

SIM - 3D SOFTWARE VERIFICATION BY FEEDERS FUNCTIONING ANALYSIS

VERIFICAREA SOFTULUI SIM – 3D PRIN ANALIZA FUNȚIONĂRII MASELOTTELOR

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

Abstract. SIM - 3D software was done at Transilvania University of Brasov for casting solidification simulation of alloy that solidifies in a temperature range. There is presented the research conducted by the authors to validate this software. Verification was based on the analysis of feeders operation. To this end, the simulation results were compared with those obtained by the method of real solidification modulus, as well as by casting experimental parts. We analyzed the solidification directing in the system feeder - channel – part and the hot spots and shrinkage positions.

Key words: solidification simulation, analysis of feeders operation, solidification modulus

1. Introduction

At Transilvania University of Brasov it was carried SIM – 3D software for casting solidification simulation. It includes two modules. One for simulating casting solidification of alloy that solidifies at a constant temperature (eutectic alloys or pure metals) and the other, more recently, for alloy that solidifies in a temperature range. SIM – 3D software is different from the software widely used in the industry through the module simulating the solidification of cast alloy that solidifies at a constant temperature [1]. Software used in the industry only simulates the solidification of alloys that solidifies in a temperature range. In the case of eutectic alloys these software considers the hypothesis that solidification occurs in a very small temperature range.

SIM – 3D software uses the finite difference method. The assemble casting - mold is divided into cubic volume elements. The evolution of the temperature and the solid fraction inside the casting is determined by solving the heat balance equation for each volume element and for a sequence of very small time intervals. Another particularity of the software currently used in industry, is that it uses the specific heat equivalent method. In this case the heat balance equation is explained only by the initial temperature of the elements. Therefore, in writing the equivalent specific heat and heat balance equation there are three cases. The software developed at Transylvania university of Brasov explains heat balance equation based on the initial temperature and the final temperature of the

Rezumat. La Universitatea Transilvania din Brașov s-a realizat softul SIM – 3D pentru simularea solidificării pieselor turnate din aliaje cu interval de solidificare. Sunt prezentate cercetările efectuate de autori pentru validarea acestui soft. Verificarea s-a bazat pe analiza funcționării maseotelor. În acest scop rezultatele obținute prin simulare s-au comparat cu cele obținute prin metoda modulului real de solidificare, cât și prin turnarea experimentală a unor piese de probă. S-a analizat dirijarea solidificării în sistemul maseotă – canal – piesă, poziția nodurilor termice și a retasurilor.

Cuvinte cheie: simularea solidificării, analiza funcționării maseotelor, modul de solidificare

1. Introducere

La Universitatea Transilvania din Brașov a fost realizat softul SIM – 3D, pentru simularea solidificării pieselor turnate. Acesta include două module. Unul pentru simularea solidificării pieselor turnate din aliaje care se solidifică la temperatură constantă (aliaje cu compoziție eutectică sau metale pure). Altul, mai recent, pentru aliaje care se solidifică în interval de temperatură. Softul SIM – 3D este diferit de softurile utilizate pe scară largă în industrie, prin modulul care simulează solidificarea pieselor turnate din aliaje care se solidifică la temperatură constantă [1]. Softurile utilizate în industrie, simulează solidificarea numai pentru aliaje cu solidificare în interval de temperatură. În cazul aliajelor eutectice, aceste softuri consideră ipoteza că solidificarea are loc într-un interval de temperatură foarte mic.

Softul SIM – 3D utilizează metoda diferențelor finite. Ansamblul piesă turnată – formă este divizat în elemente de volum cubice. Evoluția temperaturii și a fracției de solid din piesa turnată se determină prin rezolvarea ecuației de bilanț termic pentru fiecare element de volum și pentru o succesiune de intervale de timp foarte mici. O altă particularitate a softurilor utilizate în prezent industrie, constă în aceea că acestea utilizează metoda căldurii specifice echivalente. În acest caz ecuația de bilanț termic este explicată numai în funcție de temperatura inițială a elementelor. De aceea se întâlnesc trei situații. Softul realizat la Universitatea Transilvania, explicitează ecuația de bilanț termic în funcție de temperatura inițială, dar și de temperatura finală a elementelor. În acest caz ecuația de bilanț termic este explicată

elements. In this case the heat balance equation lead to nine situations that occur in the alloys solidification. This expression reproduces more accurately the heat transfer at solidification. The temperature evolution in time is determined more accurately. Also, this type of expression has the advantage of making possible the simulation of solidification at constant temperature (the case of eutectic alloy). Software that uses the equivalent specific heat method cannot do this thing.

SIM – 3D software provides data on temperature, solid fraction, rate of temperature change, locally temperature gradient, the criterion Nyiama. The software used in industry usually provides only data on the distribution of these parameters in the casting. These are given only as color map. Therefore, many times, the values of the parameters which characterize the elements state (temperature, solid fraction, temperature gradient, etc.) are computed approximately [2, 3, 4]. SIM – 3D software gives the distribution of these values inside the casting at a time moment, and the evolution of these quantities versus time in any point of the system casting – mold. The results are given graphical, but also as spreadsheet (unlike the software used in industry). Therefore, the values of parameters of the volume elements can be very accurately determined in function of the space coordinates and time. The distribution of these values in the part volume is given in graphical form as a color map. They are, however, completed with contour curves (corresponding to most interesting values). The time dependence of the quantities is given by continuous chart. These curves makes possible to carry out precise studies about very small volumes. You can study the phenomena at the interface casting - mold (which is not possible with the software currently used in the industry). In addition to these software, SIM – 3D software provides accurate data about the solidification sequence of the system feeder – feeder neck – part, about the communication interruption feeder – casting, about the amount of useful liquid alloy in the feeder, about the maximum amount of the liquid alloy contraction in the part that can be compensated by the feeder and about the shrinkage location. The useful liquid alloy in feeder is the liquid alloy which can flow from feeder to part, to compensate the solidification contraction of the part.

2. Paper aim

After realizing the SIM-3D software it was necessary to verify the validity of the results

pentru nouă situații, care se întâlnesc la solidificarea aliajelor. Această explicitare reproduce mult mai exact procesul de transfer termic la solidificare. Evoluția temperaturii în funcție de timp este determinată mult mai precis. De asemenea, acest tip de explicitare are și avantajul că face posibilă simularea solidificării la temperatură constantă (cazul aliajelor eutectice) Softurile care utilizează metoda căldurii specifice echivalente nu pot face acest lucru.

Softul SIM – 3D furnizează date privind temperatura, fracția de solid, viteza de variație a temperaturii, gradientul local de temperatură, valoarea criteriului Nyiama. Softurile utilizate în industrie furnizează de obicei numai date privind repartizarea acestor mărimi în piesa turnată. Acestea sunt redate numai sub formă de hartă de culori. De aceea, de cele mai multe ori, valorile mărimilor care caracterizează starea elementelor (temperatură, fracție de solid, gradient de temperatură, etc.) sunt stabilite cu aproximație [2, 3, 4]. Softul SIM – 3D redă repartizarea valorilor acestor mărimi în volumul piesei la un moment dat, dar și evoluția mărimilor respective în funcție de timp, în orice punct al sistemului piesă turnată – formă. Rezultatele sunt date sub formă grafică, dar (spre deosebire de softurile utilizate în industrie) și tabelar. De aceea valorile mărimilor de stare ale elementelor de volum, pot fi determinate cu foarte mare precizie, în funcție de coordonatele de spațiu și de timp. Repartizarea în volumul piesei a valorilor mărimilor menționate, este dată sub formă grafică ca hartă de culori. Acestea sunt însă, completate cu curbe de nivel (corespunzător valorilor numerice care interesează). Dependența de timp a mărimilor de stare este dată grafic prin curbe continue. Astfel de curbe permit să se efectueze studii precise, localizate în volume foarte mici. Se pot studia fenomene la interfața piesă turnată – formă (ceea ce nu este posibil cu softurile utilizate în prezent în industrie). În plus față de aceste softuri, softul SIM – 3D, furnizează date precise despre succesiunea solidificării în sistemul maselotă – canal – piesă, despre întreruperea comunicației maselotă – piesă turnată, despre cantitatea de aliaj lichid util din maselotă, despre valoarea contracției maxime a aliajului lichid din piesă care poate fi compensată de maselotă și despre localizarea retaturii. Aliajul lichid util din maselotă este aliajul lichid care poate să curgă din maselotă în piesă, pentru compensarea contracției la solidificare a piesei.

2. Scopul lucrării

După realizarea softului SIM – 3D a fost necesară o verificare a validității rezultatelor

obtained with it. The two modules (solidification at a constant temperature and solidification in a temperature range) were tested using the following methods:

- by comparing the results with those obtained with internationally recognized software;
- experimentally, by thermal analysis;
- by analyzing the solidification of the system casting – feeder.

This paper presents the results obtained when verifying the software module for casting solidification simulation of alloy that solidify in a range of temperature by analyzing the solidification of the system casting – feeder.

3. Working mode

Software verification was performed by analyzing the parameters that characterize the feeder functioning. The working methodology consisted of solidification analysis of castings in the presence of different sized feeders. The part used in the study is shown in Figure 1. The studied assemble mold – casting is shown in Figure 2. The solidification of the system casting – feeder was studied by three methods: by using the real solidification modulus, by simulation with SIM-3D software and experimental. The parts were cast in steel. The chemical composition of the cast steel is given in the Table 1.

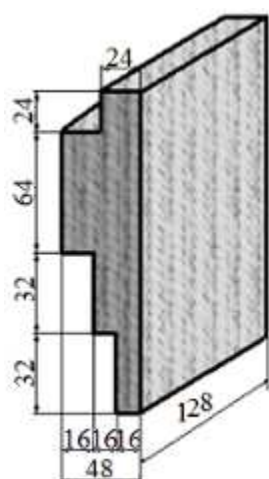


Figure 1. Casting
Figura 1. Piesa turnată

obținute cu ajutorul acestuia. Cele două module (pentru solidificare la temperatură constantă și pentru solidificare în interval de temperatură) au fost verificate prin mai multe metode:

- prin compararea rezultatelor cu cele obținute prin softuri recunoscute pe plan internațional;
- experimental prin analiză termică;
- prin analiza solidificării unor sisteme piesă turnată – maselotă.

În această lucrare sunt prezentate rezultate obținute în cazul verificării modulului de soft pentru simularea solidificării pieselor tunate din aliaje cu interval de solidificare prin analiza solidificării sistemelor piesă turnată – maselotă.

3. Mod de lucru

Verificarea softului, s-a efectuat prin analiza parametrilor care caracterizează funcționarea maselotelor. Metodologia de lucru a constat în analiza solidificării unei piese turnate în prezența unor maselote cu dimensiuni diferite. Piesa a cărei solidificare a fost studiată este arătată în figura 1. Ansamblul formă de turnare – piesă turnată studiat este arătat în figura 2. Solidificarea sistemului piesă turnată – maselotă a fost studiată prin trei metode: cu ajutorul modulului real de solidificare, prin simulare cu softul SIM – 3D și experimental. Piesele s-au turnat din oțel. Compoziția chimică a oțelului turnat este dată în Tabelul 1.

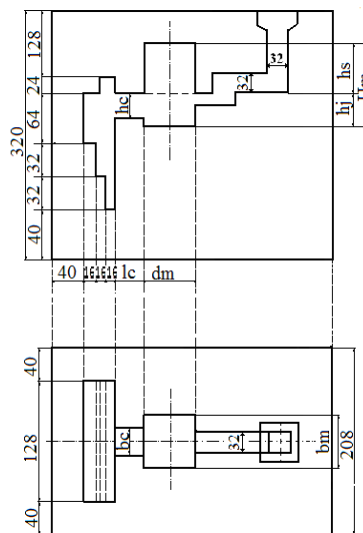


Figure 2. Casting – feeder - mold assembly used in the study
Figura 2. Ansamblul piesă turnată –maselotă – formă utilizat în cadrul studiului

Table 1. Chemical composition of the cast steel / Tabelul 1. Compoziția chimică a oțelului turnat

Alloy type / Tip aliaj Symbol / Simbol	Element content / Conținut element [%]										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	Mg
Carbon steel Oțel carbon	0.112	0.314	0.753	0.018	0.030	0.03	0.02	0.04	0.037	0.16	-

We used three feeders: a properly sized feeder, an undersized feeder and an oversized feeder with undersized feeder neck. In the Table 2 are given the dimensions of feeders used. We have analyzed the parameters which characterize the feeder operation by the three methods. There were analyzed the shrinkages positions and the hot spots positions, the sequence of the alloy solidification in the system, the amount of useful liquid alloy available in the feeder and the maximum contraction of the alloy in the part possible to be compensated by the feeder. The results obtained by the simulation are compared with the experimental results and with those obtained with the method of real modulus of solidification.

S-au utilizat trei maselote, maselotă dimensionată corect, maselotă subdimensionată și maselotă supradimensionată (cu canal de alimentare subdimensionat). În tabelul 2 sunt date dimensiunile maselotelor utilizate. S-au analizat parametrii, care caracterizează funcționarea maselotelor prin cele trei metode. S-a analizat poziția retasurilor, și a nodurilor termice, succesiunea solidificării aliajului în sistem, cantitatea de aliaj lichid util disponibil în maselotă și contracția maximă a aliajului din piesă posibil de compensat din maselotă. Rezultatele obținute prin simulare s-au comparat cu rezultatele experimentale și cu cele obținute prin metoda modulului real de solidificare.

Table 2. Feeder sizes for the casting variants studied by experiment and by simulation
Tabelul 2. Dimensiunile maselotei în variantele de turnare studiate experimental și prin simulare

Variant Varianta	Feeder size Dimensiunile maselotei					Feeder-part channel size Dimensiunile canalului maselotă – piesă		
	thickness grosime	width lățime	heigth up înălțime superioară	heigth down înălțime jos	entire heigth înălțime totală	heigth înălțime	width lățime	length lungime
symbol	d_R	b_R	h_S	h_I	H_R	h_N	b_N	l_N
u.m.	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
V1	80	80	80	40	120	32	32	40
V2	64	64	96	56	152	48	48	40
V3	88	88	88	56	152	48	48	40

4. Results

4.1. Result obtained using the method of real solidification modulus

The real solidification modulus was calculated by the equation [5, 6]:

$$M = \frac{V}{\sum_{i=1}^n k_i \cdot S_i}, \quad (1)$$

where: V is the volume of the part area (whose modulus is calculated), n – number of surfaces, i – the index of surfaces, S_i – surface area index "i", k_i – the cooling coefficient of the "i" surface.

The cooling coefficient k_i take into account the slowing down or the increase of heat transmission through S_i surface, comparing with a surface where heat transfer is not affected. The heat transmission changes are caused by hot corners, very thin core thickness relative to the part, insulating material, exothermic material, coolers, very close vicinity with other parts or feeders, etc.).

To ensure a proper solidification directing of the system casting - feeder between the real solidification modulus of the part, the feeder

4. Rezultate

4.1. Rezultate obținute prin modulul real de solidificare

Modulele reale de solidificare s-au calculat prin relația [5, 6]:

unde: V reprezintă volumul zonei din piesă (al cărei modul se calculează), n – numărul suprafețelor, i – indicele suprafețelor, S_i – aria suprafeței cu index "i", k_i – coeficient de răcire aferent suprafeței S_i .

Coeficientul de răcire k_i ține cont de încetinirea sau intensificarea transmisiei căldurii prin suprafața respectivă (S_i) în comparație cu o suprafață prin care transmisia căldurii nu este influențată. Modificarea transmisiei căldurii este cauzată de colț cald, miez foarte subțire în raport cu grosimea piesei, material termoizolant, material exoterm, răcitori, vecinătatea foarte apropiată a altor piese sau maselote, etc.).

Pentru a se asigura o dirijare corespunzătoare a solidificării în sistemul piesă turnată – maselotă, între modulul real de solidificare al piesei, al

channel, and feeder the following relationship must be [5, 7, 8]:

$$M_P : M_C : M_M = 1 : 1.1 : 1.2, \quad (2)$$

where M_P – is the real solidification modulus of the part (the area fed by feeder), M_C – the real solidification module of the channel feeder – part, M_M – the real solidification modulus of the feeder.

The real solidification modulus (M) is related to the solidification time (t_s) by the square root law of solidification [7]:

$$M = k\sqrt{t_S}, \quad (3)$$

where k is a solidification constant.

From the equations (2) and (3) results that a proper directing solidification in the system part – feeder is obtained when the solidification times are in the relationship:

$$t_P : t_C : t_M = M_P^2 : M_C^2 : M_M^2 = 1 : 1.2 : 1.45, \quad (4)$$

where t_P is the solidification time of the casting, t_C – the solidification time of the channel, t_M – the solidification time of the feeder.

In the Table 3 are given the values of the real solidification modules, determined by calculation for the elements of the system casting – channel – feeder. These were calculated using the equation (1) based on the sizes given the Table 2.

canalului și al maselotei, trebuie să existe relația [5, 7, 8]:

unde M_P – reprezintă modulul de solidificare real al piesei (al zonei alimentată de maselotă), M_C – modulul de solidificare real al canalului maselotă – piesă, M_M – modulul de solidificare real al maselotei.

Modulul de solidificare real (M) este corelat cu timpul de solidificare (t_s) prin legea rădăcinii pătrate a solidificării [7]:

unde k este o constantă de solidificare.

Din relațiile (2) și (3) rezultă că dirijarea corespunzătoare a solidificării sistemului piesă – maselotă se obține când timpii de solidificare sunt în relația:

unde t_P reprezintă timpul de solidificare al piesei turnate, t_C – timpul de solidificare al canalului, t_M – timpul de solidificare al maselotei.

În tabelul 3 sunt date valorile modulelor reale de solidificare determinate prin calcul pentru elementele sistemului piesă turnată–canal–maselotă. Acestea au fost calculate cu relația (1), în funcție de dimensiunile din tabelul 2.

Table 3. The real solidification modules for casting, feeder and channel, and the solidification time ratio calculated with the relationships (1) and (4)

Tabelul 3. Modulele reale de solidificare pentru piesa turnată, canal și maselotă și raportul timpilor de solidificare calculate în funcție de dimensiuni (prin relațiile (1) și (4))

Variant Varianta	Real solidification modulus Modulul real de solidificare calculat				Solidification times ratio Raportul timpilor de solidificare obținut prin calcul
	Piesa turnată Casting	Channel feeder-part Canal maselotă - piesa	Feeder Maselota	Real solidification modules ratio Raportul modulelor reale de solidificare	
Symbol	M_C	M_N	M_R	$M_C : M_N : M_R$	$t_C : t_N : t_R$
u.m.	mm	mm	mm	-	-
V1	15.13	13.6	16.10	1 : 0.90 : 1.05	1 ; 0.81 : 1.10
V2	15.05	17.5	15.17	1 : 1.16 : 1.01	1 : 1.35 : 1.02
V3	15.18	17.5	18.62	1 : 1.15 : 1.23	1 : 1.32 : 1.51

Subunit values were adopted for the cooling coefficient of part, channel and feeder surfaces where cooling is slower. The slowed cooling is caused by the molding batch overheating. Values between 0.5 - 0.9, depending on the cooling slowing, were adopted [5, 6]. For feeder neck surfaces were adopted values $k_i = 0.5$. For the surfaces near the hot corners of the parts and the neighboring areas of the part and feeder were adopted values $k_i = 0.7 - 0.9$ depending on the local

S-au adoptat valori subunitare pentru coeficientul de răcire aferent suprafețelor piesei, ale canalului și ale maselotei, în dreptul cărora răcirea în timpul solidificării este încetinită. Încetinirea răcirii este cauzată de supraîncălzirea amestecului de formare. S-au adoptat valori între 0,5 – 0,9 în funcție de încetinirea răcirii [5, 6]. Pentru suprafețele canalul maselotă – piesă s-au adoptat valori $k_i = 0,5$. Pentru suprafețele din dreptul colțurilor calde ale piesei și pentru suprafețele vecine (apropiate) ale piesei și

geometry. For the surfaces where heat transfer is not affected by molding batch overheating, the cooling coefficient was adopted $k_i = 1$ [5, 6, 8, 9].

4.2. Results obtained by simulation

The simulations were performed in similar conditions as experiment: non alloyed steel castings with 0.1 %C, sand molds chemical hardened (sodium silicate + CO₂). The values of the physical quantities used for simulation are: initial temperature of the liquid steel $T_0 = 1650$ °C, liquidus temperature $T_L = 1530$ °C, solidus temperature $T_S = 1495$ °C, mold thermal conductivity $\lambda_{FO} = 0,65$ W/mK, steel thermal conductivity in solid state $\lambda_{SO} = 30$ W/mK, steel thermal conductivity in liquid state $\lambda_{LO} = 28$ W/mK, specific heat of liquid steel $c_{LOL} = 850$ J/kgK, the specific heat of solid steel $c_{SOL} = 750$ J/kgK, specific heat of the mold $c_{FO} = 1170$ J/kgK, liquid alloy density $\rho_{LOL} = 7200$ kg/m³, mold density $\rho_{FO} = 1550$ kg/m³, specific latent heat of solidification of the steel $L_{OL} = 270000$ J/kg, initial temperature of the mold $T_{OFO} = 20$ °C.

For the cases studied by simulation there were determined:

- the solidification time of the part, feeder and channel feeder - part;
- the solidification times ratios;
- the ratio of the real solidification modules of casting, feeder channel, feeder, calculated according to the solidification times;
- the amount of useful liquid alloy available in the feeder (to compensate the shrinkage of part and feeder) until casting solidification;
- the maximum contraction percentage possible to be compensated by the feeder until solidification;
- the hot spots positions;
- the solidification times map.

The results of the simulation are shown in Tables 4 and 5.

In the Table 4 are given solidification time obtained by simulation for part (t_P), channel (t_C), feeder (t_M) and also the time of part feeding by the feeder (t_{AL} - time of communication interruption feeder - part). With these values, we calculated the solidification time ratio ($t_P : t_C : t_M$). This characterizes the solidification directing. Based on the square root law (using the solidification time values determined by simulation) it was calculated the ratio of the real solidification modules of the three elements. The ratios of the real solidification modules were calculated according to the

maselotei s-au adoptat valori $k_i = 0,7 - 0,9$ în funcție de geometria locală. În cazul suprafețelor unde transmiterea căldurii nu este afectată de supraîncălzirea amestecului de formare, coeficientul de răcire s-a adoptat $k_i = 1$ [5, 6, 8, 9].

4.2. Rezultate obținute prin simulare

Simulările s-au efectuat pentru condiții similare cu cele în care a fost realizat experimentul: piese turnate din oțel nealiat, cu 0.1 %C, forme din nisip întărite chimic (silicat de sodiu + CO₂). Valorile mărimilor fizice utilizate pentru simulare sunt: temperatura inițială a oțelului lichid, $T_0 = 1650$ °C, temperatura lichidus $T_L = 1530$ °C, temperatura solidus $T_S = 1495$ °C, conductivitatea termică a formei $\lambda_{FO} = 0,65$ W/mK, conductivitatea termică în stare solidă a oțelului $\lambda_{SO} = 30$ W/mK, $\lambda_{LO} = 28$ W/mK, căldura specifică a oțelului lichid $c_{LOL} = 850$ J/kgK, căldura specifică a oțelului solid $c_{SOL} = 750$ J/kgK, căldura specifică a formei $c_{FO} = 1170$ J/kgK, densitatea aliajului lichid $\rho_{LOL} = 7200$ kg/m³, densitatea formei $\rho_{FO} = 1550$ kg/m³, căldura latentă specifică de solidificare a oțelului $L_{OL} = 270000$ J/kg. Temperatura inițială a formei $T_{OFO} = 20$ °C.

Pentru cazurile studiate prin simulare s-a determinat:

- timpul de solidificare a piesei, a maselotei și a canalul maselotă – piesă;
- raportul timpilor de solidificare;
- raportul modulelor reale de solidificare ale sistemului piesă turnată – alimentator – maselotă, calculat în funcție de timpii de solidificare;
- cantitatea de aliaj lichid util disponibilă în maselotă (pentru compensarea contracției piesei și maselotei) până la momentul solidificării piesei turnate;
- contracția procentuală maximă posibilă de compensat din maselotă până la solidificarea piesei;
- poziția nodurilor termice;
- harta timpilor de solidificare.

Rezultatele obținute prin simulare sunt date în tabelele 4 și 5.

În tabelul 4 este dat timpul de solidificare, obținut prin simulare, pentru piesă (t_P), pentru canal (t_C), pentru maselotă (t_M) și de asemenea timpul de alimentare a piesei din maselotă (t_{AL} – timpul de întrerupere a comunicației maselotă – piesă). Cu aceste valori, s-a calculat raportul timpilor de solidificare ($t_P : t_C : t_M$). Acest raport caracterizează dirijarea solidificării. Pe baza legii rădăcinii pătrate (utilizând valorile timpilor de solidificare determinate prin simulare) s-a calculat apoi raportul modulelor reale de solidificare al celor trei elemente. Raportul modulelor reale de solidificare

solidification times determined by simulation, with the relationship:

$$M_P : M_C : M_M = \sqrt{t_P} : \sqrt{t_C} : \sqrt{t_M} \quad (5)$$

The ratios of the solidification times, and the real solidification modules determined by simulation (Table 4) were compared with the ratios from Table 3, calculated according to Equation (1) in function of geometry and dimensions. The values are close, confirming the validity of the results provided by the software.

In the Table 5 are given the results of the volume of useful liquid alloy in the feeder (V_{LUM}) and the maximum contraction at alloy solidification, possibly to be compensated by feeder (β_{MAX}).

s-a calculat, în funcție de timpii de solidificare stabiliți prin simulare, prin relația:

Raportul timpilor de solidificare și al modulelor de solidificare reale determinate pe baza simulării (din tabelul 4), s-au comparat cu valorile din tabelul 3, calculate pin relația (1) în funcție de geometrie și de dimensiuni. Valorile sunt apropiate, ceea ce confirmă valabilitatea rezultatelor furnizate de soft.

În tabelul 5 sunt date rezultatele privind volumul de aliaj lichid util din maselotă (V_{LUM}) și contracția maximă a aliajului la solidificarea piesei, posibil de compensat din maselotă (β_{MAX}).

Table 4. Results obtained by simulation about the solidification time and the ratio of the real solidification modules
Tabelul 4. Rezultate obținute prin simulare privind timpul de solidificare și raportul modulelor reale de solidificare

Variant Varianta	Solidification times Timp de solidificare			Time of interruption of communications feeder - part Timp de întrerupere a comunicației maselota - piesa	Solidification times ratio Raportul timpilor de solidificare	Real solidification modules ratio Raportul modulelor de solidificare reale
	Casting Piesa turnată	Channel feeder-part Canal maselotă - piesă	Feeder Maselota			
Symbol	t_C	t_N	t_R	t_{SN}	$t_C : t_N : t_R$	$M_C : M_N : M_R$
u.m.	s	s	s	s	-	-
V1	541.5	492	705	387	1: 0.91: 1.30	1 : 0.95 : 1.14
V2	600	645	642	621	1: 1.08: 1.07	1 : 1.04 : 1.03
V3	604.5	781.5	916.5	630	1. 1.29: 1.52	1 : 1.14 : 1.23

Note: Real solidification modules ratio was calculated with relationship (5)

Notă: Raportul modulelor de solidificare s-a calculat prin relatia (5)

Table 5. Results about the elements of the system: the volume, the amount of useful liquid alloy in the feeder, the maximum shrinkage possible to be compensated by feeder

Tabelul 5. Rezultate privind volumul elementelor in sistem, cantitatea de aliaj lichid util din maselotă și contracția maximă posibil de compensat de maselote la solidificarea piesei turnate

Variant Varianta	Part volume Volum piesă	Channel volume Volum canal	Feeder volume Volum maselotă	Total alloy volum Volum total de aliaj	Useful liquid alloy in the feeder Volum de aliaj lichid util în maselotă	Maximum contraction possible to be compensated by feeder Contracție maximă posibilă de compensat din maselotă
Symbol	V_C	V_N	V_R	V_{TOT}	V_{ULR}	β_{MAX}
u.m.	cm ³	cm ³	cm ³	cm ³	cm ³	%
V1	663.55	40.12	768.00	1472.51	52.90	3.59
V2	663.55	92.12	622.59	1378.30	1.56	0.11
V3	663.55	92.12	1115.13	1870.80	110.18	5.89

In the Figures 3 – 8 are shown the results obtained by simulation about the movement of the solidification front and the corresponding zone of the liquid alloy available in feeder to compensate the shrinkage till solidification. The solidification maps highlight the hot spots. It can be seen if

În figurile 3 – 8 sunt arătate rezultatele obținute prin simulare privind deplasarea frontului de solidificare și zona aferentă aliajul lichid util disponibil în maselotă pentru compensarea contracției până la solidificarea piesei. Harta timpilor de solidificare pune evidență nodurile termice. Se poate observa

secondary hot spots appear in the part caused by feeder malfunction. Figures showing the useful liquid alloy inside the feeder (available to compensate alloy solidification shrinkage) allow observe if the liquid alloy useful in the feeder can reach the part till the end of its solidification. The useful liquid alloy in feeder can run in the part (till the end of solidification time) only if the corresponding useful liquid alloy zone reach the junction feeder channel – part.

dacă în piesă apar retasuri secundare, cauzate de funcționarea necorespunzătoare a maselotelor. Figurile care arată zona aliajului lichid util din interiorul maselotei (aliajul disponibil pentru compensarea contracției la solidificare a piesei) permit să se observe dacă aliajul lichid util din maselotă poate să ajungă în piesă, până la sfârșitul solidificării acesteia. Aliajul lichid util din maselotă poate să curgă în piesă (până la sfârșitul solidificării acesteia) numai dacă zona aferentă aliajului lichid util atinge secțiunea de joncțiune canal – piesă.

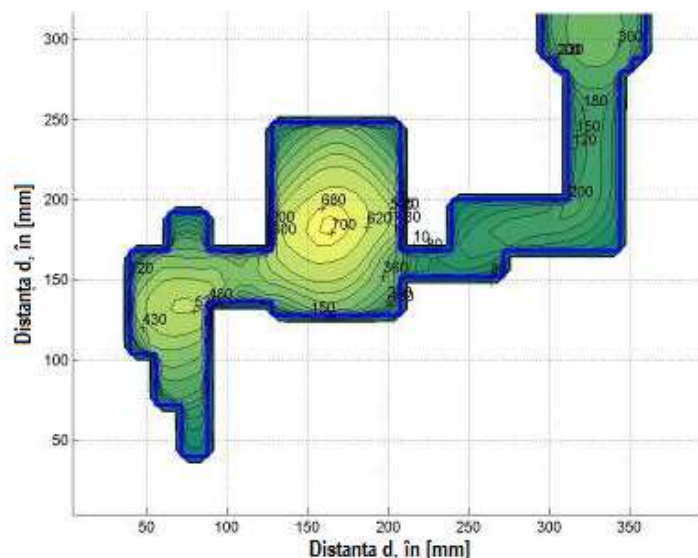


Figure 3. Solidification times map

(Variant V1 – feeder: $d_m \times H_m = 80 \times 120$ mm; channel: $b_c \times h_c = 32 \times 32$ mm)

Figura 3. Harta timpilor de solidificare

(Varianta V1 – maselotă: $d_m \times H_m = 80 \times 120$ mm; canal: $b_c \times h_c = 32 \times 32$ mm)

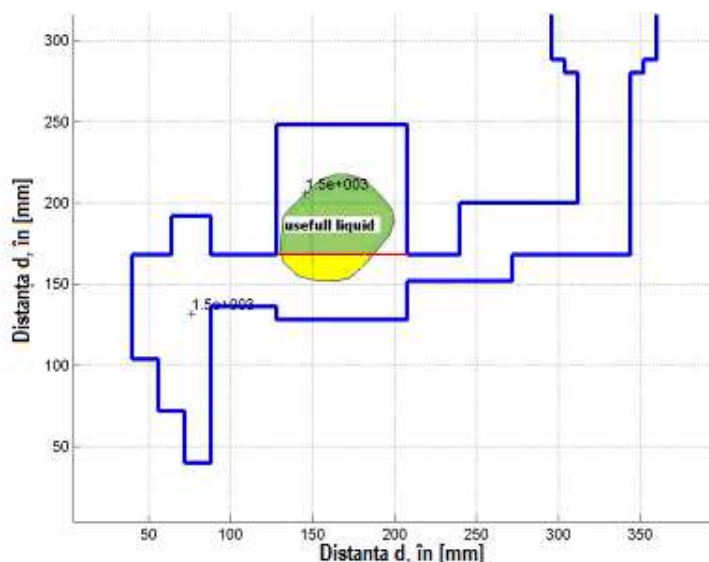


Figure 4. The area of useful liquid alloy inside the feeder

(Variant V1 – feeder: $d_m \times H_m = 80 \times 120$ mm; channel: $b_c \times h_c = 32 \times 32$ mm)

Figura 4. Zona metalului lichid util din interiorul maselotei

(Varianta V1 – maselotă: $d_m \times H_m = 80 \times 120$ mm; canal: $b_c \times h_c = 32 \times 32$ mm)

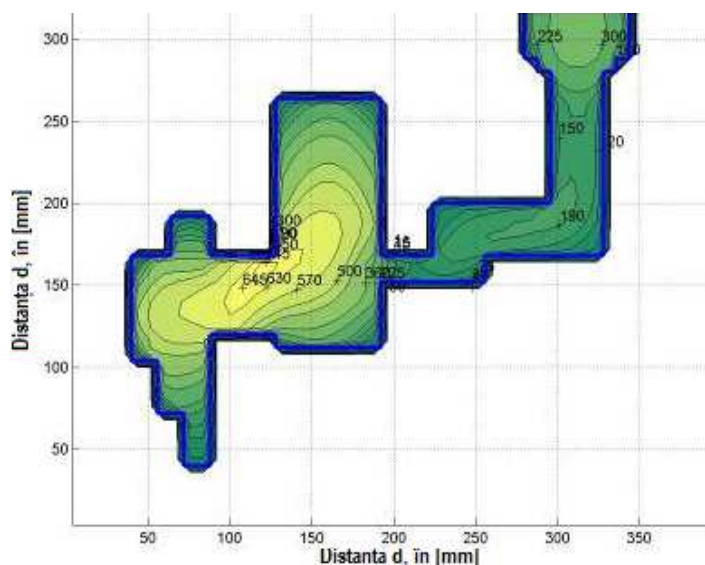


Figure 5. Solidification times map

(Variant V2 – feeder: $d_m \times H_m = 64 \times 152$ mm; channel: $b_c \times h_c = 48 \times 48$ mm)

Figura 5. Harta timpilor de solidificare

(Varianta V2 – maselota: $d_m \times H_m = 64 \times 152$ mm; canal: $b_c \times h_c = 48 \times 48$ mm)

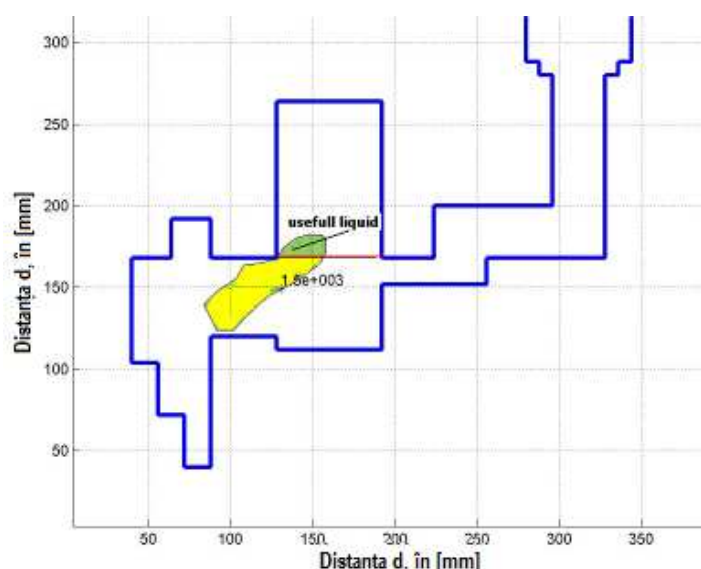


Figure 6. The area of useful liquid alloy inside the feeder

(Variant V2 – feeder: $d_m \times H_m = 64 \times 152$ mm; channel: $b_c \times h_c = 48 \times 48$ mm)

Figura 6. Zona metalului lichid util din interiorul maselotei

(Varianta V2 – maselota: $d_m \times H_m = 64 \times 152$ mm; canal: $b_c \times h_c = 48 \times 48$ mm)

The results obtained by simulation and their comparison with those obtained calculating the real solidification modules show the following aspects about feeders operation:

Variant V1: The channel feeder – part is undersized. The solidification times map (Figure 4) shows that the primary hot spot is formed in the feeder. The part shows a secondary hot spot as result of premature interruption of communication feeder – part. Time to close the channel is $t_{AL} = 387$ s $<$ t_p .

Rezultatele obținute prin simulare și compararea acestora cu cele obținute prin calculul modulelor reale de solidificare arată următoarele aspecte privind funcționarea maselotelor:

Varianta V1: Canalul maselotă – piesă este subdimensionat. Harta timpilor de solidificare (figura 4) arată că nodul termic principal se formează în maselotă. În piesă apare un nod termic secundar ca urmare a întreruperii premature a comunicației maselotă - piesă. Timpul de obturare a canalului este $t_{AL} = 387$ s $<$ t_p .

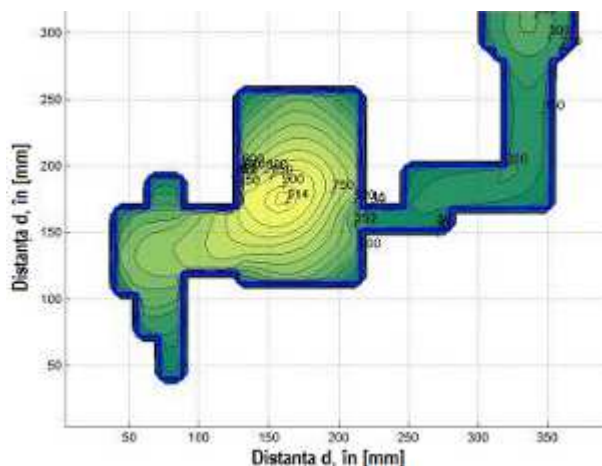


Figure 7. Solidification times map

(Variant V3 – feeder: $d_m \times H_m = 88 \times 144$ mm; channel: $b_c \times h_c = 48 \times 48$ mm)

Figura 7. Harta timpilor de solidificare

(Varianta V3 – maselota: $d_m \times H_m = 88 \times 144$ mm; canal: $b_c \times h_c = 48 \times 48$ mm)

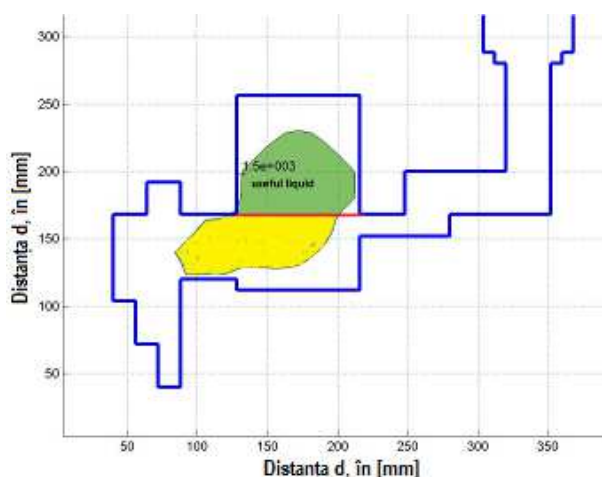


Figure 8. The area of useful liquid alloy inside the feeder

(Variant V3 – feeder: $d_m \times H_m = 88 \times 144$ mm; channel: $b_c \times h_c = 48 \times 48$ mm)

Figura 8. Zona metalului lichid util din interiorul maselotei

(Varianta V3 – maselota: $d_m \times H_m = 88 \times 144$ mm; canal: $b_c \times h_c = 48 \times 48$ mm)

This is lower than the solidification time of the part ($t_P = 541.5$ s). Directing alloy solidification in the system, characterized by the ratio of solidification end time (part : channel : feeder), is not appropriate. The solidification times ratio (determined by simulation) is $t_P : t_C : t_M = 1 : 0.91 : 1.30$. Solidification modules ratio (calculated by the Eq. (5), based on the solidification times given by simulation) is $M_P : M_C : M_M = 1 : 0.95 : 1.14$. These values are very close to the values (in Table 3) calculated according to the geometric dimensions (relations (1) and (4)), namely $M_P : M_C : M_M = 1 : 0.90 : 1.05$, respectively $t_P : t_C : t_M = 1 : 0.81 : 1.10$.

The solidification times ratio also confirms the jamming of the channel feeder – part. The map of the useful liquid alloy in feeder, show that it cannot

Acesta este mai mic decât timpul de solidificare a piesei ($t_P = 541,5$ s). Dirijarea solidificării aliajului în sistem, caracterizată prin raportul timpilor de sfârșit de solidificare (piesă : canal : maselotă), nu este corespunzătoare. Raportul timpilor de solidificare (determinat prin simulare) este $t_P : t_C : t_M = 1 : 0,91 : 1,30$. Raportul modulelor de solidificare (calculat prin relația (5), în funcție de timpii de solidificare dați de simulare) este $M_P : M_C : M_M = 1 : 0,95 : 1,14$. Aceste valori sunt foarte apropiate de valorile (din tabelul 3) calculate în funcție de dimensiunile geometrice (cu relațiile (1) și (4)) și anume $M_P : M_C : M_M = 1 : 0,90 : 1,05$ și respectiv $t_P : t_C : t_M = 1 : 0,81 : 1,10$.

Raportul timpilor de solidificare confirmă de asemenea ștrangularea sistemului în dreptul canalului maselotă - piesă. Harta cantității de aliaj

fully reach part because this area does not reach junction channel - part until the end of part solidification.

Variant V2: It is a case in which the feeder is too small, and the channel section is increased compared to the previous case. The hot spot is formed in the feeder channel. Although the feeder canal section is large the feeder do not work properly because is undersized. The ratio of the solidification times and of the real solidification modules obtained by simulation is $t_P : t_C : t_M = 1 : 1.08 : 1.07$, respectively $M_P : M_C : M_M = 1 : 1.04 : 1.03$. These ratios show that the feeder is undersized. The values obtained by simulation are in accordance too with those obtained by calculation based on the geometric characteristics (relations 1 and 3), namely $t_P : t_C : t_M = 1 : 1.35 : 1.02$, respectively $M_P : M_C : M_M = 1 : 1.16 : 1.01$. The amount of useful liquid alloy in the feeder is very small. The shrinkage is formed in the channel because the hot spot is located in this area (the solidification time is the largest).

Variant V3: This is a feeding system properly sized. The solidification time ratio determined by simulation indicates that the solidification is properly directed. The ratio of the solidification time and of the solidification modules are $t_P : t_C : t_M = 1 : 1.29 : 1.52$, respectively $M_P : M_C : M_M = 1 : 1.14 : 1.23$. They also correspond to the solidification time ratio calculated based on the real solidification modules ($t_P : t_C : t_M = 1 : 1.32 : 1.51$, respectively $M_P : M_C : M_M = 1 : 1.15 : 1.23$). The useful liquid alloy in feeder can compensate a maximum contraction (of the liquid alloy during part solidification) of $\beta_{MAX} = 5.89\%$. This is sufficient to obtain a steel casting without shrinkage.

4.3. Experimental results

For experimental verification of the results obtained by simulation, the part of Figure 1 was cast in the three different feeder systems. The molds were made of silica sand (SiO_2) with sodium silicate binder, hardened with CO_2 . The temperature of the liquid alloy (measured in the ladle, prior to filling the mold) was $T_{0ME} = 1662\text{ }^\circ C$, and the temperature measured in at the funnel of the casting network was $T_{0ME} = 1648\text{ }^\circ C$. The three parts were cast simultaneously in the same mold.

The castings and feeders were sectioned to see the shrinkage position. The experimental results on the shrinkage position and the feeder operation were compared with those obtained by simulation.

lichid util din maselotă arată că acesta nu poate să ajungă integral în piesă, deoarece zona respectivă nu atinge joncțiunea canal – piesă până la sfârșitul solidificării piesei.

Varianta V2: Este un caz în care maselota este subdimensionată, iar canalul are secțiune mărită față de cazul precedent. Nodul termic se formează în canalul maselotă – piesă. Deși secțiunea canalului maselotă piesă este mare, maselota nu funcționează corespunzător deoarece este subdimensionată. Raportul timpilor de solidificare și al modulelor reale de solidificare obținut prin simulare este $t_P : t_C : t_M = 1 : 1.08 : 1.07$ și respectiv $M_P : M_C : M_M = 1 : 1.04 : 1.03$. Aceste rapoarte arată că maselota este subdimensionată. Valorile obținute prin simulare concordă de asemenea cu cele obținute prin calcul în funcție de geometrie (cu relațiile 1 și 3) și anume $t_P : t_C : t_M = 1 : 1.35 : 1.02$ și respectiv $M_P : M_C : M_M = 1 : 1.16 : 1.01$. Cantitatea de aliaj lichid util din maselotă este foarte mică. Retasura se formează în zona canalului, deoarece nodul termic (timpul de solidificare cel mai mare) este plasat în această zonă

Varianta V3: Este un sistem de maselotare dimensionat corespunzător. Raportul timpilor de solidificare determinat prin simulare, arată că solidificarea este dirijată corespunzător. Raportul timpilor de solidificare și respectiv al modulelor de solidificare este $t_P : t_C : t_M = 1 : 1.29 : 1.52$ și respectiv $M_P : M_C : M_M = 1 : 1.14 : 1.23$. Acestea corespund de asemenea cu raportul timpilor de solidificare calculați pe baza modulelor reale de solidificare ($t_P : t_C : t_M = 1 : 1.32 : 1.51$ și respectiv $M_P : M_C : M_M = 1 : 1.15 : 1.23$). Aliajul lichid util din maselotă poate compensa o contracție maximă, la solidificare a aliajului lichid din piesă egală cu $\beta_{MAX} = 5.89\%$. Aceasta este suficientă pentru a obține o piesă turnată din oțel, fără retasuri.

4.3. Rezultate experimentale

Pentru verificarea experimentală a rezultatelor obținute prin simulare, piesa din figura 1 s-a turnat experimental în cele trei variante de maselotare. Formele au fost realizate din nisip (SiO_2) cu liant silicat de sodiu întărit cu CO_2 . Temperatura aliajului lichid (măsurată în oala de turnare înainte de umplerea formei) a fost $T_{0ME} = 1662\text{ }^\circ C$, iar temperatura măsurată în pâlnia rețelei de turnare la sfârșitul umplerii a fost $T_{0ME} = 1648\text{ }^\circ C$. Cele trei piese au fost turnate simultan în aceeași formă de turnare.

Piesele și maselotele au fost secționare pentru a vizualiza poziția retasurilor. Rezultatele experimentale privind poziția retasurilor și funcționarea maselotelor, s-au comparat cu cele obținute prin

Figures 9 ÷ 11 show the shrinkage positions in the three cases. In Table 6 are given the coordinates of the hot spots (points where solidification ends) highlighted by simulation and experiment. In the case of experimental castings, hot spots coordinates are given by the coordinates of the lower tip of the shrinkages.

simulare. În figurile 9 ÷ 11 se observă poziția retasurilor în cele trei cazuri. În tabelul 6 sunt date coordonatele nodurilor termice (punctele în care se termină solidificarea) puse în evidență prin simulare și prin experiment. În cazul pieselor turnate experimentale, coordonatele nodurilor termice sunt date de coordonatele vârfului inferior al retasurilor.

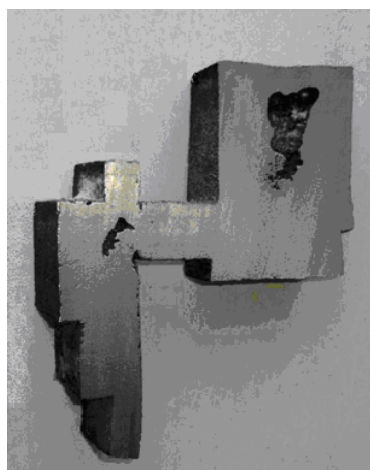


Figure 9. Part cast in variant V1

Figura 9. Piesa turnată în varianta V1

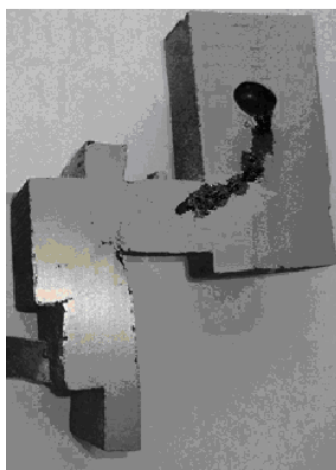


Figure 10. Part cast in variant V2

Figura 10. Piesa turnată în varianta V2

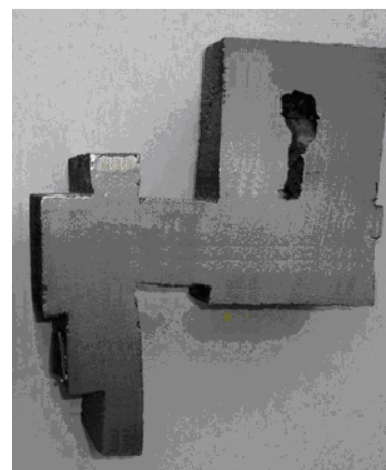


Figure 11. Part cast in variant V3

Figura 11. Piesa turnată în varianta V3

Table 6. The hot spots coordinates obtained by simulation and experiment, in [mm]
Tabelul 6. Coordonatele nodurilor termice obținute prin simulare și experimental, în [mm]

Variant Varianta	Main hot spots coordinates (inside the feeder) Coordonatele nodului termic principal (în maseletă)		Secondary hot spots coordinates (inside the casting) Coordonatele nodului termic secundar (în piesă)	
	Simulation Simulare	Experiment	Simulation Simulare	Experiment
Symbol	(x,y,z)	(x,y,z)	(x,y,z)	(x,y,z)
V1	(164;184;104)	(166;180;104)	(76;132;104)	(74;138;104)
V2	(128;154;104)	(138;144;104)	-	-
V3	(162;168;104)	(172;170;104)	-	-

Note. Coordinates are expressed in relation to Oxyz axis system in which the coordinates are represented in Figures 3-8 (Point O corresponds to the front - left - down corner in of the mold assembly from Figure 2)

Notă. Coordonatele sunt exprimate în raport cu sistemul de axe Oxyz, în care sunt reprezentate coordonatele figurilor 3-8 (punctul O corespunde cu colțul față - stânga - jos al ansamblului forme din figura 2)

5. Conclusions

The comparison of the shrinkage position inside experimental castings and the hot spots positions obtained by simulation shows a good concordance between the experimental results and those obtained by simulation. This comparison leads to the following observations:

- Figure 9 shows that in the experimental casting, variant V1, a secondary shrinkage is obtained near the feeder neck. This is caused by the premature interruption of communication feeder – casting, as shown by the data obtained by

5. Concluzii

Compararea poziției retasurilor și a nodurilor termice din piesele turnate experimentale, cu pozițiile acestora obținute prin simulare, arată o concordanță bună între rezultatele experimentale și cele obținute prin simulare. Această comparație conduce la următoarele observații:

- figura 9 arată că în piesa turnată experimentală, varianta V1, se obține o retasă secundară plasată în apropierea alimentatorului. Aceasta este cauzată de întreruperea prematură a comunicației maseletă – piesă turnată, așa cum arată atât datele obținute prin

simulation (Figure 3) and those highlighted by real solidification modulus value (Table 3);

- Figure 10 shows that in the experimental casting, variant V2, the main shrinkage is formed in the channel feeder – part. This position is due to the undersized feeder and insufficient amount of useful liquid steel available in the feeder, as shown by the data obtained by simulation (Figure 5) and those obtained by calculating the real solidification module (Table 3);

- Figure 11 shows that in the experimental casting, variant V3, the shrinkage is formed only in the feeder. This shows that the feeder is working correctly, as shown by the data obtained by simulation (Figure 7) and by calculating the real solidification module (Table 3). The amount of useful liquid alloy available in the feeder is enough to compensate the solidification contraction of the steel casting;

- The data in Table 6 shows that the position of the hot spots determined by experiment (positions of the points of alloy ending solidification – shrinkage lower peak) corresponds to the position of the hot spots determined by solidification simulation software. The difference between the real position of the hot spots and those obtained by simulation is of the order of 0 – 12 mm. The relative error between simulation and experiment (the hot spots coordinates) is within 0 – 7 %. The errors below 4% are prevalent.

Based on these observations it can be said that the software developed by us reproduces with sufficient precision the solidification of castings for alloy that solidify within a temperature range and forms only solid solutions at solidification.

simulare (figura 3), cât și cele puse în evidență prin valorile modulului real de solidificare (tabelul 3);

- figura 10 arată că în piesa turnată experimental, varianta V2, retasura principală se formează în canalul maseletoț – piesă. Această poziție a retasurii este cauzată de subdimensionarea maseletoței și de cantitatea insuficientă de oțel lichid util disponibil în maseletoță, așa cum arată datele obținute prin simulare (figura 5) și cele obținute prin calculul modulului real de solidificare (tabelul 3);

- figura 11 arată că în piesa turnată experimental, varianta V3, retasura se formează numai în maseletoță. Aceasta arată că maseletoța funcționează corect, așa cum arată și datele obținute prin simulare (figura 7) și prin calculul modulului real de solidificare (tabelul 3). Cantitatea de aliaj lichid util disponibil în maseletoță este suficientă pentru compensarea contracției la solidificare a piesei turnate din oțel;

- datele din tabelul 6 arată că poziția nodurilor termice stabilite prin experiment (poziția punctelor în care se termină solidificarea aliajului – vârful inferior al retasurilor) corespunde cu poziția nodurilor termice determinată prin simularea solidificării cu softul realizat. Diferențele între poziția nodurilor termice reale și cele obținute prin simulare este de ordinul 0 – 12 mm. Eroarea relativă între simulare și experiment (privind coordonatele nodurilor termice) este în limitele 0 – 7 %. Sunt predominante erorile sub 4%.

Pe baza acestor observații se poate afirma că softul realizat reproduce cu suficientă precizie solidificarea pieselor turnate din aliaje care se solidifică în interval de temperatura și care formează la solidificare numai soluție solidă.

References

1. Ciobanu, I., Ionescu, D., Monescu, V., Varga, B., Munteanu, I.S., Bedo, T. Crișan, 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 Universității Transilvania din Brașov, ISBN 978-606-19-0337-5 (in Romanian)
2. Soporan, V., Constantinescu, V. (1995) *Modelarea la nivel macrostructural a solidificării (Macrostructural level modeling of solidification)*. Ed. Dacia, Cluj-Napoca, ISBN 973-35-0526-9 (in Romanian)
3. Soporan, V., Constantinescu, V., Crișan, M. (1995) *Solidificarea aliajelor, preliminarii teoretice (Solidification of alloys, theoretical preliminaries)*. Ed. Dacia, Cluj-Napoca, ISBN 973-9704-1-5 (in Romanian)
4. Ștefănescu, D.M. (2001) *Science and Engineering of Casting Solidification*. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, Boston, ISBN 0-306-46750-X
5. Ciobanu, I., Munteanu, S.I., Crișan, A., Bedo, T. (2009) *The Real Solidification Module of Castings – Equations Defining and Applicability*. Metalurgia International, ISSN 1582-2214, no. 11, p. 21-30
6. Ciobanu, I., Munteanu, S.I., Crisan, A. (2011) *The Real Solidification Module of Castings*. Metalurgia, ISSN 0461-9579, no. 5, p. 34-43
7. Chvorinov, N. (1940) *Theory of Casting Solidification*. Giesserei, May 17, p. 177-186, Giesserei, May 31, p. 201-208, Giesserei June 17, p. 222-225
8. Ravi, B., Srinivasan, M.N. (1996) *Casting solidification analysis by modulus vector method*. International Journal Cast Metals Research, Vol. 9, no. 1, p. 1-7
9. Defretin, G. (1978) *Calcul des modules de solidification apparents des pieces de fonderie*. Fonderie 384, p. 355-361