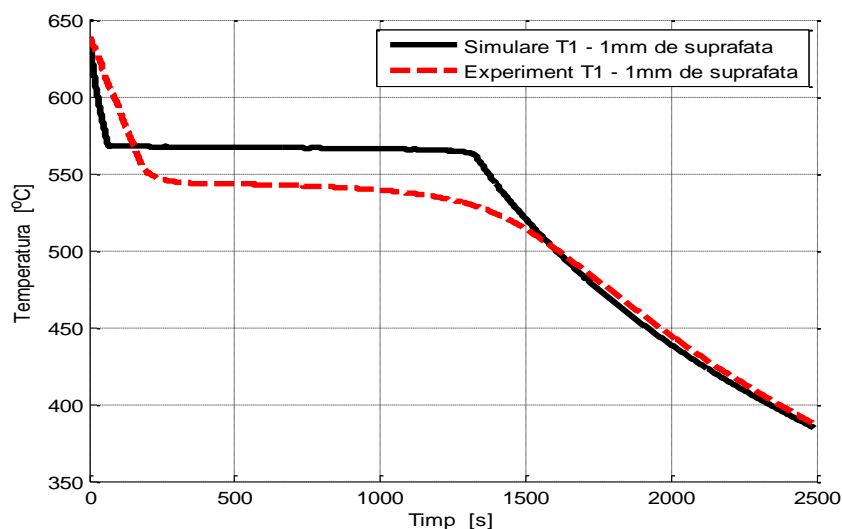


Figure 9. Experimental and theoretical cooling curves (obtained by simulation) in a point on the casting surface (T1)

5. Conclusions

Analysis of the Figures 3÷9, show a good concordance between the simulation and experimental results. Small differences occur in zone of cooling in liquid state and in the final part of the curves (cooling after complete alloy solidification). These differences can be explained by possible deviations of the values used in the simulation for thermophysical characteristics of materials. In the simulation were used averages values for thermophysical characteristics and not values variable with temperature.

In conclusion it is estimated that the checked software, provide accurate data on castings solidification (solidification time and temperature distribution). This conclusion is confirmed by other experimental and theoretical checks made for other parts or by other methods. As a result, the software in cylindrical coordinates, realized at Transilvania University of Brasov, can be used for research applications and to design casting technology of parts with symmetry of rotation.

5. Concluzii

Analiza figurilor 3÷9 arată o concordanță bună între rezultatele obținute prin simulare și cele experimentale. Apar mici diferențe în zona răcirii în stare lichidă și partea finală a curbelor, în zona răcirii după solidificarea completă a aliajului. Aceste diferențe se explică prin eventuale abateri ale valorilor utilizate la simulare, pentru caracteristicile termofizice ale materialelor. La simulare pentru mărimile termofizice respective, s-au folosit valori medii și nu valori variabile cu temperatura.

În concluzie se apreciază că softul verificat furnizează date corecte privind solidificarea pieselor turnate (timp de solidificare și repartizarea temperaturilor). Această concluzie este confirmată și de alte verificări experimentale și teoretice realizate pentru alte tipuri de piese și prin alte metode. Ca urmare, softul cu coordonate cilindrice, realizat la Universitatea Transilvania, poate fi utilizat pentru cercetări aplicative concrete în vederea proiectării de tehnologii de turnare a pieselor cu simetrie de rotație.

References

1. Ciobanu, I., Munteanu, S.I., Crișan, A.: *Mathematical model and 3D software based on finite difference method for simulation of casting solidification of eutectic alloys*. Metalurgia, ISSN 0461-9579, no. 12, 2004, p. 17-24
2. Ciobanu, I., Monescu, V., Munteanu, S.I., Crișan, A.: *Simularea 3D a solidificării pieselor turnate 3 (D simulation of casting solidification)*. Editura Universității Transilvania din Brașov, ISBN 978-973-598-678-0, Brașov, Romania, 2010 (in Romanian)
3. Ionescu, I., Ionescu, Daniela, Ciobanu, I., Jiman, V.: *Mathematical Modelling of eutectic alloy cylindrical castings solidification*. Metalurgia, ISSN 0461-9579, vol. 64, no. 8, 2012, p. 10-20
4. Ionescu, I., Ionescu, Daniela, Ciobanu, I., Jiman, V.: *Computation of the heat Exchange Coefficient in Cylindrical Coordinates Mathematical Modeling of Castings Solidification*. RECENT, ISSN 1582-0246, vol. 13(2012), no. 3(36), p. 307-316
5. Soporan, V., Constantinescu, V.: *Modelarea la nivel macrostructural a solidificării (Modeling of solidification at macro level)*. Editura Dacia, ISBN 973-35-0526-9, Cluj-Napoca, Romania, 1995 (in Romanian)
6. Soporan, V., Constantinescu, V., Crișan, M.: *Solidificarea aliajelor (Alloys solidification)*. Editura Transilvania Press, ISBN 973-9704-1-5, Cluj-Napoca, Romania, 1995 (in Romanian)
7. Ștefănescu, D.: *Science and Engeneering of Casting Solidification*. Department of Material Engineering, University of Alabama, Tuscalosa, 2001, ISBN 0-306-46750-X

8. Changrapa, K.G.: *Propriétés des phases thermiques des sables autodurcissant liés au silicate de soude*. Fonderie-Fondeur d'aujourd'hui, no. 83, 1989 (in French)
9. Pehlke, R.D., Jeyarajan, A., Wada, H.: *Summary of thermal properties of castings alloys and mold materials*. NSF and Applied Research Division USA, 1982, p. 143-160

Received in February 2015

Lucrare primită în Februarie 2015