

THE VERIFICATION BY THERMAL ANALYSIS OF THE SOFTWARE SIM – 3D

VERIFICAREA SOFTULUI SIM - 3D PRIN ANALIZĂ TERMICĂ

**Daniela IONESCU, Ioan CIOBANU, Béla VARGA, Sorin Ion MUNTEANU,
Tibor BEDŐ, Aurel CRIȘAN, Vlad MONESCU**

Transilvania University of Brașov, Romania

Abstract. The soft designed to simulate the casting solidification, created by Transilvania University of Brasov is experimentally verified and the results are presented in this paper. The verification was carried out by thermal analysis. A cubic sample part with the dimensions $40 \times 40 \times 40$ mm was cast. The temperature variation in the central points of the casting was determined through simulation and experiment. The simulation results were compared with the experimental ones. Thus, the validity of the software was confirmed.

Keywords: solidification simulation, thermal analysis, experimental verification

1. Introduction

The soft designed to simulate the casting solidification [1, 2, 3], created by Transilvania University of Brasov, imitates the solidification of casting from alloys that solidify within temperature ranges (alloys that solidify as solid solution). The software uses the finite-difference method. The mold – casting assembly is divided into cubic volume elements. The evolution of temperature and solid fraction in the casting is determined by solving the heat balance equation for each volume element. The main hypotheses underlying the software are:

- perfect contact between the volume elements of the assembly casting – mold;
- the heat transfer between the elements is done by thermal conductivity;
- an equivalent coefficient of thermal conductivity is considered (which includes the heat transfer by convection and radiation);
- the solid fraction varies linearly with temperature in the solidification interval;
- the dimensions of the volume elements are constant during cooling and solidification of the cast alloy;
- the alloy density is constant with the temperature.

The constant step of the network where the system casting-mold is divided is required for easier solving the mathematical model. It is necessary to consider a constant density to respect the laws of mass and energy conservation in the volume elements.

Rezumat. La Universitatea Transilvania din Brașov a fost realizat un soft pentru simularea solidificării pieselor turnate. Sunt prezentate rezultatele privind verificarea experimentală a acestui soft. Verificarea s-a efectuat prin analiză termică. În acest scop s-a turnat o piesă de probă, cubică, cu dimensiuni $40 \times 40 \times 40$ mm. Prin simulare și prin experiment s-a determinat variația temperaturii în centrul probei turnate. Rezultatele obținute prin simulare s-au comparat cu cele experimentale. Aceasta a confirmat validitatea softului.

Cuvinte cheie: simularea solidificării, analiză termică, verificare experimentală

1. Introducere

La Universitatea Transilvania din Brașov a fost realizat un soft pentru simularea solidificării pieselor turnate [1, 2, 3]. Acesta simulează solidificarea pieselor turnate din aliaje care se solidifică în interval de temperatură (aliaje care se solidifică sub formă de soluție solidă). Softul utilizează metoda diferențelor finite. Ansamblul formă de turnare – piesă turnată este divizat în elemente de volum cubice. Evoluția temperaturii și a fracției de solid în piesa turnată se determină prin rezolvarea ecuației de bilanț termic, pentru fiecare element de volum. Principalele ipoteze care stau la baza softului sunt:

- contact perfect între elementele de volum ale ansamblului piesa turnată – formă;
- transferul de căldură între elementele de volum se face prin conducție termică;
- este considerat un coeficient echivalent de conductibilitate termică (acesta include și transmiterea căldurii prin convecție și radiație);
- în intervalul de solidificare, fracția de solid variază liniar cu temperatura;
- dimensiunile elementelor de volum sunt constante pe parcursul răcirii și solidificării aliajului turnat;
- densitatea aliajului este constantă cu temperatura.

Pasul constant al rețelei în care este divizat sistemul piesă turnată – formă, este necesar pentru rezolvarea accesibilă a modelului matematic. Aceasta impune ca densitatea să fie considerată constantă, pentru a respecta legile conservării masei și a energiei în elementele de volum.

2. Aim of the work

The validity of the results obtained. With the help of this software have been experimentally verified through three procedures:

- analysis of the hot spots position inside the cast;
- analysis of the risers operation at casting;
- solidification thermal analysis of a sample casting.

This paper presents some research carried out by thermal analysis. To this end, the results obtained by simulation and by experiment are compared, showing the temperature evolution in the casting.

3. Working mode

An experimental part (approximately a cubic part with dimensions 40 mm) was cast. The mold used in the experiment is shown in Figures 1 and 2. The mold was made of sand and thermo-reactive resin binder (phenol formaldehyde resin). The part was cast in AlZn8 alloy. The chemical composition of the cast alloy is given in Table 1. According to the equilibrium diagram from Figure 3, this alloy solidifies in form of solid solution. The theoretical solidification interval, based on the equilibrium diagram is: $T_L = 660\text{ }^\circ\text{C}$ (liquidus temperature), $T_S = 605\text{ }^\circ\text{C}$ (solidus temperature). In the center of the casting (the height center) the temperature was measured with a thermocouple (figures 1 and 2). Figure 4 show the mold after solidification of casting sample. Figure 5 shows the installation used to measure and register the temperature.

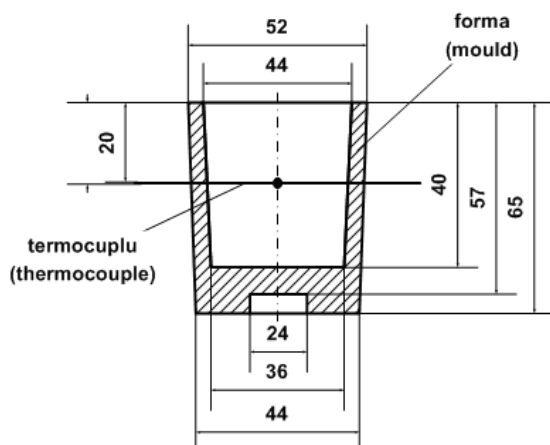


Figure 1. Dimensions of mould
Figura 1. Dimensiunile formei de turnare

2. Scopul lucrării

Validitatea rezultatelor obținute cu ajutorul acestui soft au fost verificate experimental prin trei metode:

- analiza poziției nodurilor termice în piese turnate;
- analiza funcționării maselotelor la turnarea unei piese;
- analiză termică a solidificării unei piese de probă.

În această lucrare sunt prezentate o parte din cercetările efectuate prin analiză termică. În acest scop sunt comparate rezultatele obținute prin simulare și prin experiment, privind evoluția temperaturii în piesa turnată.

3. Mod de lucru

S-a turnat o piesă de probă, apropiată de un cub cu latura de 40 mm. Forma de turnare este arătată în figurile 1 și 2. Forma de turnare este realizată din nisip cu liant rășină termoreactivă (rășină fenolformaldehidică). Piesa a fost turnată din aliaj aluminiu-zinc (AlZn8). Compoziția chimică a aliajului turnat este dată în tabelul 1. Conform diagramei de echilibru din figura 3, acest aliaj se solidifică cu formare de soluție solidă. Intervalul de solidificare teoretic, (conform cu diagrama de echilibru) este: $T_L = 660\text{ }^\circ\text{C}$ (temperatura lichidus), $T_S = 605\text{ }^\circ\text{C}$ (temperatura solidus). În centrul piesei turnate (la mijlocul înălțimii piesei) s-a măsurat temperatura cu un termocuplu (figura 1 și 2). În figura 4 este arătată proba turnată și solidificată. În figura 5 este arătată instalația utilizată pentru măsurarea și înregistrarea temperaturii.



Figure 2. Mould for thermal analysis (foto)
Figura 2. Forma de turnare pentru analiză termică (foto)

Table 1. Chemical composition of the experimentally cast alloy (AlZn8)
Tabelul 1. Compoziția chimică a aliajului turnat experimental (AlZn8)

Symbol / Simbol	Chemical element [%] / Element chimic [%]					
	Al	Zn	Si	Cu	Mg	Fe
Content / Conținut	91.52	7.8	0.48	0.6	0.4	0.2

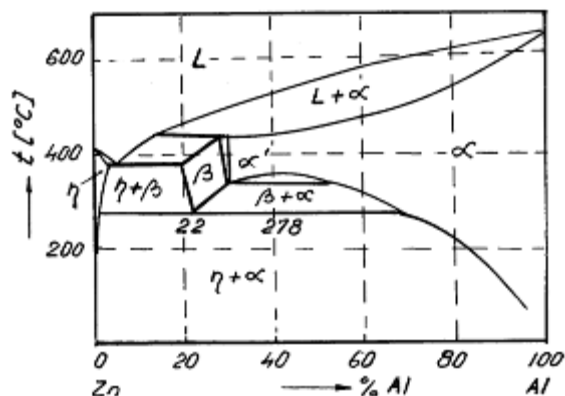


Figure 3. Zn – Al equilibrium diagram
 Figura 3. Diagrama de echilibru Zn – Al



Figure 4. Casting sample (after solidification)
 Figura 4. Proba turnată (după solidificare)



Figure 5. The equipment used for measuring and recording the temperature in casting
 Figura 5. Instalația utilizată pentru măsurarea și înregistrarea temperaturii în piesa turnată

4. Experimental results

Figure 6 shows the experimental curve of temperature variation recorded in the center of the casting. The critical temperatures and start-end times of solidification were determined by processing the experimental data. These values are given in Table 2.

4. Rezultate experimentale

În figura 6 este arătată curba experimentală a variației temperaturii în centrul piesei turnate. Prin prelucrarea datelor experimentale s-au determinat temperaturile critice și timpul real de început și sfârșit de solidificare, în acest punct. Aceste valori sunt date în tabelul 2.

Table 2. Experimental data on AlZn8 alloy solidification, in the center point of the casting sample

Tabelul 2. Date experimentale privind solidificarea aliajului AlZn8, în punctul din centrul piesei

Initial temperature Temperatura inițială	Liquidus temperature Temperatura lichidus	Solidus temperature Temperatura solidus	Solidification time Timp de solidificare
[°C]	[°C]	[°C]	[s]
722	635	~605	56.8

The real temperature for the beginning of solidification (liquidus temperature) was accurately highlighted by the experimental data. This is given by the inflection point of the temperature variation curve. The inflection point is caused by the release of the latent heat of solidification. The solidus temperature was approximately determined. This is because the inflection point that corresponds to the

Temperatura reală a începutului de solidificare (temperatura lichidus) a fost pusă în evidență cu precizie de datele experimentale. Aceasta este dată de punctul de inflexiune al curbei de variație a temperaturii. Punctul de inflexiune este cauzat de începutul degajării căldurii latente de solidificare. Temperatura solidus este stabilită cu aproximație. Aceasta, deoarece punctul de inflexiune

end of solidification is not very clear, on the experimental curve.

corespunzător sfârșitului de solidificare, nu este evident pe curba experimentală.

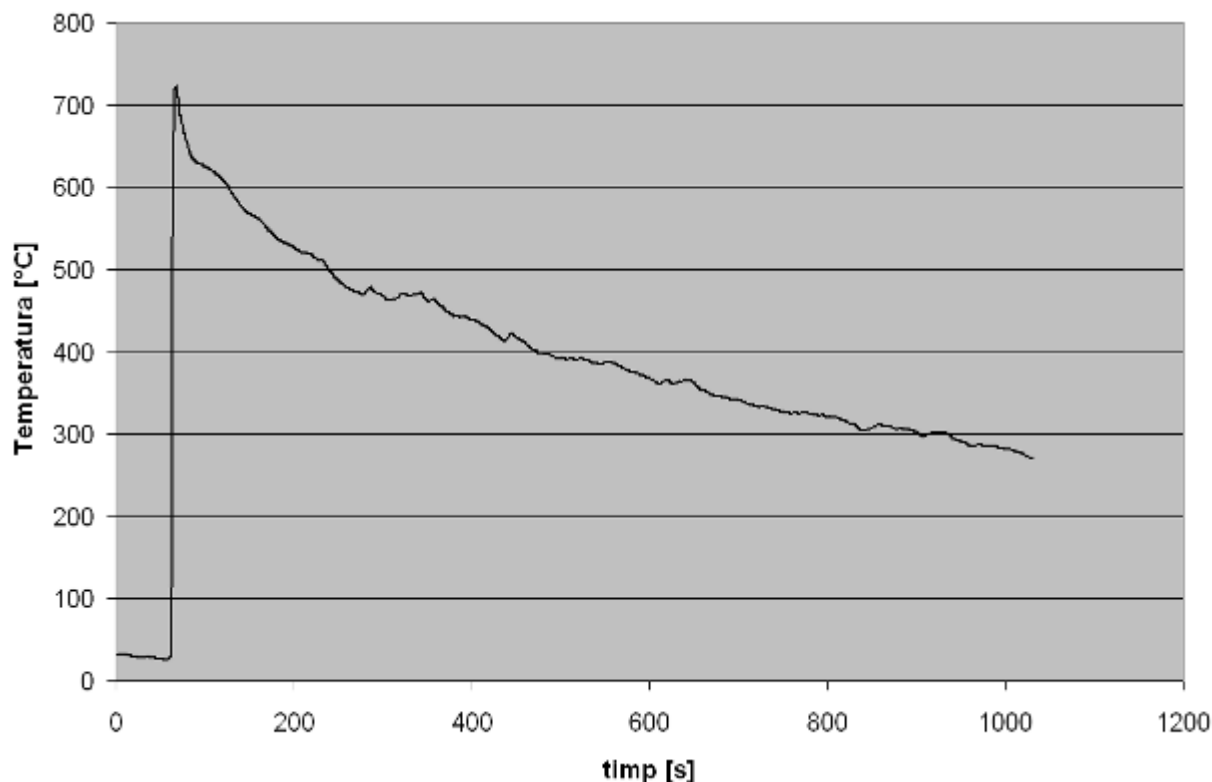


Figure 6. The temperature variation experimentally recorded in the casting center
 Figura 6. Variația temperaturii înregistrată experimental în centrul probei

5. Comparison between simulation and experiment

In order to check the software, the solidification of the casting has been simulated. The temperature variation was determined by simulation in the point where the thermocouple was placed. The simulation was performed in the similar conditions (casting temperature, mold temperature, solidus and liquidus temperature) with those highlighted by experiment. The following values have been used in simulation:

- for the cast alloy:
 - ♦ initial temperature $T_{OME} = 722 \text{ }^\circ\text{C}$;
 - ♦ solidus temperature $T_{OME} = 605 \text{ }^\circ\text{C}$;
 - ♦ liquidus temperature $T_{OME} = 635 \text{ }^\circ\text{C}$;
 - ♦ alloy density $\rho_{Me} = 2600 \text{ kg/m}^3$;
 - ♦ latent heat of solidification $L_{ME} = 370000 \text{ J/kg}$;
 - ♦ specific heat in liquid state $c_{MEL} = 1040 \text{ J/kgK}$;
 - ♦ specific heat in solid state $c_{MES} = 980 \text{ J/kgK}$;
 - ♦ thermal conductivity coefficient in liquid state $\lambda_{MEL} = 85 \text{ W/mK}$;
 - ♦ thermal conductivity coefficient in solid state $\lambda_{MES} = 200 \text{ W/mK}$.
- for the mold:

5. Comparație simulare - experiment

Pentru verificarea softului s-a simulat solidificarea piesei turnate. Prin simulare s-a determinat variația temperaturii în punctul în care a fost poziționat termocoplul. Simularea s-a realizat în condiții similare (temperatura inițială, temperatura formei, temperatura solidus și lichidus) cu cele determinate prin experiment. La simulare s-au utilizat următoarele valori:

- pentru aliajul turnat:
 - ♦ temperatura inițială $T_{OME} = 722 \text{ }^\circ\text{C}$;
 - ♦ temperatura solidus $T_{SME} = 605 \text{ }^\circ\text{C}$;
 - ♦ temperatura lichidus $T_{LME} = 635 \text{ }^\circ\text{C}$;
 - ♦ densitate $\rho_{Me} = 2600 \text{ kg/m}^3$;
 - ♦ căldura latentă de solidificare $L_{ME} = 370000 \text{ J/kg}$;
 - ♦ căldura specifică în stare lichidă $c_{MEL} = 1040 \text{ J/kgK}$;
 - ♦ căldura specifică în stare solidă $c_{MES} = 980 \text{ J/kgK}$;
 - ♦ coeficient de conductibilitate termică în stare lichidă $\lambda_{MEL} = 85 \text{ W/mK}$;
 - ♦ coeficient de conductibilitate termică în stare solidă $\lambda_{MES} = 200 \text{ W/mK}$.
- pentru forma de turnare:

- initial temperature $T_{\text{OFO}} = 24 \text{ }^\circ\text{C}$;
- mold density $\rho_{\text{FO}} = 1550 \text{ kg/m}^3$;
- specific heat $c_{\text{FO}} = 1050 \text{ J/kgK}$;
- thermal conductivity coefficient $\lambda_{\text{FO}} = 0.8 \text{ W/mK}$.

Figure 7 shows the temperature variation curve obtained by simulation (in the casting center). The results of the simulation were compared with the experimental results.

In Figure 8 the temperature variation curves obtained by simulation and those obtained by experiment are overlapped. This figure show a good correspondence between the curve obtained by simulation with that experimentally determined.

- temperatura inițială $T_{\text{OFO}} = 24 \text{ }^\circ\text{C}$;
- densitate $\rho_{\text{FO}} = 1550 \text{ kg/m}^3$;
- căldura specifică $c_{\text{FO}} = 1050 \text{ J/kgK}$;
- coeficient de conductibilitate termică $\lambda_{\text{FO}} = 0,8 \text{ W/mK}$.

În figura 7 este arătată curba de variație a temperaturii obținută prin simulare (în centrul piesei). Rezultatele obținute prin simulare s-au comparat cu cele experimentale.

În figura 8 sunt suprapuse curbele de variație a temperaturii obținute prin simulare și prin experiment. Această figură arată o apropiere bună a curbei obținută prin simulare cu aceea determinată experimental.

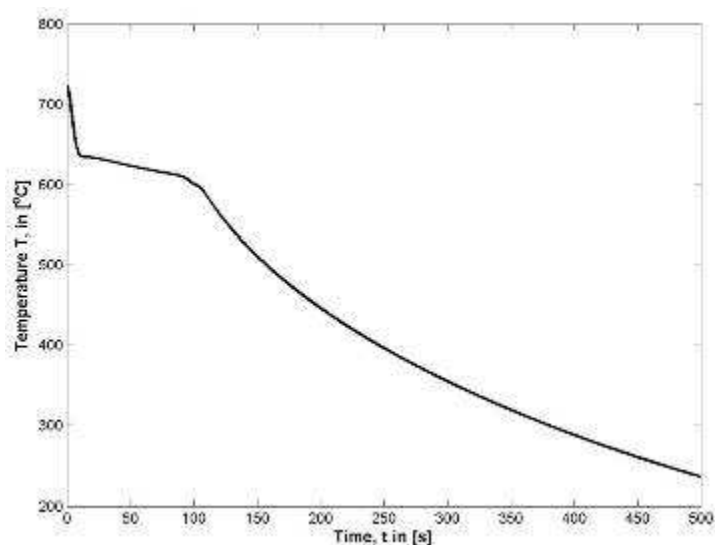


Figure 7. Temperature variation determined by simulation (in the casting center)
 Figura 7. Variația temperaturii determinată prin simulare (în centrul piesei)

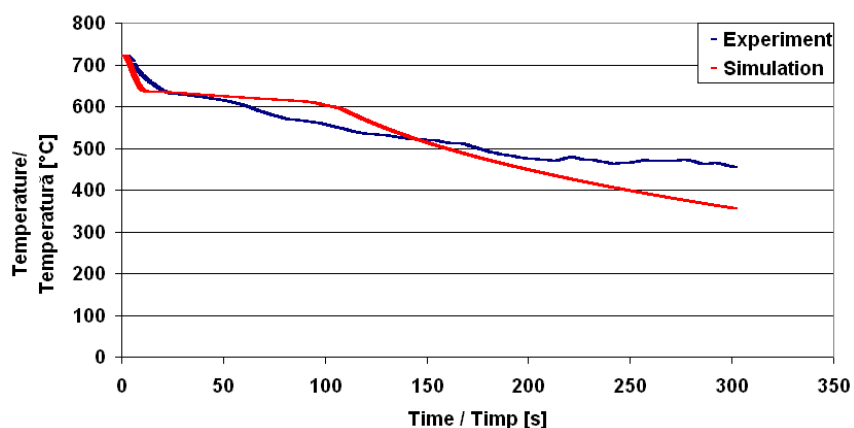


Figure 8. Comparison between the temperature variations determined by simulation and by experiment
 Figura 8. Comparație între variația temperaturii prin simulare și experiment

6. Conclusions

In order to assess the accuracy of the simulation results, Table 3 shows the temperature deviations obtained by the simulation compared

6. Concluzii

Pentru evaluarea veridicității rezultatelor obținute prin simulare, în tabelul 3 sunt date abaterile temperaturilor obținute prin simulare în

with those experimentally measured at different times. The relative deviations seem to be generally small (of the order $-4\% \div +4\%$). The higher relative deviations (of the order of $7 \div 8\%$) were obtained for the temperature of $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ (end of alloy solidification). The results in Table 3 show that the relative deviation of the temperatures obtained by simulation compared to the experiment, in the temperature range $T_0 - T_S$, are very small and negative. Under T_S (solidus temperature) the relative deviations are generally positive and also small.

The small deviations in the results obtained by simulation compared to the experiment results show that the software simulates well the alloy solidification period. This period is essential for the defects caused by alloy solidification to be revealed. In conclusion, the software SIM – 3D can be used with confidence to design and optimize the riser systems for metallic castings.

raport cu cele măsurate experimental la diverse momente. Se observă că abaterile relative sunt în general mici (de ordinul $-4 \div +4\%$). Abateri relative mai mari (de ordinul $7 - 8\%$) s-au obținut în zona temperaturii de $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ (sfârșitul solidificării aliajului), Rezultatele din tabelul 3 arată că, în intervalul de temperaturi $T_0 - T_S$, abaterea relativă a temperaturilor obținute prin simulare față de experiment este negativă și foarte mică. Sub T_S (temperatura solidus) abaterile relative sunt în general pozitive și de asemenea mici.

Abaterile mici ale rezultatelor obținute prin simulare față de experiment arată că softul simulează bine perioada de solidificare a aliajului. Acesta este intervalul determinant pentru apariția defectelor cauzate de solidificarea aliajului. Ca urmare se poate afirma că softul SIM – 3D poate fi utilizat pentru proiectarea și optimizarea sistemelor de maselotare la turnarea pieselor din aliaje metalice.

Table 3. Comparison of temperature evolution in simulation and experiment, in the casting center
Tabelul 3. Compararea evoluției temperaturii la simulare și experiment, în centrul piesei

Symbol Simbol	Time Timp	Experimental temperature Temperatura experimentală	Simulated temperature Temperatura simulată	Absolute difference of temperature (simulation against experiment) Diferența absolută de temperatură (simulare față de experiment)	Relative difference of temperature (simulation against experiment) Diferența relativă de temperatură (simulare față de experiment)
Symbol	t	T_{EXP}	T_{SIM}	$\Delta T_{ABS} =$ $= T_{SIM} - T_{EXP}$	$\Delta T_{REL} =$ $= 100 \times \Delta T_{ABS} / T_{EXP}$
u.m	s	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	%
1	4	707.546	684.090	-23.456	-3.31
2	6	688.92	661.172	-27.748	-4.03
3	10	669.708	636.497	-33.211	-4.96
4	15	648.991	634.780	-14.211	-2.19
5	20	635.424	633.827	-1.597	-0.25
7	25	629.508	632.365	+2.857	+0.45
8	30	627.313	630.645	+3.332	+0.53
9	35	623.864	628.824	+4.96	+0.79
10	40	620.874	626.991	+6.117	+0.98
12	50	613.035	623.452	+10.417	+1.70
13	55	606.889	621.777	+14.888	+2.45
14	60	600.095	620.137	+20.042	+3.34
15	70	583.706	617.122	+33.416	+5.72
16	80	569.365	614.195	+44.83	+7.87
17	90	563.825	610.584	+46.759	+8.29
18	100	554.71	601.069	+46.359	+8.36
19	110	542.711	586.111	+43.4	+8.00
20	120	533.576	563.874	+30.298	+5.68
21	130	529.311	544.349	+15.038	+2.84
22	140	521.869	526.874	+5.005	+0.96
23	150	518.712	510.954	-7.758	-1.50
24	160	511.709	496.275	-15.434	-3.02
25	170	504.873	482.619	-22.255	-4.41

References

1. Ionescu, Daniela (2014) *Cercetări privind modelarea matematică și simularea pe calculator a solidificării pieselor turnate din aliaje care se solidifică în interval de temperatură (Research on the mathematical modelling and computer simulation of the solidification of castings from alloys solidifying within a temperature interval)*. PhD thesis, Transilvania University of Braşov. 2014 (in Romanian)
2. Ionescu, D., Ionescu, I., Ciobanu, I., Monescu, V. (2013) *3D mathematical modelling of solidification of castings from alloys solidifying within a temperature interval*. Metalurgia Internaţional, ISSN 1582-2214, Issue Special no. 6, p. 105-110
3. Ciobanu, I., Ionescu, D., Monescu, V., Varga, B., Munteanu, S.I., Bedó, T., Crişan, A., Pop, M.A. (2014) *Simularea solidificării pieselor turnate din aliaje care se solidifică în interval de temperatură (Simulation of casting solidification of alloys solidifying within a temperature interval)*. Editura Universităţii Transilvania din Braşov, ISBN 978-606-19-0337-5 (in Romanian)
4. Ciobanu, I., Monescu, V., Munteanu, S.I., Crişan, A. (2010) *Simularea 3D a solidificării pieselor turnate (3D Simulation of casting solidification)*. Editura Universităţii Transilvania din Braşov, ISBN 978-973-598-678-0 (in Romanian)
5. Sahm, P., Hansen, P. (1984) *Numerical simulation and modeling of casting and solidification processes for foundry and cast-house*. Zurich, CIATF
6. Schwartz, C. (1993) *Mathematics of Solidification processes in the Casting of Metals*. Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik, 13, p. 202
7. Soporan, V., Constantinescu, V. (1995) *Modelarea la nivel macrostructural a solidificării (Macrostructural level modeling of solidification)*. Editura Dacia, Cluj-Napoca, ISBN 973-35-0526-9 (in Romanian)
8. Soporan, V., Constantinescu, V., Crişan, M. (1995) *Solidificarea aliajelor, preliminarii teoretice (Solidification of alloys, theoretical preliminaries)*. Editura Dacia, Cluj-Napoca, ISBN 973-9704-1-5 (in Romanian)
9. Soporan, V., Vamos, C., Pavai, C. (2003) *Modelarea numerică a solidificării (Numerical modeling of solidification)*. Editura Dacia, Cluj-Napoca, ISBN 973-35-1645-7 (in Romanian)
10. Ştefănescu D. (2001) *Macro-modeling of solidification. Numerical approximation methods*. Departament of Material Engineering, University of Alabama, Tuscalosa, p. 94-115

Received in February 2014

Lucrare primită în Februarie 2014