

# DETERMINAREA CONSTANTEI DE SOLIDIFICARE A PIESELOR TURNATE PRIN CALCUL ANALITIC ȘI PRIN SIMULAREA SOLIDIFICĂRII PE CALCULATOR

# DETERMINATION OF THE CASTINGS SOLIDIFICATION CONSTANT BY ANALYTICAL CALCULATION AND BY COMPUTER SOLIDIFICATION SIMULATION

Ioan CIOBANU, Mihai MAȘNIȚĂ, Vlad MONESCU  
Universitatea "Transilvania" din Brașov

**Rezumat.** Pornind de la expresia analitică a câmpului de temperatură din ansamblul formă de turnare – piesă turnată, se stabilește o relație analitică pentru calculul constantei de solidificare a pieselor turnate. Se verifică valabilitatea acestei relații comparând rezultatele obținute cu ajutorul ei, cu valorile constantei de solidificare determinate prin simularea solidificării pe calculator. Verificarea s-a efectuat pentru cazul unei plăci cu grosimea de 20 mm, turnată din fontă cenușie eutectică în forme din nisip de cuarț cu silicat de sodiu.

**Abstract.** Starting from the analytical expression of the temperature field from the mould-casting assembly it is established an analytical relation for the castings solidification constant calculation. It is verified the validity of this relation comparing the results obtained with it, with the solidification constant values determined by computer solidification simulation. The verification was made for a plate with thickness  $a = 20$  mm poured from an eutectic grey cast iron in quartz sand moulds with sodium silicate.

**Cuvinte cheie:** turnare, solidificare, modelare

**Key words:** casting, simulation, solidification

## 1. Introducere

Pentru calculul grosimii stratului solidificat al pieselor turnate în literatura de specialitate [3, 4] este menționată legea rădăcinii pătrate a solidificării, dată de relația:

$$\xi = k\sqrt{t} \quad (1)$$

unde:  $\xi$  – reprezintă grosimea stratului solidificat;  $t$  – timpul;  $k$  – constanta de solidificare.

Această relație are avantajul unei mari simplități, însă utilizarea ei este ridică probleme deoarece valorile constantei de solidificare nu sunt cunoscute. Această constantă are valori foarte diferite în funcție de natura aliajului, de natura formei de turnare și de condițiile de turnare.

Pentru calculul valorii constantei de solidificare  $k$ , în literatura de specialitate [3, 4] este dată relația:

$$\rho_L L \frac{\sqrt{\pi}}{2} k = b_S (T_{Sme} - T_C) \frac{e^{-\frac{k^2}{4a_S}}}{\operatorname{erf}\left(\frac{k}{2\sqrt{a_S}}\right)} - b_L (T_{0me} - T_{Sme}) \frac{e^{-\frac{k^2}{4a_L}}}{1 - \operatorname{erf}\left(\frac{k}{2\sqrt{a_L}}\right)}, \quad (2)$$

unde:  $\rho_L$  – reprezintă densitatea aliajului lichid,  $L$  – căldura latentă specifică a aliajului,  $b_S$  – coeficientul de acumulare a căldurii a aliajului solidificat,  $T_{Sme}$  – temperatura solidus a aliajului,  $T_C$  – temperatura de contact la interfață,

## 1. Introduction

For calculation of the castings solidified layer thickness, in the literature of this field of studies [3, 4] is mentioned the square roots law of the solidification give by relation:

where:  $\xi$  – is the solidified layer thickness;  $t$  – time;  $k$  – solidification constant.

This relation has the advantage of big simplicity, but its utilisation rise problems because the solidification constant values aren't known. This constant has very different values dependent on alloy nature, mould nature and pouring conditions.

For solidification constant values,  $k$ , in the literature of this field of studies, [3, 4] is given the relation:

where:  $\rho_L$  – the liquid alloy density;  $L$  – the specific latent heat of the alloy;  $b_S$  – the heat accumulation coefficient of the solidified alloy;  $T_{Sme}$  – solidus temperature of the alloy;  $T_C$  – the contact temperature at the interface;  $a_S$  – thermal diffusivity

$a_S$  – coeficientul de difuzibilitate termică al aliajului solidificat,  $b_L$  – coeficientul de acumulare a căldurii a aliajului lichid,  $T_{0me}$  – temperatura inițială (temperatura de turnare) a aliajului,  $a_L$  – coeficientul de difuzibilitate termică al aliajului lichid.

Această relație a fost stabilită pornind de la expresia analitică a câmpului de temperatură din forma de turnare a lui Stephan și Schwartz. Constanta de solidificare  $k$ , nu poate fi explicitată din această relație deoarece  $k$  apare atât la exponent, cât și ca argument al funcției *erf*. Calculul valorilor constantei de solidificare cu ajutorul relației (2) este dificil, rezolvarea ecuației fiind posibilă numai prin metode numerice utilizând programe de calcul specializate. Din această cauză relația (2) nu are aplicabilitate practică pentru atelierele de turnare.

Dezvoltarea programelor de simulare a solidificării pe calculator permite de asemenea să se determine valoarea constantei de solidificare pe baza relației (1) pentru orice condiții de turnare. În acest scop se determină prin simulare pe calculator timpul de solidificare al unei piese turnate în funcție de grosimea peretelui piesei și de condițiile de turnare. Utilizarea programelor de simulare a solidificării în acest scop ridică însă probleme legate de costul softului și de necesitatea unor specialiști cu grad superior de calificare în informatică.

În cazul în care timpul de solidificare „ $t_S$ ” a unei plăci cu grosime „ $a$ ” și răcire bilaterală este determinat prin simulare pe calculator, constanta de solidificare „ $k$ ” se calculează cu ajutorul relației:

$$k = \frac{\xi}{\sqrt{t_S}} = \frac{a}{2\sqrt{t_S}} \quad (3)$$

## 2. Determinarea relației analitice pentru calculul constantei de solidificare

În lucrări anterioare [1], s-a prezentat o metodă analitică pentru calculul timpului de solidificare a pieselor turnate cu grosime finită „ $a$ ” și răcire bilaterală. Timpul de solidificare „ $t_S$ ” pentru plăcile cu grosime finită și răcire bilaterală este dat de relația:

$$t_S = \frac{\pi \cdot \rho_L^2 \cdot a^2 [c_L \cdot (T_{0me} - T_{Sme}) + L]^2}{16\lambda_f \cdot c_f \cdot \rho_f (T_c - T_{0f})^2}, \quad (4)$$

unde:  $a$  - reprezintă grosimea plăcii;  $T_{0me}$  – temperatura inițială a aliajului lichid;  $T_{Sme}$  – temperatura

coefficient of the solidified alloy;  $b_L$  – the heat accumulation coefficient of the liquid alloy;  $T_{0me}$  – the initial temperature of the liquid alloy (pouring temperature);  $a_L$  – the thermal diffusivity coefficient of the liquid alloy;

This relation was established starting from the Stephan-Swartz's analytical expression of the temperature field from the mould. The solidification constant  $k$ , can't be deduced (explicit) from this relation, because  $k$  appear at the exponent, and also like argument of the *erf* function. Solidification constant values calculation with relation (2) is difficult, resolution of this relation can be possible only by mathematical methods using specially programs for calculation. From this reason the relation (2) hasn't practical applicability for the pouring shops.

Computer solidification simulation programs development, permit also to determine the solidification constant values based on relation (1) for any pouring conditions. In this purpose it is determined by computer simulation the casting solidification time dependent on casting thickness pouring conditions. Using this kind of programs in this purpose rise problems with reference to software costs and necessity of some specialists with high qualification in informatics.

When the solidification time „ $t_S$ ” of a plate with thickness and bilateral cooling is determined by simulation, the solidification constant „ $k$ ” is calculated with relation:

## 2. Determination of the analytical relation for solidification constant calculation

In previous papers [1], we presented an analytical method for solidification time calculation of castings with finite thickness „ $a$ ” and bilateral cooling. The solidification time „ $t_S$ ” for plates with finite thickness „ $a$ ” and bilateral cooling is gave by relation:

where:  $a$  – the castings thickness;  $T_{0me}$  – the initial temperature of the liquid alloy;  $T_{Sme}$  – solidus

solidus a aliajului;  $T_{0f}$  – temperatura inițială a formei;  $T_c$  – temperatura de contact la interfața aliaj lichid-formă;  $L$  – căldura specifică latentă de solidificare a aliajului;  $c_L$  – căldura specifică a aliajului lichid;  $\rho_L$  – densitatea aliajului lichid;  $\rho_f$  – densitatea formei;  $\lambda_f$  – coeficientul de conductibilitate termică a formei;  $c_f$  – căldura specifică a formei.

La stabilirea relației (4) s-a considerat că solidificarea plăcilor cu grosime finită "a" și răcire bilaterală se termină când fronturile de solidificare care pornesc de la cele două suprafețe ale piesei parcurg distanța  $a/2$ , întâlnindu-se pe axa plăcii.

Această relație a fost stabilită pornind de la bilanțul termic între căldura cedată de piesa turnată până la solidificarea completă  $Q_{ced}$  și căldura preluată de formă  $Q_f$  în acest timp. Căldura preluată de formă  $Q_f$  s-a calculat pornind de la expresia analitică a câmpului de temperatură în forma de turnare, stabilită de Stephan și Schwartz [3, 4] care este determinată în condițiile următoarelor ipoteze:

- suprafața de contact dintre piesa turnată și forma de turnare este plană și infinită;
- grosimea pereților formei este infinită;
- grosimea piesei turnate este finită și egală cu "a";
- temperatura inițială a aliajului lichid este uniformă ( $T_{0me}$ );
- temperatura inițială a peretelui formei este uniformă ( $T_{0f}$ );
- aliajul se solidifică la temperatură constantă ( $T_{Sme}$  – metal pur sau aliaj eutectic);
- forma se umple cu aliaj lichid instantaneu (timpul de umplere este zero);
- la interfața metal-formă se stabilește din primul moment, o temperatură de contact inițial ( $T_c$ ), care rămâne constantă până la solidificarea completă a piesei;
- caracteristicile termofizice ale aliajului lichid ( $\lambda_L$ ,  $c_L$ ,  $\rho_L$ ), ale aliajului solidificat ( $\lambda_S$ ,  $c_S$ ,  $\rho_S$ ) și ale formei ( $\lambda_f$ ,  $c_f$ ,  $\rho_f$ ) nu variază cu temperatura;
- transmisia căldurii în sistemul aliaj-formă are loc numai prin conducție, conform ecuației lui Fourier;
- transmisia căldurii se face unidirecțional, perpendicular pe interfața metal-formă;
- la momentul solidificării complete se neglijează gradientul de temperatură în piesa turnată.

Căldura masică cedată de piesă s-a calculat în funcție de căldura specifică masică ( $c_L$ ) și căldura latentă specifică ( $L$ ), neglijându-se gradientul de temperatură din piesa turnată la momentul solidificării. Cercetările prin simularea solidificării pe calculator au pus în evidență că gradientul de temperatură în piesa turnată în

temperature of the alloy;  $T_{0f}$  – initial temperature of the mould;  $T_c$  – the contact temperature at the liquid alloy-mould interface;  $L$  – the specific latent heat of the alloy;  $c_L$  – the specific heat of the liquid alloy;  $\rho_L$  – the liquid alloy density;  $\rho_f$  – mould density;  $\lambda_f$  – mould thermal conductivity coefficient;  $c_f$  – mould specific heat.

At relation (4) establishment was considered that the solidification of the plates with finite thickness "a" and bilateral cooling is ending when the solidification fronts, which starts from those two casting surfaces, transits distance  $a/2$ , and meeting on, plate axis.

This relation was established starting from the thermal balance between the transferred heat by the casting until complete solidification  $Q_{ced}$  and the absorbed heat by the mould  $Q_f$  in this time. The absorbed heat  $Q_f$  was calculated starting from analytical expression of the temperature field in mould, established by Stephan and Swartz [3, 4], which is determined in the conditions of the next hypothesis:

- the contact surface between the casting and mould is plane and infinite (unlimited);
- the casting thickness is infinite;
- the casting thickness is finite and equal with "a";
- the initial temperature of the liquid alloy is steady ( $T_{0me}$ );
- the initial temperature of the mould wall is steady ( $T_{0f}$ );
- the alloy is solidifying at constant temperature ( $T_{Sme}$  – pure metal or eutectic alloy);
- the mould fills instantly with the liquid alloy (the filling time is zero);
- at the metal-mould interface is established from the first moment a initial contact temperature ( $T_c$ ) which remains constant until a complete solidification of the casting;
- thermophysical characteristics of the liquid alloy ( $\lambda_L$ ,  $c_L$ ,  $\rho_L$ ), of the solidified alloy ( $\lambda_S$ ,  $c_S$ ,  $\rho_S$ ) and of the mould ( $\lambda_f$ ,  $c_f$ ,  $\rho_f$ ) isn't varied with the temperature;
- the heat transfer in the casting - mould system is only through conduction by Fourier equation;
- the heat transfer is made unidirectional, perpendicular on the metal-mould interface;
- at the complete solidification moment the temperature gradient in the casting is neglected.

The transferred heat by casting was calculated dependent on specific heat ( $c_L$ ) and the specific latent heat ( $L$ ), neglecting the temperature gradient from casting at solidification moment. Researches by computer solidification simulation put in evidence that the temperature gradient in

momentul solidificării este foarte mic, datorită conductibilității termice mari a aliajelor metalice. Ca urmare neglijarea gradientului de temperatură din piesa turnată la calculul căldurii cedată de piesă până la solidificare se justifică.

Temperatura de contact inițial ( $T_c$ ) este dată de relația [3, 4]:

$$T_c = \frac{T_{Sme}}{1 + \frac{b_f}{b_s} \operatorname{erf} \frac{k}{2\sqrt{a_s}}}, \quad (5)$$

unde  $T_{Sme}$  reprezintă temperatura de solidificare a aliajului;  $b_f$  și  $b_s$  reprezintă coeficientul de acumulare a căldurii al formei și respectiv al aliajului în stare solidă,  $k$  – constanta de solidificare a aliajului,  $a_s$  – coeficientul de difuzibilitate termică a aliajului solidificat, iar  $\operatorname{erf}(x)$  – funcția erorilor a lui Gauss.

Deoarece  $b_f \ll b_s$ , iar funcția erorilor a lui Gauss ( $\operatorname{erf} x$ ) are valori subunitare, numitorul fracției din relația (5) are valori foarte apropiate de „1”, astfel că se poate considera că  $T_c \approx T_{Sme}$ .

Relația (4) stabilită anterior [1, 2] pentru calculul timpului de solidificare a unei plăci permite să se deducă o relație analitică simplificată pentru calcul constantei de solidificare. Considerând că la momentul solidificării plăcii grosimea stratului solidificat este  $\xi = a/2$ , relația (4) se pune sub forma:

$$\xi = \frac{a}{2} = \frac{2\lambda_f \cdot c_f \cdot \rho_f \cdot (T_c - T_{0f})}{\sqrt{\pi} \cdot \rho_L \cdot [c_L \cdot (T_{0me} - T_{Sme}) + L]} \cdot \sqrt{t_S}. \quad (6)$$

De aici se deduce relația de calcul a constantei de solidificare:

$$k = \frac{2\lambda_f \cdot c_f \cdot \rho_f \cdot (T_c - T_{0f})}{\sqrt{\pi} \cdot \rho_L \cdot [c_L \cdot (T_{0me} - T_{Sme}) + L]}. \quad (7)$$

### 3. Verificarea valabilității relației de calcul a constantei de solidificare

Pentru a verifica valabilitatea acestei relații, s-au calculat cu ajutorul ei, valorile constantei de solidificare pentru cazul turnării unei plăci cu grosimea  $a = 20$  mm, din fontă cenușie eutectică cu temperaturi de turnare diferite. Valorile obținute prin calcul s-au comparat cu valorile constantei de solidificare determinate prin simularea solidificării pe calculator. În figura 1 este prezentată secțiunea transversală prin ansamblul formei de turnare pentru care s-a efectuat simularea solidificării. În tabelul 1 sunt date valorile mărimilor termofizice ale aliajului lichid și ale formei, luate în

casting in solidification moment is very small because the thermal conductivity of the alloys is big. So the hypothesis of the neglected temperature gradient from the casting at the calculation of the transferred heat until solidification is justified.

The initial contact temperature ( $T_c$ ) is given by relation [3, 4]:

where:  $T_{Sme}$  – the alloy solidification temperature;  $b_f$  and  $b_s$  – represents the heat accumulation coefficient of the mould and of the alloy in solid state;  $k$  – the solidification constant of the alloy;  $a_s$  – thermal diffusivity of the solidified alloy;  $\operatorname{erf}(x)$  – Gauss’s function of errors.

Because  $b_f \ll b_s$ , and Gauss’s function of errors ( $\operatorname{erf} x$ ) has sub unitary values and the denominator from relation (5) has very close values to „1”, so it can be considered that  $T_c \approx T_{Sme}$ .

The relation (4) established above [1, 2] for solidification time calculation for a plate permit to deduce a simplified analytical relation for solidification constant calculation. Considering that at the solidification moment of a plate, the solidified layer thickness is  $\xi = a/2$ , relation (4) becomes:

From here can be deduced the relation of the solidification constant calculation:

### 3. Validity verification of the relation for solidification constant calculation

To verify the validity of this relation, was calculated with it the solidification constant values for pouring case of a plate with thickness  $a = 20$  mm from eutectic grey cast iron with different pouring temperature. The values obtained by calculation where compared with values determined by computer solidification simulation. In figure no.1 is presented the transversal section trough the mould for which we made the simulation. The thermophysical amounts values of the liquid alloy and of the mould used for simulation and for solidification constant

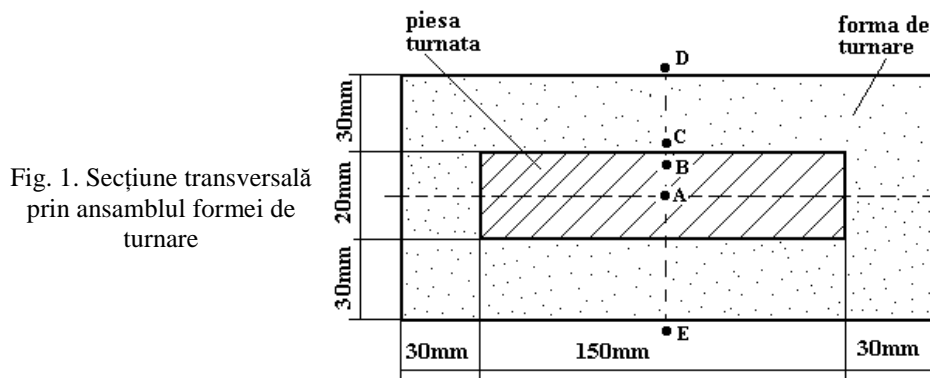


Fig. 1. Secțiune transversală prin ansamblul formei de turnare

Fig. 1. Mould assembly cross section

considerare la calculul constantei de solidificare, cât și la simularea solidificării. În tabelul 2 sunt date valorile constantei de solidificare „ $k$ ” calculate analitic cu ajutorul relației (7).

De asemenea sunt date valorile constantei de solidificare calculate cu ajutorul relației (3) pe baza

calculation are gave in table no.1. The solidification constant values „ $k$ ” calculated analytically with relation (7) are presented in table no.2.

Also is gave the solidification constant values calculated with relation (3) on base of the

Tabelul 1. Valorile mărimilor termofizice utilizate ca date inițiale pentru calculul constantei de solidificare (fontă cenușie eutectică turnată în forme din nisip cu silicat de sodiu)

Nr. crt.	Denumirea mărimii	Simbol	Unitatea de măsură	Valoare
1.	Densitatea materialului formei	$\rho_f$	kg/m <sup>3</sup>	1550
2.	Densitatea aliajului turnat	$\rho_{me}$	kg/m <sup>3</sup>	6700
3.	Căldura specifică a materialului formei	$c_f$	J/kgK	1170
4.	Căldura specifică a aliajului în stare lichidă	$C_{Lme}$	J/kgK	850
5.	Căldura specifică a aliajului în stare solidă	$C_{Sme}$	J/kgK	750
6.	Temperatura inițială a formei	$T_{0f}$	°C	20
7.	Temperatura inițială a aliajului lichid	$T_{0me}$	°C	1150-1400
8.	Căldura latentă specifică de solidificare a aliajului turnat	$L_{me}$	J/kg	250000
9.	Temperatura mediului exterior	$T_{ex}$	°C	20
10.	Coeficientul de schimb de căldură între formă și mediul exterior	$\alpha_{ex}$	W/m <sup>2</sup> K	10
11.	Coeficientul de conductibilitate termică în stare solidă a aliajului turnat	$\lambda_{Sme}$	W/mK	40
12.	Coeficientul de conductibilitate termică în stare lichidă a aliajului turnat	$\lambda_{Lme}$	W/mK	30
13.	Coeficientul de conductibilitate termică a formei de turnare	$\lambda_f$	W/mK	0,55
14.	Temperatura de solidificare a aliajului	$T_{Sme}$	°C	1150

Table 1. Thermophysical characteristics values used as initial data for solidification time determination (plate from eutectic cast grey iron)

Crt. no.	Values name	Symbol	Unit of measure	Value
1.	The density of mould material	$\rho_f$	kg/m <sup>3</sup>	1550
2.	The density of alloy	$\rho_{me}$	kg/m <sup>3</sup>	6700
3.	The specific heat of the mould material	$c_f$	J/kgK	1170
4.	The specific heat in the liquid state of the alloy	$C_{Lme}$	J/kgK	850
5.	The specific heat in the solid state of the alloy	$C_{Sme}$	J/kgK	750
6.	The initial temperature of the mould	$T_{0f}$	°C	20
7.	The initial temperature of the liquid alloy	$T_{0me}$	°C	1150-1400
8.	The specific latent heat of the solidification of the liquid alloy	$L_{me}$	J/kg	250000
9.	The temperature of the environment	$T_{ex}$	°C	20
10.	The heat transfer coefficient between the mould and environment	$\alpha_{ex}$	W/m <sup>2</sup> K	10
11.	The thermal conductivity coefficient in the solid state of the alloy	$\lambda_{Sme}$	W/mK	40
12.	The thermal conductivity coefficient in the liquid state of the alloy	$\lambda_{Lme}$	W/mK	30
13.	The thermal conductivity coefficient of the mould	$\lambda_f$	W/mK	0.55
14.	The solidification temperature of the alloy.	$T_{Sme}$	°C	1150

Tabelul 2. Valorile constantei de solidificare calculate analitic și determinate prin simularea solidificării pe calculator (placă cu grosimea  $a = 20$  mm din fontă cenușie eutectică turnată în forme din nisip cuarțos și silicat de sodiu întărit cu  $\text{CO}_2$ )

Nr. crt.	Temperatura inițială a aliajului lichid	Supraîncălzirea aliajului lichid	Constanta de solidificare calculată analitic	Constanta de solidificare determinată prin simulare	Abateră relativă față de simulare
Simbol	$T_{0me}$	$\Delta T = T_{0me} - T_{Sme}$	$(k)_C$	$(k)_S$	$\Delta k_{rel} = 100 \cdot (k_C - k_S) / k_S$
U.M.	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$\text{m/s}^{1/2}$	$\text{m/s}^{1/2}$	%
1	1150	0	$7,60 \cdot 10^{-4}$	$7,39 \cdot 10^{-4}$	+2,84
2	1200	50	$6,50 \cdot 10^{-4}$	$6,43 \cdot 10^{-4}$	+1,09
3	1250	100	$5,67 \cdot 10^{-4}$	$5,71 \cdot 10^{-4}$	-0,70
4	1300	150	$5,03 \cdot 10^{-4}$	$5,16 \cdot 10^{-4}$	-2,52
5	1350	200	$4,52 \cdot 10^{-4}$	$4,72 \cdot 10^{-4}$	-4,24
6	1400	250	$4,11 \cdot 10^{-4}$	$4,37 \cdot 10^{-4}$	-5,95

 Table 2. Solidification time values obtained by analytical calculation and by computer simulation dependent on pouring temperature (plate with thickness  $a = 20$  mm from eutectic grey cast iron)

Crt. no.	The initial temperature of the alloy	Alloys overheat	Solidification constant calculated analytically	Solidification constant calculated by simulation	Relative deviation towards simulation
Symbol	$T_{0me}$	$\Delta T = T_{0me} - T_{Sme}$	$(k)_C$	$(k)_S$	$\Delta k_{rel} = 100 \cdot (k_C - k_S) / k_S$
U.M.	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$\text{m/s}^{1/2}$	$\text{m/s}^{1/2}$	%
1	1150	0	$7.60 \cdot 10^{-4}$	$7.39 \cdot 10^{-4}$	+2.84
2	1200	50	$6.50 \cdot 10^{-4}$	$6.43 \cdot 10^{-4}$	+1.09
3	1250	100	$5.67 \cdot 10^{-4}$	$5.71 \cdot 10^{-4}$	-0.70
4	1300	150	$5.03 \cdot 10^{-4}$	$5.16 \cdot 10^{-4}$	-2.52
5	1350	200	$4.52 \cdot 10^{-4}$	$4.72 \cdot 10^{-4}$	-4.24
6	1400	250	$4.11 \cdot 10^{-4}$	$4.37 \cdot 10^{-4}$	-5.95

valorilor timpului de solidificare determinate prin simulare pe calculator pentru aceeași placă. În ultima coloană a tabelului 2 sunt date abaterile relative ale valorilor calculate analitic ale constantei de solidificare, în raport cu valorile determinate prin simulare.

Abaterile relative (în %) s-au calculat pe baza relației:

$$\Delta k_{rel} = \frac{(k)_C - (k)_S}{(k)_S} \cdot 100, \quad (8)$$

unde:  $(k)_C$  reprezintă valoarea constantei de solidificare determinată analitic, iar  $(k)_S$  - valoarea constantei de solidificare determinată prin simularea solidificării pe calculator.

Valorile constantei de solidificare au fost calculate pentru diverse temperaturi inițiale  $T_{0me}$  ale aliajului lichid. În figura 2 este reprezentată grafic dependența constantei de solidificare determinate

solidification time values determined by computer simulation for the same plate. In the last column of the table no. 2 is gave the relative deviation of the values calculated analytically of the solidification constant in ratio with the values determined by simulation.

The relative deviations (in %) was calculated with relation:

where:  $(k)_C$  - is the solidification constant value determined analytically, and  $(k)_S$  - the solidification constant value determined by computer simulation.

The solidification constant values were calculated for diverse initial temperature  $T_{0me}$  of the liquid alloy. In the figure no.2 is presented the solidification constant dependency determined by those two methods dependent on initial temperature

Fig. 2. Valoarea constantei de solidificare determinată analitic și prin simularea solidificării pe calculator în funcție de temperatura de turnare (placă din fontă cenușie eutectică)

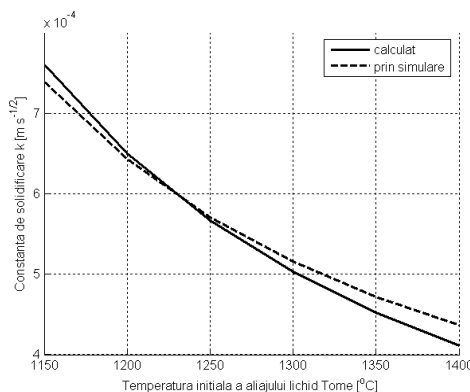


Fig. 2. Calculated and determined solidification time by computer solidification simulation dependent on pouring temperature (plate from eutectic grey cast iron with thickness  $a = 20$  mm) (horizontal axis - initial temperature of the liquid alloy  $T_{0me}$ ; vertical axis - solidification time,  $t_S$ ; continuous line - calculated; interrupt line - simulated)

prin cele două metode în funcție de temperatura inițială (temperatura de turnare) a aliajului lichid. În figura 3 este reprezentată grafic influența temperaturii de turnare a aliajului lichid, asupra abaterilor relative ale valorilor constantei de solidificare calculate analitic, în raport cu valorile determinate prin simulare.

Fig. 3. Abaterea relativă a valorilor constantei de solidificare calculate analitic față de valorile determinate prin simularea solidificării, în funcție de temperatura de turnare

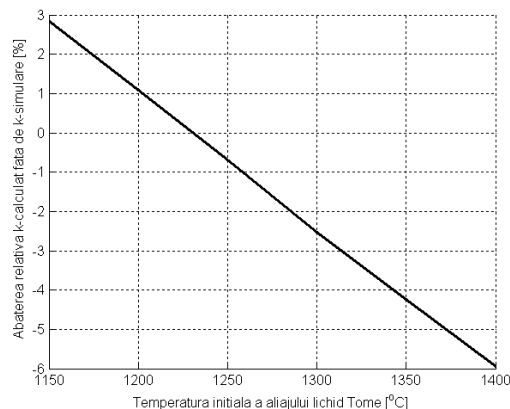


Fig. 3. Relative deviation of the solidification constant calculated analytically towards those determined by solidification simulation dependent on initial pouring temperature. (plate from eutectic grey cast iron with thickness  $a = 20$  mm) (horizontal axis – initial temperature of the liquid alloy,  $T_{ome}$ ; vertical axis – relative deviation, calculated)

Analizând rezultatele din tabelul 2 și din figurile 2 și 3 se desprind următoarele concluzii:

- valorile constantei de solidificare calculate analitic prin relația (7) sunt foarte apropiate de valorile determinate prin simulare pe calculator ceea ce confirmă valabilitatea relației determinate;
- abaterile relative la calculul analitic al constantei de solidificare se încadrează între -5,95 și +2,84, fiind mai mici decât abaterile relative obținute la calculul timpului de solidificare [1, 2];
- abaterile obținute la calculul analitic al constantei de solidificare sunt de semn contrar față de abaterile obținute la calculul timpului de solidificare [1, 2];
- valorile constantei de solidificare scad cu creșterea supraîncălzirii inițiale a aliajului lichid;
- valorile constantei de solidificare din tabelul 2 sunt valabile numai în cazul caracteristicilor termofizice date în tabelul 1 și a temperaturilor de turnare precizate în tabelul 2.

## Bibliografie

1. Ciobanu, I., Mașniță, M., Monescu, V.: *A new method for castings solidification time calculation*. Revista de turnătorie, no. 11-12, December, 2006, ISSN 1224-21-44, p. 19-23, Bucharest, Romania (in Romanian)
2. Ciobanu, I., Mașniță, M., Monescu, V.: *Comparison between the solidification time values calculated analytically and those determined by computer solidification simulation*. Metalurgia, no. 11, November, 2006, ISSN 0461/9579, p. 21-30, Bucharest, Romania (in Romanian)
3. Bratu, C., Sofroni, L., Brabie, V.: *Thermophysics of the pouring processes*. Institutul Politehnic București, Bucharest, Romania, 1984 (in Romanian)
4. Sofroni, L., Brabie, V., Bratu, C.: *Theoretical basis of pouring*. Editura Didactică și Pedagogică, Bucharest, Romania, 1980 (in Romanian)
5. Munteanu, S.I., Ciobanu, I., Crișan, A.: *Solidification simulation of the U-type castings*. Revista de turnătorie, no. 9-10, October, 2004, ISSN 1224-21-44, p. 25-29, Bucharest, Romania (in Romanian)
6. Ciobanu, I., Munteanu, S.I., Crișan, A.: *Castings solidification characterisation by real solidification modulus*. Metalurgia, no. 5, May, 2005, ISSN 0461/957, p. 15-25, Bucharest, Romania (in Romanian)

Lucrare primită în februarie 2007

Received in February 2007

(pouring temperature) of the liquid alloy. In figure no.3 is presented the influence of the pouring temperature of the liquid alloy over the relative deviations of the solidification constant values calculated analytically in ratio with those determined by simulation.

Analysing the results from table no.2 and figures no.2 and 3 it leads to following conclusions:

- the solidification constant values calculated analytically by relation (7) is very closely to the values determined by computer simulation which confirm the validity of this relation;
- the relative deviations at analytical calculation of the solidification constant is border between -5,95 and +2,84, being smaller than the relative deviations obtained at solidification time calculation;
- the deviations obtained at analytical calculations of the solidification constant is in contrary sign towards the deviations obtained at the solidification time calculation [1, 2];
- the solidification constant values decrease with increasing of the initial overheats of the liquid alloy;
- the solidification constant values from the table no.2 is valid only in case of the thermophysical characteristics presented in table no.1 and a pouring temperature from table no.2.